

На правах рукописи



ПРОКОПЕНКО ВЛАДИСЛАВ СТАНИСЛАВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**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: член-корр. РААСН,
доктор технических наук, профессор
Строкова Валерия Валерьевна

Официальные оппоненты: **Ибрагимов Руслан Абдирашитович**,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет
(КГАСУ)», заведующий кафедрой
«Технологии строительного производства»

Лахтарина Сергей Викторович,
кандидат технических наук, доцент
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры» – филиал
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», заведующий кафедрой
«Технологии строительных конструкций, изде-
лий и материалов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)»

Защита состоится «13» октября 2026 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Prokopenko

Автореферат разослан «8» июля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Основным вяжущим материалом в строительстве является цемент, спрос на который в РФ составил в 2025 году около 61 млн тонн. Решение ключевых задач производства цемента, осуществляемое в рамках Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года, а также национального проекта «Жильё и городская среда», формирует гарантированный рынок сбыта для отечественного цемента, что особенно актуально в рамках реализации технологического суверенитета РФ. Кроме того, приоритетной государственной задачей является снижение энергозатрат на производство цемента, ведущее к сокращению выбросов CO_2 , наряду с ужесточением экологических норм, в частности снижением ПДК пыли до 25 мг/м^3 для новых линий и 50 мг/м^3 – для линий, введенных в эксплуатацию после 2008 г. Данные требования обуславливают необходимость модернизации действующих цементных заводов для соблюдения нормативов без снижения объемов выпуска готовой продукции. В условиях необходимости повышения производительности при снижении энергозатрат актуальными становятся оптимизация технологического процесса помола и классификации цемента, как самого высокоэнергозатратного технологического этапа.

В связи с этим разработка аэродинамического комплекса (АК) с применением концентратора для тонкой классификации и рециркуляции пылевоздушного потока, обеспечивающего повышение эффективности технологического процесса классификации цемента в замкнутом цикле – является актуальной задачей. Разработанное научно-техническое решение позволит снизить циркуляционную нагрузку на мельницу и повысить производительность цемента.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гос. заданий Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 и № FZWN-2026-0006.

Степень разработанности темы. Анализ отечественных и зарубежных исследований в области технологий классификации дисперсных материалов в промышленности строительных материалов и цементной промышленности, в частности, свидетельствует о накопленном опыте разработки сепарационного и классификационного оборудования. Доказано, что производство цемента при помоле в замкнутом цикле является наиболее эффективным способом по сравнению с открытым циклом, поскольку позволяет контролировать гранулометрический состав материала и получать более высокомарочные цементы. Отечественными и зарубежными учеными разработаны и изучены различные конструкции классифицирующего оборудования, в том числе воздушно-динамических сепараторов, исследованы их конструктивно-технологические параметры. Однако вопросы, связанные с ортокинетическим эффектом в сепараторе и его влияния на возврат готового продукта в крупку при производстве цемента изучены недостаточно. Отсутствуют комплексные исследования по совершенствованию технологических процессов классификации цемента с применением аэродинамического комплекса «сепаратор + концентратор + циклон», что обуславливает актуальность данной работы.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего повышение технико-экономической эффективности классификации цемента посредством применения аэродинамического комплекса.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- анализ современного состояния технологий и оборудования для классификации в производстве цемента, выявление ключевых проблем и перспектив развития;
- изучение кинетики технологического процесса классификации цемента и влияния ортокинетического эффекта на гранулометрический состав продуктов;
- разработка математической модели процесса классификации цемента в аэродинамическом комплексе на основе матричного подхода и теории волн;
- создание лабораторной установки аэродинамического комплекса и проведение многофакторного эксперимента для оптимизации режимных параметров;
- технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанного комплекса в технологическую линию производства цемента.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности классификации цемента 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.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены 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.

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

Обоснована целесообразность применения 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 компонентов 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.

Разработан 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 $S_{\text{в}} \sim 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$: расход сепарационного воздуха – $Q=460 \text{ м}^3/\text{ч}$, частота вращения ротора сепаратора – $n_p=800 \text{ об/мин}$, угол наклона лопастей концентратора – $\alpha_{\text{л}}=40^\circ$, ширина камеры рабочей зоны концентратора – $a=0,36 \text{ м}$; для $S_{\text{в}} \sim 400\text{--}450 \text{ м}^2/\text{кг}$ при прочих равных условиях $Q=380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p=1200 \text{ об/мин}$; для $S_{\text{в}} \sim 550 \text{ м}^2/\text{кг}$ – при $Q=460 \text{ м}^3/\text{ч}$ $n_p=1200 \text{ об/мин}$.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы является комплексный подход при исследовании аэродинамического комплекса с рециркуляцией с целью определения рациональных параметров для сепаратора и концентратора. Идея базируется на известном ортокINETическом эффекте, когда крупные частицы могут являться центром притяжения более мелких и утягивать их за собой, где мелкие частицы являются готовым продуктом. Оценка материала осуществлялась с использованием общепринятых в строительном материаловедении физико-механических методов анализа с использованием нормируемых и научно признанных методик. Гранулометрический состав цемента определялся по методике ГОСТ 310.2-76 «Цементы. Методы определения тонкости помола». Теоретическая часть исследования базируется на матричном описании фракционных пропусков и теории распространения волн в пылевоздушных сетях для расчёта гидравлического сопротивления комплекса.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретически обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности классификации цемента за счет внедрения аэродинамического комплекса с установленными режимами работы аппаратов;
- математическая модель процесса классификации, основанная на матричном подходе и теории волн, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав и гидравлическое сопротивление аэродинамического комплекса;
- закономерности влияния ортокINETического эффекта на унос цемента в крупку при разделении в сепараторе на повторный помол;
- эффективность применения волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях для расчёта гидравлического сопротивления аэродинамического комплекса в контексте моделирования систем классификации для цементной промышленности;
- закономерности влияния режимных параметров аппаратов аэродинамического комплекса на эффективность классификации и обеспечение заданной

