

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Сычёва Евгения Андреевича

«Цифровое моделирование рационального поперечного и продольного профиля футеровки с учетом режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.5.21. «Машины, агрегаты и технологические процессы»

Актуальность темы диссертационной работы Сычёва Е. А. обусловлена прежде всего высокими энергозатратами на процесс измельчения сырьевых материалов в добывающей и обрабатывающей отраслях промышленности, а также на измельчение цементного клинкера в промышленности строительных материалов. Существующее оборудование, в частности, барабанные шаровые мельницы обладают рядом недостатков, к числу которых относятся: повышенный удельный расход энергии, высокий износ футеровки и мелющей загрузки. Поэтому повышение эффективности работы барабанных шаровых мельниц (БШМ) является актуальной задачей. Увеличение эффективности работы шаровых мельниц возможно путем разработки новых видов внутренних энергообменных устройств, к которым относятся футеровка, межкамерные перегородки и классифицирующие устройства. Рациональные варианты и комбинации внутренних энергообменных устройств могут обеспечить оптимальные режимы работы, уменьшить износ мелющей загрузки и снизить энергопотребление.

При этом существенное снижение затрат на разработку новых или модернизацию существующих конструкций БШМ оказывают современные методы и подходы к проектированию данного вида оборудования, где наиболее перспективными технологиями разработки и модернизации БШМ являются технологии цифрового проектирования с использованием CAD/CAM/CAE-систем, позволяющие выполнять разработку цифровых двойников шаровых мельниц. В связи с этим тема диссертационной работы Сычёва Е. А., посвященная цифровому моделированию рациональной конструкции футеровки с учетом режимов работы мелющей загрузки, является актуальной.

Научная новизна работы 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.

Перечисленные результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями, которые можно рассматривать как вклад в развитие теории и технологии измельчения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Диссертантом изучены и критически анализируются известные достижения других авторов по вопросам разработки и цифрового моделирования внутримельничных устройств БШМ и совершенствования процесса измельчения. Список использованной литературы, содержащий 110 наименований, включает современные научные труды отечественных и зарубежных ученых. Аналитические выражения, полученные автором при описании процесса движения мелющих шаров внутри корпуса мельницы с учетом поперечного профиля футеровки, основаны на основополагающих законах и принципах. Для решения и анализа полученных уравнений использовались численные методы с использованием современных вычислительных программ. Предложенная методика цифрового моделирования футеровки БШМ основана на методе дискретных элементов с использованием современных CAD/CAM/CAE-программ, позволяет исследовать процесс измельчения и определять рациональные режимные и конструктивные параметры, а также траектории движения мелющей загрузки (МЗ). Для подтверждения теоретических положений автором проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены зависимости основных параметров, характеризующих процесс измельчения. На лабораторной мельнице с прозрачным окном проведен большой объем экспериментальных исследований режимов работы МЗ с вариативным исполнением футеровки по определению траекторий движения МЗ и износа футеровки. Выводы и рекомендации проверены в промышленных условиях. В работе приводятся результаты внедрения метода цифрового моделирования футеровки трубной шаровой мельницы при измельчении цементного клинкера. Все это подтверждает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием основополагающих принципов и законов, применением точных контрольно-измерительных и вычислительных приборов, высокопроизводительных вычислительных графических станций. Диссертационная работа основана на достаточном объеме экспериментальных исследований процесса измельчения в шаровой мельнице. Достоверность теоретических результатов также подтверждается их удовлетворительным соответствием данным цифрового моделирования и эксперимента, а также положительным итогом промышленной апробации метода цифрового моделирования футеровки БШМ. Полученные диссертантом результаты достоверны, выводы и заключения по работе обоснованы.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных математических выражениях, позволяющих определить энергетические и кинематические параметры мелющей загрузки с учетом геометрических параметров профиля футеровки. В разработанном методе исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющим определить режимы работы мелющей загрузки, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки, и эффективность измельчения.

Практическая значимость. В работе на основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований выполнена верификация результатов цифрового моделирования футеровки БШМ. Получены адекватные цифровые модели режимов работы МЗ, подтверждающие целесообразность использования разработанного метода по исследованию режимов работы МЗ в условиях реального производства. Выполнена 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, что подтверждается актом внедрения результатов работы на предприятии. 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», что также подтверждено актом внедрения в учебный процесс.

Оценка содержания работы и ее завершенности

Основные научные результаты докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе международной. По теме диссертации 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.

