

На правах рукописи



СЫЧЁВ ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО
И ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФУТЕРОВКИ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ
МЕЛЬНИЦЫ

2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: **Богданов Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механического оборудования БГТУ им. В.Г. Шухова

Официальные оппоненты: **Сиваченко Леонид Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин МОУ ВО «Белорусско-Российский университет»

Баракровских Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский государственный технический университет»

Защита состоится «30» сентября 2026 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте (URL: https://gos_att.bstu.ru/dis/Sychev).

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Семикопенко
канд. техн. наук, доц.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время промышленность производства строительных материалов и изделий является одной из лидирующих отраслей экономики Российской Федерации. Основным процессом в цементной промышленности является измельчение, на которое затрачивается более 60% электроэнергии. Наиболее энергоемким процессом является помол сырьевых материалов и клинкера. При помоле материалов на отечественных предприятиях используются барабанные шаровые мельницы (БШМ), которые обладают рядом существенных недостатков.

Наиболее существенными недостатками БШМ являются повышенный удельный расход энергии, высокий износ футеровки и мелющей загрузки. Вместе с тем, в промышленных условиях дальнейшее масштабное применение данных агрегатов обусловлено простотой конструкции, возможностью регулирования тонины помола готового продукта в широком диапазоне и автоматизации процесса измельчения.

При применении БШМ для помола сырьевых материалов и цементного клинкера, основные энергозатраты зависят от видов внутренних энергообменных устройств, к которым относятся футеровки, межкамерные перегородки, классифицирующие устройства. В этой связи, более выгодно разрабатывать рациональные варианты и комбинации внутренних энергообменных устройств, обеспечивающих оптимальные режимы помола, сбережение измельчающей среды и снижение энергопотребления.

Снижение энергопотребления является одним из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий Российской Федерации в соответствии с указом президента от 07.07.2011 г. № 899, в том числе и в промышленности строительных материалов.

При этом, существенное снижение затрат на разработку новых или модернизацию существующих конструкций БШМ оказывают современные методы и подходы к проектированию данного вида оборудования. В этой связи, наиболее перспективными технологиями разработки и модернизации БШМ являются технологии цифрового проектирования, позволяющие выполнять разработку цифровых двойников трубных шаровых мельниц (ТШМ). Данный подход является основой инновационного развития внутреннего рынка Российской Федерации и позволяет реализовать переход к цифровым технологиям и новым способам конструирования трубных шаровых мельниц. Это в полной мере соответствует указу президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642.

Степень разработанности темы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы использовались научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены проблематика и вопросы разработки футеровок БШМ и совершенствования процесса измельчения. Указанным научным направлением занимались ученые: Крюков Д.К,

Неронов Н.П., Журавлев П.А., Захаревич А.Ф., Андреев С.Е., Богданов В.С., Хахалев П.А., Вердиян М.А., Акунов В.И., Дуда В., Олевский В.А., Дэвис Э.В., Бонд Ф., Старк Х., Tano K., Boemer D., Wang M., Cleary P.W., Morrison Rob D., Jayasundara C.T., Zhu H.P., Yaoyu Li, Yang You, Dazhao Gou, Lei Xua, Kun Luo, Yongzhi Zhao, Pedrayes F., Norniella J. G., Melero M. G. и другие.

Научные работы ученых способствовали расширению знаний в области проектирования футеровок для барабанных шаровых мельниц. Однако, в настоящее время, недостаточно проработан вопрос разработки футеровок БШМ с учетом влияния различных факторов на срок их эксплуатации и эффективность процесса измельчения. В последние годы для разрешения подобных проблемных задач широкую популярность находит цифровое моделирование на основе метода дискретных элементов.

Объектом исследования является барабанная шаровая мельница для измельчения сырьевых материалов и цементного клинкера.

Предметом исследования является процесс измельчения материала в барабанной шаровой мельнице с различными вариантами исполнения футеровки.

Цель работы: разработка метода исследования режимов работы мельношей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

Задачи исследования:

1. Провести анализ техники и технологии в области измельчения, существующих конструкций футеровок и направлений повышения эффективности их использования.

2. Изучить существующие технические решения и подходы, а также методы проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц и исследования режимов работы мельношей загрузки.

3. Разработать математическую модель расчета энергетических и кинематических параметров мельношей загрузки.

