

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
Федерального государственного
образовательного учреждения
высшего образования
«Донбасский государственный
технический университет»



Е.С. Смекалин

« 01 » 09 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации по диссертации Сычёва Евгения Андреевича
на тему: «Цифровое моделирование рационального поперечного и продольного
профиля футеровки с учётом режимов работы мелющей загрузки
барабанной шаровой мельницы»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

Актуальность темы выполненной работы. Производство строительных материалов занимает стратегически важную нишу в экономике России. Ключевым и наиболее энергозатратным этапом в цементной индустрии является измельчение сырья и клинкера, на долю которого приходится свыше 60% общего энергопотребления. Несмотря на широкое распространение барабанных шаровых мельниц (БШМ) на отечественных предприятиях, их эксплуатация сопряжена с рядом проблем: высоким удельным расходом электроэнергии и интенсивным износом мелющих тел и футеровки. Тем не менее, благодаря конструктивной простоте, гибкости настройки тонкости помола и возможности автоматизации, БШМ остаются востребованными в промышленности.

Поскольку эффективность работы мельниц напрямую зависит от конфигурации внутренних устройств (футеровок, перегородок, классификаторов), актуальной задачей является поиск оптимальных сочетаний этих элементов для снижения энергозатрат и износа оборудования. Это соответствует государственной стратегии энергосбережения. Перспективным вектором модернизации БШМ выступает внедрение технологий цифрового проектирования и создание «цифровых двойников», что позволяет существенно

сократить издержки на разработку и вывести проектирование оборудования на качественно новый уровень.

Наиболее эффективным методом является обоснование оценки режимов работы мелющей среды в барабанных мельницах с использованием цифровых двойников для анализа влияния геометрии футеровки.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что улучшение процесса измельчения и модернизации БШМ достигаются технологиями цифрового проектирования, позволяют выполнять разработку цифровых двойников трубных шаровых мельниц.

Новизна исследования, полученных выводов, сформулированных в диссертации. Получены адекватные математические модели, описывающие кинематические, динамические и энергетические режимы работы мелющих тел с учётом параметров футеровки в поперечном и продольном сечении барабана мельницы, размера и массы мелющих тел, при которых достигается максимальная эффективность процесса измельчения.

Разработан метод цифрового моделирования футеровки на основе цифровых двойников с использованием CAD/CAM/CAE-систем, позволяющий получить детализированный профиль футеровки и схем её установки на рабочей поверхности барабана мельницы.

Установлен метод 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.

Получены результаты исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки и установлено влияния варьируемых параметров на траектории движения и скоростные параметры мелющих тел, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки.

Получены цифровые двойники барабанных шаровых мельниц с многовариантным исполнением профиля футеровки, применяемые для

проведения цифрового моделирования и обладающие высокой степенью адекватности, зарегистрированные как программный продукт для ЭВМ.

Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов. Сформулированы математические зависимости, связывающие энергетические и кинематические характеристики мелющих тел с геометрией профиля футеровки барабанной мельницы.

Предложен метод численного моделирования, позволяющий комплексно оценивать работу мелющей загрузки при различных конфигурациях футеровки. Данный подход даёт возможность прогнозировать энергопотребление привода, динамику износа футеровочных плит и общую эффективность процесса измельчения.

Проведена верификация теоретических положений путём сопоставления с экспериментальными данными. Доказана адекватность разработанных цифровых моделей и подтверждена практическая значимость предложенного метода для условий промышленного производства.

Осуществлена производственная проверка результатов исследования на базе АО «Спасскцемент» при эксплуатации трубных шаровых мельниц для помола клинкера.

Обеспечено внедрение результатов работы в учебный процесс кафедры «Механическое оборудование» БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке обучающихся по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов» и 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

Актуальным для промышленного (практического) использования являются:

- математический аппарат для определения кинематических и энергетических характеристик мелющей среды, учитывающий геометрию футеровочных элементов, а также габариты и массу мелющих тел;
- методика анализа рабочих режимов шаровой мельницы с использованием цифрового моделирования, адаптированная для различных конфигураций футеровки (в продольном и поперечном сечениях). Метод

позволяет прогнозировать траектории и скорости движения тел, энергопотребление привода, а также динамику износа футеровки;

- комплекс данных, полученных путём численного моделирования и натурных испытаний, описывающий взаимосвязь между конструктивными параметрами лабораторной мельницы и показателями эффективности: мощностью привода, гранулометрическим составом продукта (остатком на сите) и удельными энергозатратами;

- методика (алгоритм) проектирования футеровочных плит для барабанных мельниц, базирующаяся на инструментах цифрового моделирования.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Потенциальными потребителями проведенных исследований являются предприятия на территории, России, Казахстана, Белоруссии и других стран, использующие барабанные мельницы, где согласно предложенным в диссертации подходам возможно усовершенствовать конструкцию футеровок шаровых мельниц, обеспечивая стабильный режим измельчения и точное прогнозирование износа оборудования. Помимо промышленного внедрения, данные разработки могут быть интегрированы в учебные программы высшей школы для подготовки квалифицированных кадров на всех ступенях обучения.