удельной поверхности цемента;

– оценка эффективности внедрения разработанного аэродинамического комплекса. Результаты лабораторных испытаний опытной установки аэродинамического комплекса.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена комплексом экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методик и поверенного оборудования; проведением испытаний на лабораторной установке; получением результатов, не противоречащих общепризнанным научным фактам и результатам других научных коллективов.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах, среди которых: Инновации и цифровизация в строительном материаловедении (Новосибирск, 2025); Актуальные проблемы и решения внедрения инновационного, ресурсосберегающего оборудования и технологий, а также охраны окружающей среды на промышленных предприятиях (Фергана, Узбекистан, 2025); Современные проблемы материаловедения (Липецк, 2025); Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях (Белгород, 2020); Энерго-, ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях (Белгород, 2018); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment (Томск, 2018); Конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 2013).

Внедрение результатов исследований. С целью внедрения результатов исследований разработан стандарт организации СТО 02066339-093-2025 «Сепарация цемента с применением аэродинамического комплекса. Технологический процесс». Подписаны протоколы о намерениях по внедрению разработанного технологического решения с ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»».

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 «Строительство», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 18.03.01 «Химическая технология»; магистров – 08.04.01 «Строительство», 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Публикации. 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.

Личный вклад. Проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего повышение производительности цемента за счет умещения ортокинетического эффекта в сепараторе при использовании аэродинамического комплекса. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, последующая статистическая

обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в проведении лабораторных испытаний и подготовке публикаций результатов работы.

Структура и объем 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ¹

Актуальность исследований в области технологий классификации дисперсных материалов в цементной промышленности обусловлена комплексом вызовов, стоящих перед отраслью: растущими требованиями к энергоэффективности и экологической безопасности, необходимостью импортозамещения оборудования, а также потребностью в повышении качества продукции в условиях сокращения внутреннего спроса. Ключевую роль в решении этих задач играют процессы классификации, определяющие гранулометрический состав цемента и, как следствие, его эксплуатационные свойства.

На основе анализа технологических процессов производства цемента (рис. 1) предложена обобщённая схема, иллюстрирующая роль состава – как интегрального фактора, определяющего качество цемента, рассматриваемого как конечный продукт и являющегося самостоятельным видом строительных материалов. Данная схема отражает взаимосвязь трёх основных составляющих интегрального фактора «состав» – химического, минерального и гранулометрического состава сырья, промежуточных продуктов (клинкера) и готового продукта (цемента) – с ключевыми этапами производства цемента и основными технологическими параметрами, влияющими на свойства готового продукта. При этом сравнительная оценка энергопотребления выделенных этапов производства показывает, что самым энергозатратным является процесс помола и классификации цемента, на который приходится более 40 %. В связи с этим в рамках настоящей работы рассмотрено совершенствование процессов воздушной классификации цемента с целью оптимизации процесса тонкого измельчения, снижения энергозатрат и повышения производительности.

Анализ причин, приводящих к неэффективному разделению дисперсного вещества в существующей технологической системе «сепаратор + циклон», показал, что помимо возможной неточной регулировки оборудования (в части сепаратора), основной причиной поступления высокодисперсного вещества в составе крупки на домол является ортокинетический эффект. Данный эффект (рис. 2) заключается в том, что крупные частицы становятся центром притяжения и утягивают за собой частицы более мелкого размера, уже являющиеся готовым продуктом.