Диссертационная работа содержит: введение, шесть глав с описанием и обсуждением полученных научных результатов, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, содержащий 110 наименований, пять приложений. Работа изложена на 198 страницах и содержит 129 рисунков, 12 таблиц. В диссертации имеются ссылки на публикации автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Работа оформлена по ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления», написана научным языком, с соблюдением правил стилистики.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлены источники апробации результатов работы, методы исследования и степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

В первой главе диссертационной работы выполнен аналитический обзор научной и технической литературы, техники и технологий измельчения. Представлен анализ конструкций мельниц, применяемых в цементной промышленности: шаровые, вертикальные валковые, кольцевые шаровые, барабанные валковые, вертикальные роликово-маятниковые мельницы. Наибольшее распространение получили барабанные и трубные шаровые мельницы. Большинство предприятий производства строительных материалов РФ применяет данный 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 МЗ, конструктивные параметры барабана мельницы и внутримельничных устройств. На основе проведенного анализа и изученных литературных источников сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе обусловлена необходимость 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 отдельного шара радиусом $r_{ш}$, находящегося на ступенчатой футеровке размером r_0 , которая радиально ориентирована по отношению к центру барабана мельницы. Получено аналитическое выражение

для определения угла отрыва шара от поверхности барабана. Получено уравнение, описывающее движение центра шара по поверхности футеровки. Определен угол между вектором скорости и плоскостью футеровки. Определена максимальная высота подъема шара после схода с выступа футеровки. Сделан вывод о энергетическом преимуществе шара при наличии рассматриваемой футеровки в сравнении с гладкой поверхностью. Это в свою очередь означает интенсификацию процесса движения шара в поперечном сечении БШМ.

В третьей главе описан разработанный метод исследования режимов работы мелющей загрузки БШМ с вариативным исполнением футеровки (прокатной футеровки с одинарными выступами, прокатной футеровки со сдвоенными выступами, волнистой футеровки) с применением цифрового моделирования на основе метода дискретных элементов.

Проведено исследование режимов работы МЗ, представляющей собой смесь шаров различного диаметра с частицами 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 мелющих тел (МТ) и частиц материала на футеровку. Установлена эффективность процесса измельчения при использовании различных типов футеровок с учетом энергетических параметров МЗ.

В четвертой главе описана лабораторная установка барабанной шаровой мельницы, представляющая собой корпус в виде полого барабана цилиндрической формы, опирающегося на ролики в подшипниковых опорах. На одном из торцов барабанной шаровой мельницы установлено прозрачное окно для визуального сравнительного анализа траекторий движения мелющих тел. Лабораторная барабанная шаровая мельница приводится во вращение от электродвигателя модели АИР90L4. Электродвигатель передает вращение через клиноременную передачу на входной вал редуктора червячного типа РПЧ-120, который соединен с корпусом мельницы втулочно-пальцевой муфтой. Загрузка мелющих тел и материала в корпус барабанной шаровой мельницы осуществляется через люк. Лабораторная барабанная шаровая мельница монтируется на раме.

Описана методика проведения экспериментальных исследований, для которой выбран центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента ПФЭ. Установлены варьируемые факторы, влияющие на изменение функций отклика. Основными факторами выбраны следующие параметры: n – частота вращения барабана мельницы, об/мин; φ – коэффициент загрузки мельницы МТ и материалом, доли ед.; h – высота выступов футеровки, мм; t – количество выступов футеровки, ед. Определены функции отклика: P – потребляемая мощность привода мельницы, Вт; Q – производительность, кг/ч; $\sum R_{008}$ – остаток на сите № 008, %; q – удельный расход энергии, Вт·ч/кг.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения в лабораторной барабанной шаровой мельнице. Подтверждена адекватность теоретических исследований и результатов цифрового моделирования футеровки и режимов работы мелющей загрузки. Расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями потребляемой мощности привода не превышает 7 %.

Анализ полученных графических зависимостей функций показал, что с возрастанием частоты вращения в интервале $n = 40,5\text{--}44,4$ об/мин величина остатка на сите №008 достигает минимального значения $\sum R_{008} = 6,0$ %, 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 $n = 43,5\text{--}46,5$ об/мин, при котором будет достигаться достаточное качество измельчаемого материала.

Представлены полученные уравнения регрессии и определены рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы, обеспечивающие эффективное измельчение материала.