4. Осуществить многовариантное цифровое моделирование поперечного и продольного профиля футеровки и определить рациональные режимы работы мельношей загрузки.

5. Разработать метод исследования режимов работы мельношей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

6. Разработать план и провести экспериментальные исследования процесса измельчения на лабораторной барабанной шаровой мельнице. Получить уравнения регрессии, описывающие зависимости выходных показателей: потребляемой мощности привода, остатка на сите №008, характеризующего тонкость помола готового продукта, удельного расхода энергии от исследуемых факторов.

7. Установить рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы.

8. Разработать технические рекомендации по внедрению методов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц с вариативным исполнением футеровки и определить их экономическую эффективность.

Научная новизна заключается в получении:

- адекватных математических моделей, описывающих кинематические, динамические и энергетические режимы работы мелющих тел с учетом параметров футеровки в поперечном и продольном сечении барабана мельницы, размера и массы мелющих тел, при которых достигается максимальная эффективность процесса измельчения;
- метода цифрового моделирования футеровки на основе цифровых двойников с использованием CAD/CAM/CAE-систем, позволяющего получить детализированный профиль футеровки и схем ее установки на рабочей поверхности барабана мельницы;
- метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования, который позволяет снизить временные затраты на разработку новых конструкций мельниц и модернизацию существующих;
- результатов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки и установлении влияния варьируемых параметров на траектории движения и скоростные параметры мелющих тел, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки;
- цифровых двойников барабанных шаровых мельниц с многовариантным исполнением профиля футеровки, применяемых для проведения цифрового моделирования и обладающих высокой степенью адекватности, зарегистрированных как программный продукт для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны математические выражения, позволяющие определить энергетические и кинематические параметры мелющей загрузки с учетом геометрических параметров профиля футеровки;
- разработан метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющий определить режимы работы мелющей загрузки, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки, а также эффективность измельчения;
- на основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований выполнена верификация результатов исследования режимов работы мелющей загрузки. Получены адекватные цифровые модели режимов работы мелющей загрузки, подтверждающие целесообразность использования разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки в условиях реального производства;

– реализована производственная апробация результатов научной работы на предприятии АО «Спасскцемент» в рамках исследования различных режимов работы мелющей загрузки трубной шаровой мельницы для помола сырьевых материалов и клинкера;

– результаты работы используются в образовательном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке обучающихся по направлениям 15.03.02-22 «Компьютерные технологии проектирования оборудования предприятий строительных материалов» и 15.05.01-24 «Проектирование технологических машин и комплексов».

Методы исследования.

В диссертационной работе использовались методы цифрового моделирования, математического анализа и статистики, многофакторного планирования эксперимента ПФЭ ЦКРП-2⁴, физического и цифрового моделирования, лабораторного эксперимента, сравнения экспериментальных и теоретических результатов, визуального наблюдения.

Автор защищает следующие положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические уравнения для расчета кинематических и энергетических параметров мелющей загрузки с учетом параметров выступа футеровки, размера и массы мелющих тел.

2. Метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки в поперечном и продольном сечении барабана мельницы на основе цифрового моделирования, позволяющий определить траектории движения и скоростные параметры мелющей загрузки, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки.

3. Результаты цифрового моделирования и экспериментальных исследований, определяющих изменение потребляемой мощности привода, остатка на сите, удельного расхода энергии в зависимости от конструктивно-технологических параметров лабораторной установки барабанной шаровой мельницы.

4. Алгоритм проектирования футеровки барабанной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы соответствует предъявляемым требованиям и обоснована применением точных контрольно-измерительных и вычислительных приборов, высокопроизводительных вычислительных графических станций, основополагающих принципов и законов. Подтверждена высокой степенью соответствия теоретических расчетов с результатами цифрового моделирования, а также экспериментальными данными, и положительным результатом промышленной апробации метода цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы.

