

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента **Ибрагимова Руслана Абдирашитовича** на диссертационную работу **Прокопенко Владислава Станиславовича** на тему: «**Совершенствование технологического процесса классификации цемента с применением аэродинамического комплекса**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия

Актуальность

Актуальность работы связана с необходимостью повышения производительности производства цемента при снижении энергозатрат, что возможно за счет оптимизации технологического процесса помола и классификации цемента, как самого высоко энергозатратного технологического этапа. В связи с этим разработана аэродинамическая установка с применением концентратора для тонкой классификации и рециркуляции пылевоздушного потока, обеспечивающего повышение эффективности технологического процесса классификации цемента в замкнутом цикле – является актуальной задачей, решению которой посвящена диссертационная работа. Разработанное научно-техническое решение позволит снизить циркуляционную нагрузку на мельницу, повысит производительность и обеспечит сохранение удельной поверхности цемента без ущерба для качества готового цемента.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 196 страницах машинописного текста, включающего 16 таблиц, 70 рисунка, список литературы из 164 источников, 5 приложений.

В главе 1 приводится анализ состояния вопроса в области технологий классификации дисперсных материалов в цементной промышленности. Соискателем рассмотрены существующие технологические процессы и оборудование для разделения цемента, проведен анализ российского рынка оборудования для классификации. Представлен анализ за период 1989–2025 гг. результатов деятельности отечественных научных исследовательских школ, продемонстрировавший эволюцию в области классификации как дисперсных материалов в целом, так и цемента – как базового вяжущего, в частности. Рассмотрены существующие методики расчета процессов классификации. Это позволило определить целесообразность использования рассматриваемого оборудования и наметить общий план исследований.

В главе 2 рассмотрено оборудование, методы исследования и характеристика применяемых материалов. Представлена эволюция конструкций инерционных пылеуловителей. Приведены характеристики сырьевого материала – цемента, полученного с завода-партнера. Описаны стандартные методики оценки физико-механических характеристик цемента, использованные в лабораторных условиях.

В главе 3 соискателем предложена обобщенная схема взаимосвязи состава как интегрального фактора с ключевыми этапами производства цемента, показано, что помол и классификация являются самым энергозатратным этапом. Проведен анализ статистических данных шести заводов-партнеров; показано, что в традиционных схемах помола в составе крупки присутствует от 56 до 75 % материала, уже

соответствующего требованиям к готовому продукту по гранулометрическому составу. Разработана расчетная модель на основе теории вероятностей, описывающая трансформацию гранулометрического состава при многократной рециркуляции через систему аппаратов. Предложена система уравнений для расчета дисперсного состава готового продукта через дисперсный состав исходного материала с учетом рециркуляции.

В главе 4 соискателем осуществлена разработка аэродинамического комплекса для классификации цемента. Приведена лабораторная установка, включающая центробежный сепаратор, концентратор, осадительные циклоны, зернистый фильтр, центробежный вентилятор и рециркуляционный газодоступ. Представлено матричное моделирование процесса осаждения цемента: для каждого аппарата (сепаратор, концентратор, циклон) построены матрицы фракционных пропусков на основе теоретических и экспериментальных зависимостей. Предложен расчет гидравлического сопротивления каскада аппаратов на основе волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях, введены понятия проводимости и акустического сопротивления.

В главе 5 соискателем предложена схема модернизации, предусматривающая установку инерционного концентратора между выходным патрубком сепаратора и входом в циклон, что позволяет перейти от одноступенчатой к двухступенчатой классификации. Подробно изложено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанного аэродинамического комплекса в технологическую линию производства цемента.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и научная новизна

В научной новизне автором обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности классификации цемента на 83,72 % за счет внедрения аэродинамического комплекса с установленными режимами работы аппаратов «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией, обеспечивающего снижение негативного влияния ортокинетического эффекта, в результате чего происходит снижение на ~47 % содержания в крупке готового продукта, отправляемого на домол, исключение переизмельчения цемента, снижение циркуляционной нагрузки на мельницу и повышение выхода готовой продукции на 18–25%.

Разработана математическая модель процесса классификации цемента, основанная на матричном описании фракционных пропусков и теории распространения волн в пылевоздушных сетях, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав готового продукта и гидравлическое сопротивление в аэродинамическом комплексе.

Установлены закономерности влияния режимных параметров аппаратов аэродинамического комплекса – частоты вращения ротора сепаратора, угла наклона лопастей концентратора, ширины камеры рабочей зоны концентратора, расхода сепарационного воздуха – на эффективность классификации и обеспечение заданной

удельной поверхности цемента, позволяющие оптимизировать работу комплекса в целом. Определено оптимальное значение кратности рециркуляции цемента (2–3) в аэродинамическом комплексе; её дальнейшее увеличение не обеспечивает значимого улучшения гранулометрического состава.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием научно обоснованных и нормируемых методик, применением современного поверенного оборудования, проведением многофакторного эксперимента с использованием планирования ЦКРП 2⁴ и статистической обработкой результатов. Все результаты подкреплены существенным объемом теоретических и экспериментальных исследований. Полученные данные имеют высокую воспроизводимость и сходимость и не противоречат общепринятым научным фактам и результатам других авторских коллективов.