¹ Соответствие паспорту специальности 2.1.5, в части: **п. 2.** Разработка математических моделей физико-механических, физико-химических, биологических, гидромеханических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры, режимы изготовления и свойства строительных материалов и изделий; **п. 7.** Развитие, совершенствование и разработка новых энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов и оборудования для получения строительных материалов и изделий различного назначения

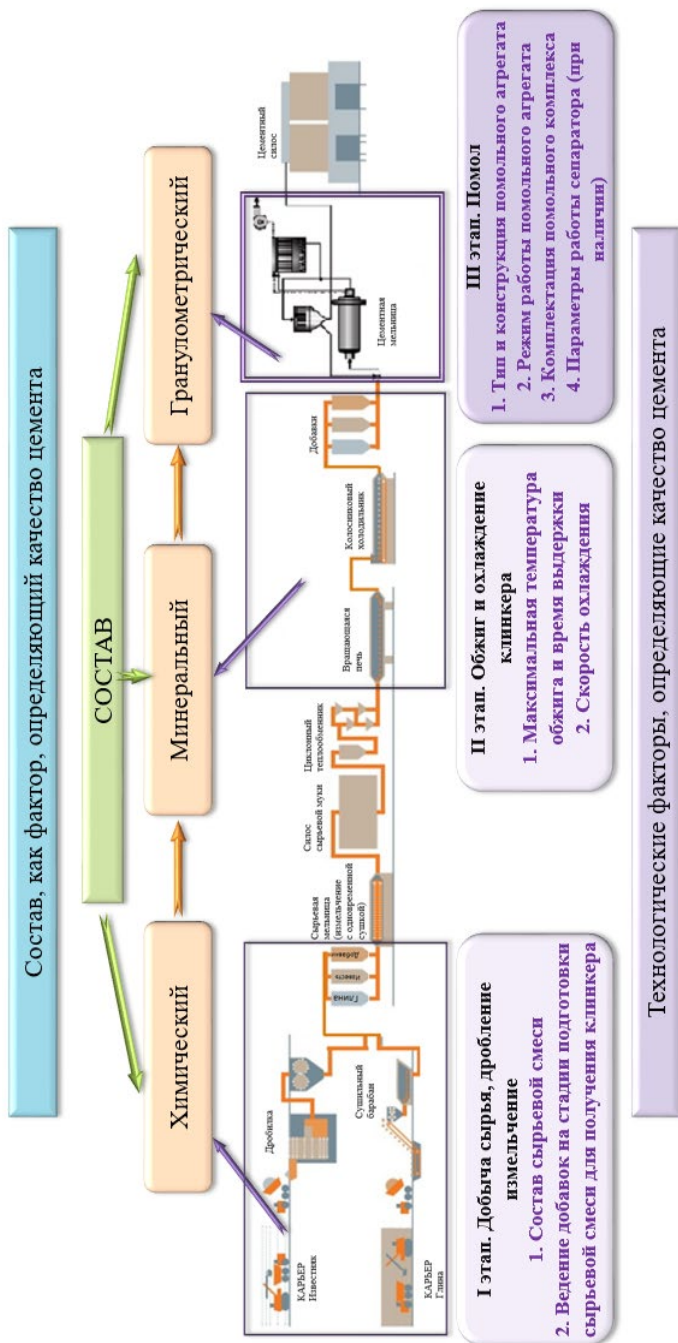


Рис. 1. Обобщённая схема взаимосвязи состава, как интегрального фактора, с ключевыми этапами производства цемента, влияющими на свойства готового продукта (* – оценка энергопотребления по данным компании Christian Pfeiffer)

Рабочей гипотезой данного исследования явилось предположение о том, что снижение влияния ортокинетического эффекта и, как следствие, повышение производительности процесса классификации цемента можно достичь за счёт модернизации традиционной сепарационной системы, состоящей из динамического сепаратора и циклона, путём интеграции в неё концентратора с замкнутой рециркуляцией мелкодисперсной фракции. Предполагается, что такая компоновка оборудования в АК позволит реализовать двухступенчатую классификацию: на первой стадии – грубое разделение в основном сепараторе, на второй – тонкая доочистка и концентрация целевой фракции (5–45 мкм) в концентраторе с возвратом недостаточно измельчённых частиц в зону помола. Введение концентратора позволит существенно снизить влияние ортокинетического эффекта в основном сепараторе, повысить селективность классификации, увеличить выход целевой тонкой фракции, уменьшить переизмельчение материала и, как следствие, снизить удельные энергозатраты на помол. При этом необходимо отметить, что введение данного АК не повлечет изменение в химическом или минеральном составе цемента, а будет способствовать повышению выхода его количества, что повысит производительность и снизит энергозатраты производства.

Для подтверждения рабочей гипотезы в части вклада ортокинетического эффекта, анализу подвергались статистические данные, полученные с заводоупартнеров, которые кодировано обозначены как *В, О, П, Р, С, К*. Каждый завод предоставил данные по: материалу, который выходит из мельницы и подается в сепаратор; готовому продукту, полученному после сепаратора; крупке, которая выходит из сепаратора и отправляется на повторный помол. При этом анализ производился по распределению частиц по размерам (фракции 0–5; 5–30; 30–80 мкм (готовый продукт); >80 мкм (крупка)) на основании данных лазерной гранулометрии.