Апробация результатов работы. Диссертационная работа выполнялась в БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках государственного задания (№FZWN-2024-0006 «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников»). Результаты диссертационной работы рассмотрены и одобрены на заседании кафедры механического оборудования БГТУ им. В.Г. Шухова.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: XVII Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство (г. Белгород, 30-31 октября 2025 г.), IV Национальной конференции «Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии» (г. Белгород, 10 июня 2023 г.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 15 статей, в том числе 4 в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 11 статей в научных журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Работа выполнена на 198 стр., содержит 6 глав, 129 рисунков, 12 таблиц, 113 формул, 110 источников литературы, 5 приложений на 10 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, обозначена цель и задачи исследований, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор научной и технической литературы техники и технологий измельчения. Несмотря на использование в цементной промышленности различных видов помольного оборудования: вертикальных валковых, кольцевых шаровых, пресс-валковых измельчителей, роликово-маятниковых мельниц, наибольшее распространение получили барабанные и трубные шаровые мельницы. На большинстве предприятий цементной промышленности РФ применяется указанный тип мельниц для измельчения как сырьевых материалов, так и цементного клинкера.

Проведен анализ различных типов футеровок, их назначения и направлений совершенствования. Осуществлен анализ существующих научных и методологических основ моделирования БШМ, позволяющих учесть характерные особенности и свойства материала футеровки и мелющей загрузки (МЗ), конструктивные параметры барабана мельницы и внутримельничных устройств. Определена цель научных исследований и сформулированы задачи для ее достижения.

Во второй главе определено, что рассмотрение движения МЗ, состоящей из набора шаров различного диаметра и параметров футеровки представляет собой актуальную задачу и требует учета вращательного движения шара по выступу футеровки и преодоления сопротивления качению. Установлено, что при движении шара, находящегося на выступе футеровки, в начальный момент времени центр шара движется, находясь на внутренней поверхности барабана мельницы. Затем центр шара переходит на край футеровки, где и происходит его сход с выступа футеровки. В дальнейшем шар движется по параболической траектории.

Рассмотрен частный случай определенного отдельного шара радиусом $r_{ш}$ находящегося на ступенчатой футеровки размером r_0 радиально ориентированной по отношению к центру барабана мельницы. Получено аналитическое выражение для определения угла отрыва шара от поверхности барабана:

$$\varphi_0 = \arctg \frac{f}{r_{ш}} + \arcsin \psi^2, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения качения; $r_{ш}$ – радиус шара, м; ψ – относительная частота вращения барабана мельницы, доли ед.

Получено уравнение, описывающее движение центра шара по поверхности футеровки:

$$r(\alpha) = \frac{A_0}{2} (\cos \alpha \cdot (\alpha_0 - \alpha) - \cos \alpha_0 \sin \alpha_0) + \cos^2 \alpha_0 \sin \alpha_0, \quad (2)$$

где:

$$A_0 = \frac{R - r_{ш}}{\psi^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{ш}^2}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \varphi - \gamma, \quad (4)$$

$$\gamma = \arctg \frac{f}{r_{ш}}. \quad (5)$$

Получено уравнение для определения угла поворота φ_1 , при котором центр шара достигает края площадки футеровки:

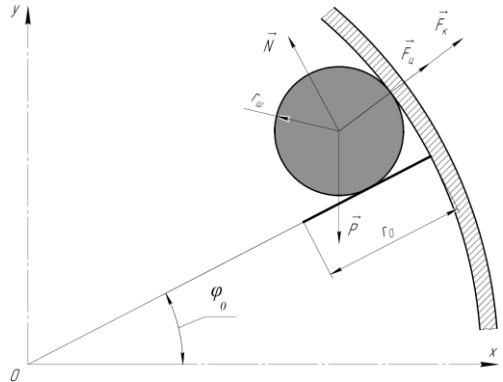


Рисунок 1. Расчетная схема равновесия шара r_0

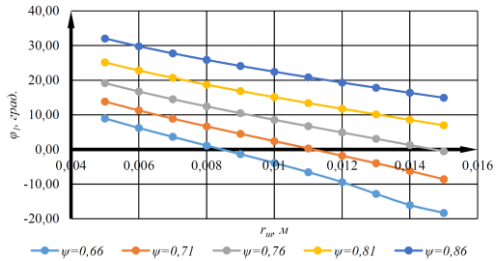


Рисунок 2. График зависимости угла φ_1 схода шара с выступа футеровки от радиуса шара при $r_0 = 2r_{ш}$

$$\frac{2r_0}{A_0} = \cos(\varphi_1 - \gamma) \cdot (\varphi_0 - \varphi_1 - 0,5\sin(2\varphi_0 - 2\gamma)) + \cos^2(\varphi_0 - \gamma)\sin(\varphi_1 - \gamma). \quad (6)$$

Определен угол между вектором скорости $\vec{v}$ и плоскостью футеровки.

$$\varphi_2 = \arctg \frac{2\psi^2(R-r_0)}{(R-r_{III})\sqrt{1+\frac{f^2}{r_{III}^2}}}. \quad (7)$$

На основании (2) и (7) определены значения проекции скорости движения шара:

$$\vartheta_{x0} = \vartheta \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (8)$$

$$\vartheta_{y0} = \vartheta \sin(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (9)$$

здесь ϑ_{x0} , ϑ_{y0} – соответственно, проекции вектора скорости на координатные оси декартовой системы координат «ХОУ».