В шестой главе представлены результаты промышленной апробации методов цифрового моделирования футеровки трубной шаровой мельницы (ТШМ) на предприятии АО «Спасскцемент» в рамках исследования различных режимов работы мелющей загрузки ТШМ для помола клинкера. Определены траектории движения мелющих тел в поперечном сечении барабана мельницы, произведен анализ траекторий движения и скоростей движения мелющих тел и частиц клинкера, выполнено моделирование износа футеровки. По результатам цифрового моделирования с применением цифрового двойника промышленной ТШМ разработана конструкция модернизированного профиля футеровки первой камеры мельницы. Проведенные исследования режимов работы мелющей загрузки позволили снизить потребление электроэнергии до 6 % при сохранении показателей производительности и тонкости помола. Полученные результаты отражены в акте о внедрении на предприятии АО «Спасскцемент» (г. Спасск-Дальний, Приморский край).

В заключении сформулированы полученные в процессе диссертационного исследования научные и практические результаты.

В приложении приводятся программа расчета угла схода шара с футеровки, копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, акт внедрения результатов работы на предприятии АО «Спасскцемент», расчет экономической эффективности внедрения метода

исследования режимов работы мелющей загрузки на АО «Спасскцемент» и акт внедрения в учебный процесс.

Вопросы и замечания по диссертационной работе:

1. Учитывалось ли влияние продольного профиля футеровки на потребляемую мощность P , удельный расход энергии q и остаток на сите №008 в расчетных моделях и экспериментальных исследованиях?
2. В лабораторных исследованиях не в полной мере описаны физико-механические свойства измельчаемого материала. Не приведен гранулометрический состав кварцевого песка (указана фракция «-1»).
3. В работе не дано обоснование выбранного ассортимента и диаметра мелющих шаров.
4. В работе имеется ряд неточностей и редакционных ошибок. Не всегда корректно выполнена расшифровка условных обозначений формул. На страницах 56–57 в формулах (2.86)–(2.87) отсутствует расшифровка некоторых условных обозначений при первом их упоминании и также их расшифровка отсутствует в списке условных обозначений. В данных формулах также отсутствуют индексы.
5. На рисунках 5.20–5.23 не указано, при каких значениях параметров n , φ , h и t получены приведенные зависимости P , q и $\sum R_{008}$. Например, на рис. 5.20 приведены графики зависимости P , q и $\sum R_{008}$ от n , но не указаны при каких φ , h и t они получены. Не всегда корректно указываются ссылки на рисунки. На страницах 76–80 ссылки на рисунки 3.23–3.26 приведены в тексте после самих рисунков.
6. В автореферате на странице 12 в первом абзаце приведено минимальное значение полного остатка на сите №008 равное 12,5 % при определенных режимах и параметрах мельницы, но данное значение не является минимальным в проведенном исследовании. Из графика зависимости, приведенного на рисунке 7 автореферата, видно, что минимальное значение остатка на сите №008 составляет 6 %.

Отмеченные замечания не меняют общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают важность и ценность полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Сычёва Евгения Андреевича соответствует паспорту специальности 2.5.21. «Машины, агрегаты и технологические процессы» в пунктах 1, 6, 8 («Разработка научных и методологических основ технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов», «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса», «Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики,

ремонтопригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации»).

По уровню выполненных исследований, объему, актуальности темы, теоретической и практической значимости, степени обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационная работа Сычёва Евгения Андреевича на тему «Цифровое моделирование рационального поперечного и продольного профиля футеровки с учетом режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные методы цифрового проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц с учетом режимов работы мелющей загрузки, имеющие существенное значение для развития страны, и соответствует требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а автор работы – Сычёв Евгений Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21. «Машины, агрегаты и технологические процессы».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук
по специальности 2.6.13. «Процессы и аппараты химических технологий»,
доцент, доцент кафедры
«Оборудование и автоматизация
силикатных производств»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»



Бариковских Дмитрий Сергеевич

31.08.2026г

Контактная информация

Адрес: 620062, Свердловская область,
г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Телефон: +7 (343) 375-44-44
E-mail: rector@urfu.ru (организация)
Сайт: <https://urfu.ru/ru/>

Подпись официального оппонента
доцента Д. С. Бариковских заверяю

✓ Ученый секретарь Совета УрФУ,
к.т.н., доцент



Морозова Вера Анатольевна
ГЛАВНЫЙ СПЕЦИАЛИСТ
УЧЕНОГО СОВЕТА УРФУ
Кудряшова Н.Н.