Сравнительный анализ (рис. 3) качества классификации материала в сепараторе показал, что на заводах *В* и *С* от подаваемого материала в сепаратор 68–69 % переходит в готовый продукт и только 31–32 % – в крупку. Тогда как на заводе *О, Р, П* и *К* почти половина материала – от 40 % до 49,6 %, возвращается в виде крупки.

Анализ полученных результатов показал идентичный характер распределения частиц по различным видам продуктов. Так в материале, подаваемом в сепаратор и представляющем собой смесь, полученную после измельчения в мельнице, преобладают частицы среднего размера от 5 до 80 мкм. Наибольшую долю составляет фракция 30–80 мкм – 40,12 %, 41,46 %, 36,49 %, 33,65 % (для заводов *В, О, П, К* соответственно); исключение составляет материал с заводов *Р* и *С*, где количество фракций 30–80 мкм и 5–30 мкм практически одинаково (~34–36 %). Фракция 5–30 мкм составляет 28,03 %, 33,81 %, 31,15



Рис. 2. Ортокинетический эффект

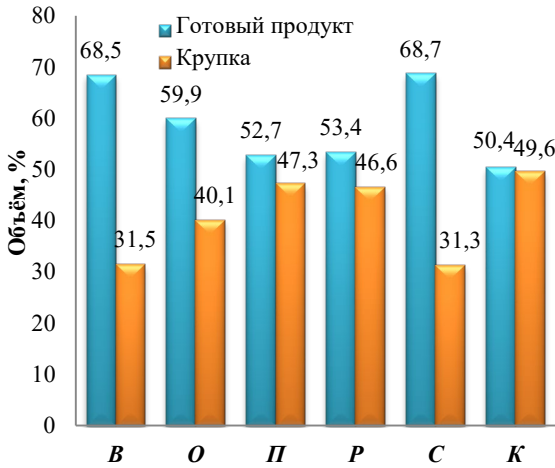


Рис. 3. Эффективность классификации материала сепаратором на заводах *В, О, П, Р, С, К*

крупку на повторный помол, хотя частицы данного размера уже являются готовым продуктом, что от общего объема материала, поступающего после мельницы в сепаратор, составляет порядка 17–36 %.

Таблица 1. Обобщённые данные по содержанию фракции 0–80 мкм в цементах различных производителей

Завод	Обозначение цемента	Содержание фракции 0–80 мкм в различных продуктах, %		
		в материале, подаваемом в сепаратор	в готовом продукте	в крупке
<i>В</i>	ЦЕМ I 42,5Н	86,36	99,84	56,73
<i>О</i>		87,52	99,22	70,07
<i>П</i>		86,33	99,99	75,32
<i>Р</i>	ЦЕМ I 52,5Н	84,93	99,16	68,36
<i>С</i>	ЦЕМ II/В-III 42,5Н	86,14	99,92	66,23
<i>К</i>	ЦЕМ II/А-И 42,5Н	79,62	99,91	58,94
АК*	ЦЕМ II/В-III 42,5Н	86,14	99,98	18,96

*Результаты, полученные на разработанном аэродинамическом комплексе (АК), и проанализированные на стр. 15

классификации материала в сепараторе характеризуется значительной неравномерностью. Во всех случаях наблюдается возврат в систему помола в составе крупки от 56 до 75 % материала, уже соответствующего требованиям к готовому продукту по гранулометрическому составу. Это эквивалентно потере от 17 до 36 % объема потенциально готового цемента, подаваемого в сепаратор. Несмотря на то, что сепаратор в настоящее время является наиболее эффективным оборудованием для классификации в цементной промышленности, полученные результаты указывают на необходимость поиска путей

%, 34,02 %, 35,62 %, 28,63 % (*В, О, П, Р, С, К*). Количество крупных (>80 мкм) и мелких частиц примерно одинаково: фракция >80 мкм – 13,64 %, 12,48 %, 13,67 %, 15,07 %, 13,86 %, 20,38 %; фракция 0–5 мкм – 18,21 %, 12,25 %, 18,69 %, 16,38 %, 16,24 %, 17,34 % (*В, О, П, Р, С, К* соответственно).

Анализ обобщённых данных, по содержанию фракции 0–80 мкм в различных видах продукта (табл. 1) показал, что 56–75 % вещества уходит в

Таким образом, на основе анализа данных, предоставленных с шести заводов, работающих в системе замкнутого цикла помола с применением сепаратора и выпускающих общестроительные цементы различных марок, а также принадлежащих по вещественному составу к различным типам, показано, что процесс

оптимизации процесса классификации.

Для повышения производительности и уменьшения энергозатрат производства цемента за счет доизвлечения из крупки готового продукта предложена схема АК с рециркуляцией для классификации продуктов (рис. 4). В данном АК по ходу движения сепарационного воздуха между центробежным сепаратором (1) и циклоном (3) был установлен инерционный концентратор (2), где происходит гравитационное и инерционное осаждение крупных частиц.