Определена максимальная высота подъема шара после схода с выступа футеровки:

$$y_{max} = y_0 + \frac{\vartheta^2 \sin^2 \varphi_3}{2g}. \quad (10)$$

Таким образом, полученное выражение (10) позволяет сделать вывод о энергетическом преимуществе шара при наличии рассматриваемой футеровки по сравнению с гладкой поверхностью. Это в свою очередь означает интенсификацию процесса движения шара в поперечном сечении БШМ.

В третьей главе представлен разработанный метод исследования режимов работы мелющей загрузки БШМ с вариативным исполнением футеровки: прокатной футеровки с одинарными выступами, прокатной футеровки со сдвоенными выступами и волнистой футеровки на основе цифрового моделирования с применением специализированного программного обеспечения на основе метода дискретных элементов *DEM*. Разработанный метод позволяет осуществлять исследование режимов работы МЗ с учетом геометрических параметров поперечного и продольного профиля футеровки, физико-механических свойств пар контактов (футеровки, МТ и частиц измельчаемого материала), частоты вращения барабана мельницы, изменения профиля футеровки ввиду ее износа.

Осуществлена подготовка цифровых моделей однокамерной БШМ с вариативным исполнением футеровки, изготовленной из композитных

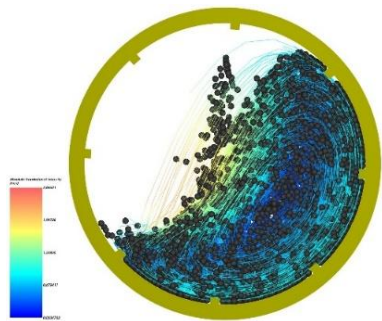


Рисунок 3. Траектории движения мелющих тел и частиц материала в поперечном сечении барабана мельницы при $\varphi=0,40$; $t=8$ ед.; $h=10$ мм; $n=40,51$ об/мин

материалов, определены физико-механические свойства материала футеровки, МЗ и измельчаемого материала.

Проведено исследование режимов работы МЗ (рис. 3), представляющей собой смесь шаров различного диаметра и частиц измельчаемого материала, и определены траектории ее движения. Установлены кинематические параметры МЗ и потребляемая мощность привода БШМ. При условии контактного взаимодействия МЗ с футеровкой БШМ определены характер формы и величины износа, зависящие от ударного и абразивного воздействия МТ и частиц материала на футеровку. Установлена эффективность процесса измельчения при использовании различных типов футеровок с учетом энергетических параметров МЗ.

В четвертой главе представлена методика проведения экспериментальных исследований процесса измельчения в БШМ.

Приведено описание лабораторной установки БШМ (рис. 4), представляющей собой корпус 1 в виде полого барабана цилиндрической формы, опирающегося на ролики 2 в подшипниковых опорах 3. На одном из торцов БШМ установлено прозрачное окно 4 для визуального сравнительного анализа траекторий движения МТ.

Лабораторная БШМ приводится во вращение от электродвигателя 7 модели АИР90L4 ($P=2,2$ кВт, $n=1440$ об/мин). Электродвигатель передает вращение через клиноременную передачу 6 ($i=1,55$) на входной вал редуктора 5 червячного типа РПЧ-120 ($i=19,5$), который соединен с корпусом мельницы втулочно-пальцевой муфтой 8. Загрузка МТ и материала в корпус БШМ осуществляется через люк 9. Лабораторная БШМ монтируется на раме 10.

Определен перечень контрольно-измерительных приборов, необходимых для регистрации параметров процесса измельчения.