Целесообразно в дальнейшем продолжить исследования для:

- оптимизации процесса помола путём обоснования рациональных параметров футеровки промышленных мельниц, направленной на повышение энергоэффективности производства;

- повышения эффективности измельчительного оборудования за счёт подбора оптимальной конфигурации футеровки, обеспечивающей минимизацию удельных энергозатрат;

- совершенствования технологии измельчения материалов посредством выбора рациональных характеристик футеровки, способствующих снижению энергоёмкости процесса.

Замечания:

1. Так как работа посвящена, по сути, созданию цифрового двойника барабанной шаровой мельницы рационально было бы включить в первый раздел критический анализ подобных работ.

2. На некоторых рисунках, например, рис. 1.1., рис. 4.2 и др. размер символов позиций значительно превышает размеры текста, что несколько снижает качество оформления результатов работы. При этом отсутствуют промежутки между названиями рисунков и основным текстом.

3. Кое где по тексту ω – угловая скорость вращения называется частотой вращения, когда последняя обозначается символом n .

4. Некоторые рисунки (например, рис. 2.4, рис. 3.4, рис. 3.5) имеют сильно мелкие элементы, что затрудняет их понимание.

5. На рис. 3.24, рис. 3.41, рис. 3.42 и им подобных показана цветовая шкала, но непонятно, что она обозначает, возможно также из-за малости символов.

6. Графики на рис. 3.35, рис. 3.36, рис. 3.37, рис. 3.38, рис. 3.39 также имеют очень мелкие цифровые показатели, не позволяющие выполнить их оценку в полной мере.

7. Таблица 5.1 не вмещается на одной странице, однако на следующей странице отсутствует подзаголовок «продолжение» данной таблицы.

Сделанные замечания касаются преимущественно оформления работы и не снижают её научную и практическую значимость.

Заключение: диссертация Сычёва Евгения Андреевича на тему «Цифровое моделирование рационального поперечного и продольного профиля футеровки с учётом режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы», представленная на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 – «Машины, агрегаты и технологические процессы» является завершённой научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-прикладная задача разработки метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового

моделирования, соответствует паспорту специальности, в частности, требованиям п.1 «Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов; п.6 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса»; п.8 «Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации».

Диссертация полностью соответствует п.9 – п.14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям и содержанию паспорта специальности 2.5.21, а её автор, Сычёв Евгений Андреевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 – «Машины, агрегаты и технологические процессы».

Отзыв обсуждён и одобрен на открытом заседании кафедры «Технология и организация машиностроительного производства» ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» 31 августа 2026 г. протокол № 1.

Доктор технических наук по специальности
05.02.13 – «Машины, агрегаты, процессы (по отраслям)»,
профессор, ректор ФГБОУ ВО «ДонГТУ»,
профессор кафедры «Машины
металлургического комплекса»
тел.: +7 (85742) 2-60-43
E-mail: rector@dontu.ru



Вишневский Дмитрий Александрович

На автоматизированную обработку данных в диссертационном совете
24.2.276.03 даю согласие



Вишневский Дмитрий Александрович

Подпись Вишневого Д.А. удостоверяю.
ведущий специалист по кадрам ОКиД



О.И. Лемешко

Кандидат технических наук по специальности
05.05.08 – «Машины и агрегаты металлургического производства»,
доцент, доцент кафедры «Технология и организация
машиностроительного производства»
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
тел.: +7 (85742) 2-59-30
E-mail: ktomp@dontu.ru

Левченко Оксана Александровна

На автоматизированную обработку данных в диссертационном совете
24.2.276.03 даю согласие

Левченко Оксана Александровна

Подпись Левченко О.А. удостоверяю
ведущий специалист по кадрам ОКиД



О.И. Лемешко

Сведения об организации:
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донбасский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ДонГТУ»),
294204, РФ, г. Алчевск, пр-т. Ленина, д. 16,
тел. +7 (85742) 2-60-43, +7 (85742) 2-68-87
e-mail: info@dontu.ru
<https://www.dontu.ru>