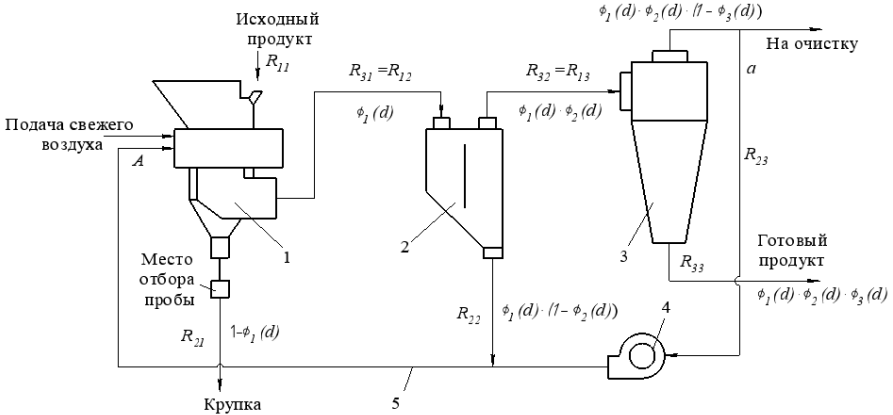


Рис. 4. Схема АК с рециркуляцией грубого продукта:

1 – сепаратор; 2 – концентратор; 3 – циклон; 4 – вентилятор; 5 – рециркуляционный газоход. Структура потоков продуктов различного гранулометрического состава: R_{11} – исходный продукт; R_{21} – продукт, выделенный в сепараторе, размером $d > 80$ мкм; $R_{31}=R_{12}$ – продукт, выделенный в сепараторе, $d < 80$ мкм; R_{22} – продукт, выделенный в концентраторе, $d > 40$ мкм; $R_{32}=R_{13}$ – продукт, выделенный в концентраторе, $d < 40$ мкм; R_{33} – готовый продукт, $d < 40$ мкм; R_{23} – воздушная смесь с материалом, которая не осела в циклоне

Для углубленного понимания и прогнозирования процесса классификации в замкнутом цикле была представлена расчетная модель, основанная на теории вероятностей и описывающая трансформацию гранулометрического состава материала при его многократной рециркуляции через систему аппаратов. Модель позволяет количественно оценить влияние кратности рециркуляции на конечный продукт.

Таким образом, для замкнутой системы аппаратов фракционный вынос вычисляется по следующей формуле:

$$(B_2)_n = \left[1 + \left(\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)) \right) \cdot a + \dots + \left(\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)) \right)^n \cdot a^n \right] \times \left(\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)) \right), \quad (1)$$

где $(B_2)_n$ – массовый поток грубого продукта, возвращаемого на рециркуляцию после n циклов, $\phi_1(d)$ – функция разделения для сепаратора, $\phi_2(d)$ –

функция разделения для концентратора, $\phi_3(d)$ – функция разделения для циклона, a – доля рециркуляции, n – число проходов, $1 - \phi_3(d)$ – доля частиц, не осаждаемых в циклоне и возвращаемых в сепаратор, $1 - \phi_2(d)$ – доля частиц, не проходящих в тонкий продукт концентратора, d – диаметр частиц.

Поскольку $a < 1$ и $\phi(d) < 1$, то при $n \rightarrow \infty$, будем иметь массовый поток грубого продукта, возвращаемый на рециркуляцию:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (B_2)_n = \frac{\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))}{1 - a \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))}. \quad (2)$$

Анализ трансформации грубого продукта по мере прохождения через аппараты комплекса (рис. 5) наглядно демонстрирует последовательное уменьшение среднего размера частиц в возврате, что свидетельствует о постепенной «доочистке» потока от готовой фракции.

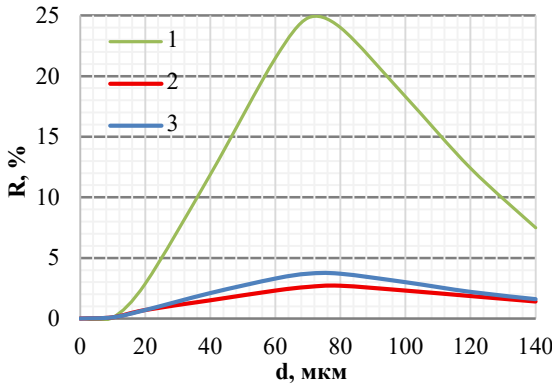


Рис. 5. Гранулометрический состав продукта, отправляемого:

на домол после сепаратора – функция 1 – $R_{21}(d)$;
в сепаратор после концентратора – функция 2 – $R_{22}(d)$ и циклона – функция 3 – $R_{23}(d)$

ный подход. Для каждого аппарата (сепаратор, концентратор, циклон) построены матрицы фракционных пропусков на основе теоретических и экспериментальных зависимостей. Показано, что использование матричного подхода позволяет не только количественно оценить влияние отдельных ступеней на состав продукта, но и прогнозировать гранулометрический состав готового материала с учётом рециркуляции. Моделирование показало, что многоступенчатая схема обеспечивает высокую степень улавливания, особенно для частиц с размером свыше 80 мкм.