Для проведения экспериментальных исследований выбран центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента ПФЭ ЦКРП-2⁴. Установлены варьируемые факторы, влияющие на изменение функций отклика. Основными факторами выбраны: n – частота вращения барабана мельницы, об/мин; φ – коэффициент загрузки мельницы МТ и материалом, доли ед.; h – высота выступов футеровки, мм; t – количество

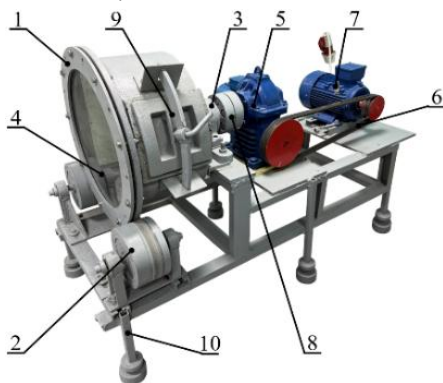


Рисунок 4. Общий вид лабораторной барабанной шаровой мельницы:

- 1 – корпус; 2 – ролики;
- 3 – подшипник; 4 – прозрачное окно;
- 5 – червячный редуктор;
- 6 – клиноременная передача;
- 7 – электродвигатель;
- 8 – втулочно-пальцевая муфта;
- 9 – люк; 10 – рама

выступов футеровки, ед. Определены функции отклика: P (потребляемая мощность привода мельницы, Вт), ΣR_{008} (остаток на сите, %), q (удельный расход энергии, Вт·ч/кг).

Выполнено обоснование выбора функций отклика и основных факторов экспериментальных исследований.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения в лабораторной БИМ (рис. 5). Подтверждена адекватность теоретических исследований и результатов цифрового моделирования футеровки и режимов работы МЗ.

По результатам экспериментальных исследований определена адекватность полученных цифровых моделей с использованием визуального сравнительного анализа данных цифрового моделирования и эмпирических данных. Установлено, что полученные в ходе цифрового моделирования траектории движения МТ идентичны траекториям движения МТ, полученных в ходе экспериментальных исследований.

После статистической обработки результатов экспериментальных данных были получены уравнения регрессии в кодированном виде, которые были преобразованы в натуральный вид. Уравнения характеризуют зависимость функций отклика от варьируемых факторов:

$$P = 194,77 - 1,97n - 1909,79\varphi + 20,59h + 28,34t + 54,27n\varphi - 0,42nh - 0,58nt - 7,05\varphi h + 11,94\varphi t - 0,19ht + 0,06n^2 + 223,20\varphi^2 + 0,02h^2 - 0,10t^2. \quad (11)$$

$$\Sigma R_{008} = 173,98 - 6,70n - 151,20\varphi - 1,39h + 3,00 \cdot t - 1,87n\varphi - 0,003nh - 0,02nt - 0,52\varphi h - 1,15\varphi t - 0,01ht + 0,08n^2 + 451,60\varphi^2 + 0,05h^2 - 0,04t^2. \quad (12)$$

$$q = 106,36 - 0,79n - 544,27\varphi + 1,32h + 2,53t + 2,67n\varphi - 0,04nh - 0,05nt - 0,51\varphi h + 1,11\varphi t - 0,02ht + 0,02n^2 + 561,20\varphi^2 + 0,01h^2 - 0,001t^2. \quad (13)$$

После обработки и анализа данных построен ряд графических зависимостей, отражающих влияние каждого фактора при их поочередном варьировании.

Проведенный анализ графических зависимостей показывает, что потребляемая мощность привода мельницы растет с увеличением частоты вращения n , коэффициента загрузки φ при фиксированных значениях высоты

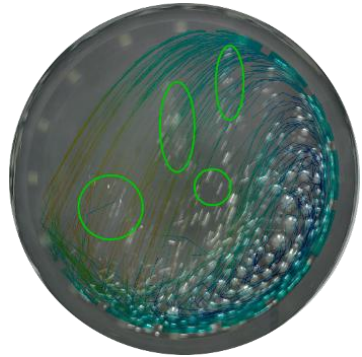


Рисунок 5. Траектории движения
мельющих тел при $\varphi=0,20$;
 $h=15$ мм; $t=16$ ед.;
 $n=46,51$ об/мин

выступов h и их количестве t (рис. 6). При этом значение P уменьшается при увеличении количества выступов t и высоты выступов h . Минимальное значение остатка на сите $\Sigma R_{008}=12,5\%$ достигается при $h=10$ мм, $t=12$ ед., $n=44,87$ об/мин и $\varphi=0,28$. Установлено, что минимальное значение удельного расхода энергии, $q=29,37$ Вт·ч/кг, достигается при $h=10$ мм, $t=12$ ед., $n=40,3$ об/мин, $\varphi=0,40$.