Автореферат диссертации полностью согласуется с текстом диссертации, отражает основное содержание работы, положения, выносимые на защиту, обоснование актуальности и значимости работы, цели и задачи исследования.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

В исследовании были расширены теоретические представления о процессах классификации тонкодисперсных материалов в замкнутом цикле при производстве высокодисперсного продукта. Установлены закономерности влияния ортокинетического эффекта на унос цемента в крупку на повторный помол при разделении в заводских условиях.

Предложена система уравнений для расчета дисперсного состава цемента через дисперсный состав материала, поступающего в аэродинамический комплекс из мельницы.

В ходе исследования было предложено применение волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях для расчёта гидравлического сопротивления аэродинамического комплекса в контексте моделирования систем классификации цементной промышленности, для чего введены понятия проводимости и акустического сопротивления, позволяющие описывать элементы пылевоздушной сети, как компоненты волновой системы. Это позволяет учитывать динамические эффекты (отражение и прохождение возмущений давления на границах аппаратов) и повышает точность оценки энергопотерь по сравнению со статическими методами.

Был предложен аэродинамический комплекс «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией продукта, получаемого в процессе помола, эффективность которого на ~18 % превышает существующее решение «сепаратор + циклон».

Предложены настройки аэродинамического комплекса, обеспечивающие эффективность его работы при получении цемента с заданной удельной поверхностью. Для $S_{уд} \sim 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$: расход сепарационного воздуха – $Q=460 \text{ м}^3/\text{ч}$, частота вращения ротора сепаратора – $n_p=800 \text{ об/мин}$, угол наклона лопастей концентратора – $\alpha_n=40^\circ$, ширина камеры рабочей зоны концентратора – $a=0,36 \text{ м}$; для $S_{уд} \sim 400\text{--}450$

м²/кг при прочих равных условиях $Q=380$ м³/ч и $n_p=1200$ об/мин; для $S_{уд} \sim 550$ м²/кг – при $Q=460$ м³/ч $n_p=1200$ об/мин.

Основные положения работы изложены в 15 публикациях, в том числе: 6 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus; 2 патента на изобретение.

Замечания и рекомендации по диссертации и автореферату

1. Для анализа в работе использованы данные шести заводов, выпускающих разные типы портландцемента. Почему для отладки и лабораторных испытаний выбран именно шлакопортландцемент?

2. В работе принято деление на указанные интервалы (0–5, 5–30, 30–80, >80 мкм), однако в цементной технологии и нормативной практике (ГОСТ, EN) чаще используют сита 45 и 90 мкм. Требуется пояснение, чем обусловлен именно такой выбор интервалов.

3. В работе не приведены количественные данные снижения энергозатрат (кВт) на помол портландцемента, используя разработанный аэродинамический комплекс.

4. Согласно описанию технологической схемы (рис. 3.1) значительный объем материала уходит в крупку и возвращается на повторный помол в ту же мельницу, куда подается исходный клинкер. Не рассматривался ли альтернативный вариант – установки отдельной второй мельницы исключительно для домола крупки, выходящей из сепаратора? Не является ли такой подход более эффективным для увеличения общей производительности и снижения удельных энергозатрат?

5. На рис. 4.16 диссертации приведена зависимость влияния частоты вращения ротора сепаратора на качества конечного продукта, измеряемое удельной поверхностью, однако желательно было бы провести оптимизацию удельной поверхности не от расхода воздуха, а от приведённых энергозатрат (кВт).

6. На рис. 3.1 представлена обобщенная схема производства цемента, где предлагается внедрение аэродинамического комплекса на 3-этапе помола цемента. Рассматривалась ли возможность и технологическая целесообразность применения разработанного комплекса на 1-м этапе производства, связанном с измельчением сырьевых компонентов?

Высказанные замечания и возникшие вопросы не влияют на общую положительную оценку диссертации, отдельные вопросы носят характер рекомендаций.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Прокопенко Владислава Станиславовича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится научно обоснованное технологическое решение, имеющее существенное значение для цементной промышленности. Выводы и технические рекомендации аргументированы, обладают научной новизной, а полученные результаты свидетельствуют о

сложности и многоаспектности работы. Диссертация написана грамотным техническим языком, графический материал выполнен на высоком уровне.

Исходя из актуальности рассматриваемой тематики, научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, считаю, что диссертационная работа на тему «Совершенствование технологического процесса классификации цемента с применением аэродинамического комплекса» полностью соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции с дополнениями и изменениями), предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Прокопенко Владислав Станиславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Официальный оппонент:

доктор технических наук
(специальность 2.1.5 Строительные материалы и изделия), доцент, заведующий кафедрой
«Технологии строительного производства»
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»



Собственноручную подпись
<i>Ибрагимов Р. А.</i>
удостоверяю
Начальник Отдела кадров
<i>Ибрагимов Р. А.</i>
«20» августа 2026 г.

**Ибрагимов
Руслан Абдирашитович**

«20» августа 2026 г.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)»

Адрес университета: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Тел.: +7 (843) 510-47-31

E-mail: rusmag007@yandex.ru