$$f_i^r = \frac{Q_c}{Q_r} f_i^c [K_{ii}^{-1} C_{ii}^{-1} - C_{ii} - K_{ii}^{-1} (1 - C_{ii})]^{-1} (1 - C_{ii}). \quad (3)$$

где f_i^r – массовая доля i -й узкой фракции в готовом продукте, выходящем из циклона и направляемом на складирование или отгрузку, Q_c – массовый расход исходного материала, поступающего в сепаратор из мельницы, Q_r – массовый расход готового продукта, выделенного циклоном, f_i^c – массовая доля

Полученная формула (3) описывает прямую взаимосвязь между гранулометрическим составом исходного продукта (поступающего из мельницы), дисперсным составом конечного продукта (цемента) и функциями эффективности классификации, присущими каждому аппарату в технологической цепи. Для описания трансформации гранулометрического состава материала при прохождении через элементы АК адаптирован матрич-

i -й узкой фракции в исходном материале, подаваемом в сепаратор, C_{ii} – коэффициент прохода i -й фракции в тонкий продукт сепаратора, K_{ii} – коэффициент прохода i -й фракции в тонкий продукт концентратора, U_{ii} – коэффициент осаждения i -й фракции в циклоне, $(1 - K_{ii})$ – доля i -й фракции, которая возвращается из концентратора в сепаратор, $(1 - U_{ii})$ – доля i -й фракции, которая не осаждается в циклоне и уносится воздушным потоком в рециркуляционную линию.

Таким образом, открывается возможность для цифрового проектирования и оптимизации технологических режимов комплекса, без остановки производства, что является мощным инструментом для повышения эффективности классификации дисперсного вещества и стабильности качества выпускаемого цемента.

Для расчёта гидравлического сопротивления АК предложено применение волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях. Впервые в контексте моделирования систем классификации цементной промышленности введены понятия проводимости и акустического сопротивления, позволяющие описывать элементы пылевоздушной сети, как компоненты волновой системы. Это даёт возможность учитывать динамические эффекты – отражение и прохождение возмущений давления на границах аппаратов – и обеспечивает более точную оценку энергетических потерь по сравнению с традиционными статическими методами. Данная методика позволяет оптимизировать соединительные участки пылевоздушных каналов с целью минимизации аэродинамических потерь при разделении цемента.

Для подтверждения теоретических расчетов в качестве сырьевого материала для классификации в АК применялся продукт после мельницы, используемый при получении цемента ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н (ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»»).

На основании результатов натурных испытаний процессов классификации на АК продукта после помола, и обработки результатов экспериментов по ЦКРП 2^н (табл. 2) были получены уравнения регрессии в кодированной форме для: производительности воздушного центробежного сепаратора – Q_c , кг/ч (4), эффективности классификации – E , % (5) и удельной поверхности продукта – $S_{y\phi}$, м²/кг (6).

$$Q_c = 2298 + 28,2x_1 - 24,6x_2 + 2,7x_3 - 10,3x_1x_2 + 3,6x_1x_3 - 5,8x_1x_4 + 7,5x_2x_3 - 5,8x_2x_4 + 5,8x_3x_4 - 7,92x_1^2 + 2,52x_2^2 - 6,53x_3^2 + 0,48x_4^2. \quad (4)$$

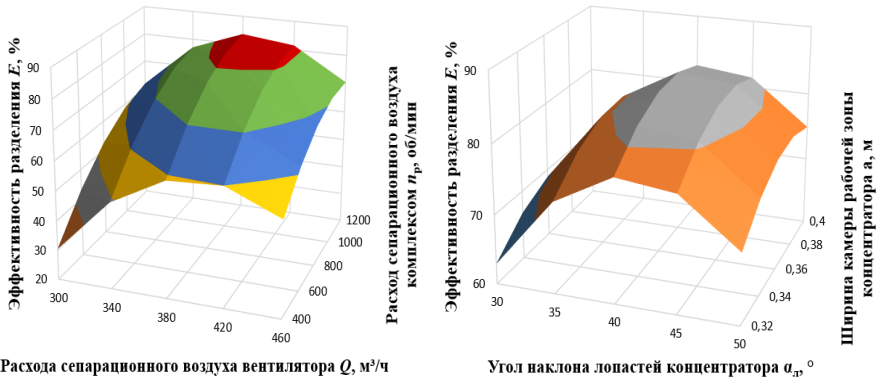
$$E = 77,8 + 3,83x_1 + 6,2x_2 + 1,8x_3 + 1,2x_4 - 0,8x_1x_2 - 0,52x_1x_3 - 4,4x_1^2 - 1,62x_2^2 - 2,8x_3^2 - 0,9x_4^2. \quad (5)$$

$$S_{y\phi} = 377 - 126,33x_1 + 159x_2 - 2,88x_3 + 61,8x_4 - 111,54x_1x_3 + 264,9x_1x_2 - 178,68x_1x_4 - 232,8x_2x_3 + 254,27x_2x_4 - 121,2x_3x_4 + 97,02x_1^2 + 70,68x_2^2 - 20,5x_3^2 - 29,2x_4^2 \quad (6)$$