При определении рациональных режимов работы лабораторной ШБМ к функциям отклика предъявляется требование достижения ими минимальных значений:

$$P \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\Sigma R_{008} \rightarrow \min, \quad (15)$$

$$q \rightarrow \min. \quad (16)$$

Из графика, представленного на рисунке 7, зависимости функций отклика P , ΣR_{008} , $q=f(n)$ видно, что с возрастанием частоты вращения в интервале $n=40,5-44,4$ об/мин величина остатка на сите №008 достигает минимального значения $\Sigma R_{008}=6,0\%$, следовательно, возрастает качественный показатель

тонкости помола готового продукта.

Однако возрастает также потребляемая мощность привода и удельный расход энергии. При дальнейшем увеличении частоты вращения барабана мельницы до $n=46,51$ об/мин остаток на сите №008 незначительно увеличивается. При последующем увеличении частоты вращения барабана мельницы происходит рост потребляемой мощности и удельного расхода энергии, который является неоправданным, ввиду увеличения остатка на сите №008. Таким образом, наиболее рациональным вариантом для эксплуатации лабораторной БШМ является диапазон частоты вращения $n=43,5-46,5$ об/мин, при котором будет достигаться достаточное качество измельчаемого материала.

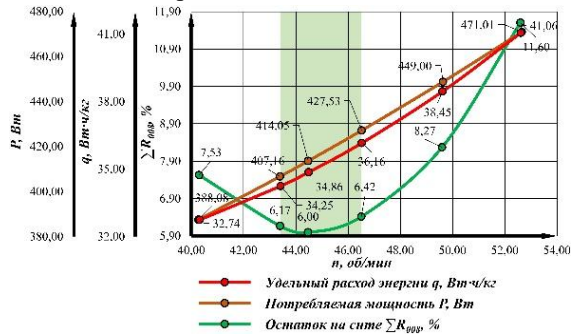


Рисунок 7. График зависимости P , ΣR_{008} , $q=f(n)$

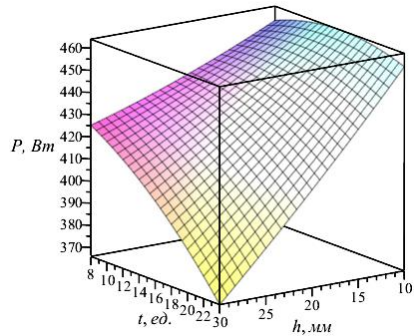


Рисунок 6. График зависимости потребляемой мощности $P=f(h, t)$ при $n=46,51$ об/мин, $\varphi=0,30$

Анализ зависимости функции отклика $P, \sum R_{008}, q=f(\varphi)$ определено, что при измельчении материала рациональным значением коэффициента загрузки лабораторной БШМ является диапазон от 0,28 до 0,33. При этом, достигается тонкость помола готового продукта $\sum R_{008}=12,85\%$ при умеренном снижении удельного расхода энергии до $q=36,96$ Вт·ч/кг. Дальнейшее увеличение коэффициента загрузки нецелесообразно ввиду увеличения остатка на сите №008.

Из зависимости функций отклика $P, \sum R_{008}, q=f(h)$ определено, что с увеличением высоты выступов тонкость помола готового продукта снижается с параллельным снижением значений потребляемой мощности и удельного расхода энергии. В пределах высоты выступов $(18-23) \cdot 10^{-3}$ м достигает значение остатка на сите $\sum R_{008}=8,77\%$. При последующем увеличении высоты выступов остаток на сите увеличивается, что не является целесообразным.

Из зависимости функций отклика $P, \sum R_{008}, q=f(t)$ установлено, что при увеличении количества выступов футеровки все основные показатели возрастают до максимального значения: остатка на сите $\sum R_{008}=14,10\%$, потребляемой мощности привода $P=464,01$ Вт и удельного расхода энергии $q=37,33$ Вт·ч/кг. После чего значения показателей снижаются. В данном случае, рациональный режим работы лабораторной БШМ достигается при количестве выступов $t=8-12$ ед., при котором остаток на сите и удельный расход энергии увеличиваются не значительно.

В шестой главе представлена апробация результатов работы на предприятии АО «Спасскцемент» в рамках исследования различных режимов работы мелющей загрузки трубной шаровой мельницы для помола сырьевых материалов и клинкера. Полученные результаты отражены в акте о внедрении АО «Спасскцемент» (г. Спасск-Дальний, Приморский край).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа научно-технической литературы и исследований отечественных и зарубежных ученых установлено, что основным направлением совершенствования барабанных шаровых мельниц является разработка высокоэффективных внутримельничных устройств с применением современных методов и подходов цифрового моделирования.

2. Получены аналитические выражения, учитывающие конструктивные особенности рассматриваемой футеровки, для определения угла отрыва шара с выступа футеровки, скорости шара в момент его отрыва от выступа футеровки и в момент его падения в зону «пяты».

3. Создан цифровой двойник барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением профиля футеровки, применяемый для проведения моделирования, учитывающего конструктивные особенности футеровки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026614550 от 16.02.2026 г., позволяющей

автоматизировать операции по разработке множества цифровых двойников барабанной мельницы.

4. Разработан метод исследования режимов работы мелющей загрузки, состоящей из мелющих тел и частиц измельчаемого материала, барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением поперечного и продольного профиля футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющий выполнить анализ траекторий движения мелющих тел, определить скоростные и энергетические параметры мелющей загрузки, потребляемую мощность привода; осуществить оценку характера и величины износа футеровки, провести оценку эффективности процесса измельчения.

5. По результатам цифрового моделирования различных исполнений футеровок и исследования режимов работы мелющей загрузки определены рациональные режимы работы мелющих загрузки, достигаемые при частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин, определено максимальное значение потребляемой мощности $P=652$ Вт, что подтверждается сходимостью с расчетными данными, расхождение с которыми не превышает 7%.

6. Установлено влияние варьируемых параметров цифрового моделирования на степень износа рабочей поверхности футеровки и определено, что на степень износа рабочей поверхности футеровки оказывают существенное влияние частота вращения барабана мельницы и коэффициент загрузки. При этом, минимальной степенью износа, равной 15,1% обладает волнистая футеровка, при износе которой режим работы мелющей загрузки изменяется незначительно.

7. Выполнена модернизация лабораторной барабанной шаровой мельницы путем установки футеровки, изготовленной из композитных материалов с применением многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий. Проведена апробация результатов государственного задания №FZWN-2024-0006 «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников» в рамках изготовления футеровки из металла с применением аддитивной технологии послойного наплавления металлической проволоки.

8. В ходе реализации экспериментальных исследований на основе центрального композиционного ротатбельного плана (ЦКРП-2⁴) полного факторного эксперимента в качестве функций отклика были выбраны: потребляемая мощность привода P , остаток на сите $\sum R_{008}$, удельный расход энергии q ; варьируемые факторы: x_1 – частота вращения барабана мельницы, об/мин; x_2 – коэффициент загрузки, доли ед.; x_3 – высота выступов футеровки, мм; x_4 – количество выступов футеровки, ед. Уровни исследуемых факторов учитывают все возможные режимы работы мельницы и процесса измельчения в рамках установленных программой параметров.

9. На основе статистической обработке результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии в кодированном $P, \sum R_{008}, q=f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, и натуральном виде $P, \sum R_{008}, q=f(n, \varphi, h, t)$. Наибольшее влияние на величину потребляемой мощности P и остаток на сите $\sum R_{008}$ оказывают факторы x_2 и x_1 – величина коэффициента загрузки и частота вращения барабана мельницы, что подтверждает адекватность полученных уравнений регрессии.

10. Определены рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы, при которых потребляемая мощность привода находится в пределах $P=410-460$ Вт, тонкость помола готового продукта в пределах $\sum R_{008}=6,00-13,62\%$, удельный расход энергии в пределах $q=34-39$ Вт·ч/кг, которые обеспечиваются в диапазоне варьируемых факторов: $n=43,5-46,5$ об/мин, $\varphi=0,28-0,33$ доли ед., $h=18-23$ мм, $t=8-12$ ед.