Таблица 2 Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП 2⁴

Факторы	Кодированные обозначения	Интервал	$x=-2$	$x=-1$	$x=0$	$x=+1$	$x=+2$
Расход сепарационного воздуха, Q , м ³ /ч	x_1	40	300	340	380	420	460
Частота вращения ротора сепаратора, n_p , об/мин	x_2	200	400	600	800	1000	1200
Угол наклона лопастей концентратора, α_i , °	x_3	5	30	35	40	45	50
Ширина камеры рабочей зоны концентратора, a , м	x_4	0,02	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4

Установлены закономерности влияния режимных параметров аппаратов АК, определяющие эффективность классификации цемента от каждого фактора (рис. 6) при фиксированных уровнях остальных параметров: $Q=380$ м³/ч, $n_p=1200$ об/мин, $\alpha_i=40^\circ$, $a=0,36$ м.



При увеличении расхода сепарационного воздуха Q от 300 до 380 м³/ч наблюдается монотонный рост E от 61,66 % до 83,72 %, однако при дальнейшем увеличении Q свыше 380 м³/ч эффективность начинает снижаться, достигая 70,58 % при $Q=460$ м³/ч. Зависимость $E=f(n_p)$ демонстрирует монотонный рост с увеличением частоты вращения, но с замедлением темпов прироста при $n_p > 900$ об/мин. Зависимость $E=f(\alpha_i)$ демонстрирует нелинейную зависимость с выраженным максимумом при $\alpha_i=40^\circ$ ($E \approx 71,5\%$). При увеличении угла от 35° до 40° наблюдается монотонный рост E , а при увеличении угла свыше 40° – резкое снижение эффективности. Зависимость $E=f(a)$ демонстрирует нелинейную зависимость с максимумом при $a=0,38$ м ($E=84,02\%$). При увеличении ширины от (0,32 до 0,38 м) наблюдается рост E , а затем снижение.

В результате поверхность $E=f(Q, n_p)$ имеет чётко выраженный максимум, расположенный в области $Q=380$ м³/ч и $n_p=1200$ об/мин где максимальная эф-

фективность классификации $E=83,72\%$. Поверхность $E=f(\alpha_i, a)$ имеет локальный максимум при $\alpha_i=40^\circ$ и $a=0,38$ м, где $E=84,02\%$. Таким образом, установлено наличие оптимальных комбинаций параметров, обеспечивающих максимальную эффективность классификации.

Наиболее важным итогом является подтверждение сходимости результатов. Экспериментальная величина $E=83,72\%$ заняла прогнозируемое модельное положение между 73% и 99%, а выявленные оптимальные режимы и характер зависимостей качественно совпали с ожиданиями, заложенными в матричном описании физики процесса. Незначительные расхождения (порядка 15–20% для абсолютных величин) объяснимы переходом от идеализированной фракционной модели к реальному полидисперсному материалу с учётом побочных явлений.

В результате установлены рациональные значения конструктивно-режимных параметров процессов для эффективности классификации при получении цемента заданной удельной поверхностью (табл.

Таблица 3. Рациональные значения конструктивно-режимных параметров для получения цемента с заданной удельной поверхностью

S_{y0} , м ² /кг	Q , м ³ /ч	n_p , об/мин	α_i , °	a , м
350–400	460	800	40	0,36
400–450	380	1200	40	0,36
500–550	460	1200	40	0,36

3). Для технологий, где важна максимальная дисперсность конечного продукта – в частности, в производстве высокомарочного цемента – целесообразно использовать режим с максимальными значениями расхода сепарационного воздуха $Q=460$ м³/ч и частоты вращения ротора $n_p=1200$ об/мин. В этих условиях достигается выход цемента с наибольшей удельной поверхностью $S_{y0}=556,5$ м²/кг.

На основании результатов лабораторных испытаний аэродинамического комплекса установлено, что содержание фракции 0–80 мкм (см. табл. 1) в крупке, отправляемой на домол, снизилось на ~47 % и составило 18,96 %.

Сравнительный анализ дисперсности и активности цемента, полученного в результате классификации в заводских условиях и с использованием лабораторной установки, подтвердил, что внедрение аэродинамического комплекса позволяет повысить эффективность процесса разделения, т.е. количество готового продукта на выходе, с сохранением его свойств.