11. Проведена апробация результатов работы на предприятии АО «Спасскцемент» г. Спасск-Дальний в рамках выполнения научно-исследовательских работ. Проведено исследование режимов работы мелющей загрузки, в ходе которого при сохранении показателей производительности удалось добиться снижения показателей потребления электроэнергии до 6%.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы рекомендуются для промышленного применения при проектировании новых типов футеровок барабанных шаровых мельниц с целью обеспечения устойчивого режима работы мелющей загрузки и прогнозирования сроков ремонта, а также для выполнения выпускных квалификационных работ при подготовке обучающихся бакалавриата, специалитета, магистратуры и аспирантуры.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в совершенствовании процесса измельчения за счет определения рациональных параметров футеровки промышленных мельниц с целью снижения удельного расхода энергии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Богданов, В.С. Моделирование кинетики работы мелющих тел в шаровой барабанной мельнице / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, **Е.А. Сычёв** // Цемент и его применение. – 2024. – № 6. – С. 34-37.

2. Богданов, В.С. Цифровое проектирование футеровки трубных мельниц / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, **Е.А. Сычёв** [и др.] // Цемент и его применение. – 2025. – № 1. – С. 38-41.

3. Богданов, В.С. Численное моделирование износа футеровки шаровой мельницы / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, **Е.А. Сычёв** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 254-261. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-1-254-255.

4. Богданов, В.С. Исследование распределения мощности, затрачиваемой при помоле клинкера / В.С. Богданов, **Е.А. Сычёв**, С.И. Анциферов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 3. – С. 344-352. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-3-344-345.

В объектах интеллектуальной собственности:

5. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614550 Российская Федерация.** Программа формирования модели корпуса барабанной мельницы для цифрового моделирования режимов работы шаровой загрузки: № 2026613202 заявл. 11.02.2026; зарегистр. 16.02.2026; опубл. 16.02.2026 / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, **Е.А. Сычёв**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «БГТУ им. В.Г. Шухова».

Публикации в других изданиях:

6. **Сычёв, Е.А.** Возможности моделирования износа футеровки шаровой мельницы в Rocky DEM / Е.А. Сычёв, И.В. Севостьянов // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVII Международного молодежного форума, Белгород, 30-31 октября 2025 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 715-718.

7. Анциферов, С.И. Мельницы самоизмельчения / С.И. Анциферов, Н.А. Плужников, **Е.А. Сычёв**, А.И. Пушкарев // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии: Сборник докладов IV Национальной конференции, Белгород, 10 июня 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 10-13.

8. Богданов, В.С. Влияние высоты выступов футеровки шаровой барабанной мельницы на процесс измельчения / В.С. Богданов, **Е.А. Сычёв**, Е.И. Шелудченко [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 38-41.

9. Богданов, В.С. Исследование режимов работы шаровой загрузки при использовании двойных выступов футеровки / В.С. Богданов, **Е.А. Сычёв**, У.И. Запара [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 33-37.

10. Богданов, В.С. Численное моделирование режимов работы мелюшей загрузки шаровой барабанной мельницы / В.С. Богданов, **Е.А. Сычёв**, А.А. Волков [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 29-32.

11. Фадин, Ю.М. Проблемы совершенствования трубных мельниц / Ю.М. Фадин, **Е.А. Сычёв**, Е.В. Лазько, Т.Д. Соколова, И.В. Севостьянов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для

производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2022. – С. 409-412.

12. Фадин, Ю.М. Направления совершенствования бронефутеровки трубной шаровой мельницы / Ю.М. Фадин, **Е.А. Сычёв**, В.А. Жукова, Р.В. Луценко, А.С. Бочарникова // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2022. – С. 401-404.

13. **Сычёв, Е.А.** Трубная шаровая мельница / Е. А. Сычёв, Е.В. Лазыко, И.В. Севостьянов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2022. – С. 362-365.

14. Анциферов, С.И. Анализ современных конструкций трубных шаровых мельниц / С.И. Анциферов, **Е.А. Сычёв**, А.А. Обернихин, Н.А. Борщёв, В.В. Кулик // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2023. – С. 7-10.

15. Анциферов, С.И. Интенсификация процесса помола в шаровой мельнице / С.И. Анциферов, А.Н. Сысоев, **Е.А. Сычёв**, С.В. Медведев, В.В. Кулик // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2023. – С. 49-52.

16. Разиньков, Н.В. Направления совершенствования трубных шаровых мельниц / Н.В. Разиньков, А.С. Бочарникова, Ю.Д. Борзых, **Е.А. Сычёв** // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2024. – С. 199-202.

СЫЧЁВ ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО
И ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФУТЕРОВКИ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ
МЕЛЬНИЦЫ

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.06.2026 г.
Формат 60×80/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 74.

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46