Таким образом, разработанный аэродинамический комплекс «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией позволяет повысить эффективность технологического процесса классификации цемента при заданной удельной поверхности готового продукта за счет: снижения негативного влияния ортокинетического эффекта; снижения на ~47 % содержания в крупке готового продукта, отправляемого на домол; исключения переизмельчения цемента; повышения производительности процесса классификации цемента на ~18–25 %; снижения циркуляционной нагрузки на мельницу на 20–30 %, которая достигается за счёт минимизации возврата готового продукта в крупку; и, как следствие, сокращения удельного энергопотребления на помол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены 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.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности классификации цемента ($E=83,72\%$) 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 $\sim 47\%$ содержания в крупке готового продукта, отправляемого на домол, исключение переизмельчения цемента, снижение циркуляционной нагрузки на мельницу и повышение выхода готовой продукции на $18\text{--}25\%$.

Предложена 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.

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

Обоснована целесообразность применения 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 компонентов 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.

Разработан аэродинамический комплекс «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией продукта, получаемого в процессе помола, эффективность которого на $\sim 18\%$ превышает существующее решение «сепаратор + циклон».

Предложены настройки аэродинамического комплекса, обеспечивающие эффективность его работы при получении цемента с заданной удельной поверхностью. Для $S_{\text{до}} \sim 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$: расход сепарационного воздуха – $Q=460$

$\text{м}^3/\text{ч}$, частота вращения ротора сепаратора – $n_p=800$ об/мин, угол наклона лопастей концентратора – $\alpha_{\text{л}}=40^\circ$, ширина камеры рабочей зоны концентратора – $a=0,36$ м; для $S_{\text{вс}} \sim 400\text{--}450$ $\text{м}^2/\text{кг}$ при прочих равных условиях $Q=380$ $\text{м}^3/\text{ч}$ и $n_p=1200$ об/мин; для $S_{\text{вс}} \sim 550$ $\text{м}^2/\text{кг}$ – при $Q=460$ $\text{м}^3/\text{ч}$ $n_p=1200$ об/мин.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в цементное производство, а также в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлениям: «Строительство», «Материаловедение и технологии материалов», «Химическая технология», «Технологические машины и оборудование».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении повышения эффективности процесса классификации и, как следствие, производительности технологий получения тонкодисперсных продуктов в промышленности строительных материалов (сухих строительных смесей, минеральных порошков, наполнителей, добавок, пигментов и т.д.) с использованием аэродинамического комплекса.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

1. **Прокопенко, В. С.** Анализ эффективности классификации цемента в системе замкнутого цикла помола с применением сепаратора / В.С. Прокопенко, В.В. Строкова, Е.А. Поспелова, Д.А. Мишин // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2026. – № 1(81/1). – С. 43-51. *K2, УБС 4*
2. **Прокопенко, В. С.** Развитие отечественных научных направлений в области разработки оборудования для разделения дисперсных материалов / В.С. Прокопенко, В.В. Строкова, Т.Н. Орехова // Строительные материалы. – 2026. – № 1-2. – С. 90-104. – DOI 10.31659/0585-430X-2026-843-1-2-90-104 *K1, УБС 2*
3. **Прокопенко, В. С.** Моделирование процесса разделения цемента в замкнутом аэродинамическом комплексе / В.С. Прокопенко, В.В. Строкова, Т.Н. Орехова // Строительные материалы. – 2025. – № 7. – С. 44-49. – DOI 10.31659/0585-430X-2025-837-7-44-49. – EDN FOAVFX. *K1, УБС 2*
4. **Теличенко, В. И.** Моделирование осаждения цемента в технологической системе замкнутого цикла с рециркуляцией / В.И. Теличенко, **В.С. Прокопенко**, Р.Р. Шарапов, И.П. Бойчук // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77, № 11. – С. 5-8. – EDN WXQYVX
5. **Шарапов, Р. Р.** Кинетика процесса разделения продукта в замкнутой системе с рециркуляцией / Р.Р. Шарапов, **В.С. Прокопенко**, А.М. Агарков, И.П. Бойчук // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77, № 8. – С. 47-51. – EDN WNAXMF
6. **Шарапов, Р. Р.** Моделирование процесса разделения тонкодисперсных материалов в динамических сепараторах / Р.Р. Шарапов, **В.С. Прокопенко**, А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 84-89. – EDN TOUWYP

В издании, индексируемом в базе данных Scopus

7. *Sharapov, R. R.* Determination of the Main Characteristics and Modeling of the

Classification Matrix of the Concentrator in a Closed Grinding Cycle / R. R. Sharapov, **V. S. Prokopenko** // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 160 LNCE. – P. 125-130. – DOI 10.1007/978-3-030-75182-1_17. – EDN YPHHLV (Q4)

В сборниках трудов конференций

8. **Прокопенко, В. С.** Способы классификации порошков воздушными классификаторами / В.С. Прокопенко // Актуальные проблемы и решения внедрения инновационного, ресурсосберегающего оборудования и технологий, а также охраны окружающей среды на промышленных предприятиях: Сборник материалов II Международной научной конференции, Часть I, Фергана. 18-19 апреля – 2025. – С. 7-8.

9. **Прокопенко, В. С.** Тенденция развития классификации тонкодисперсных порошков / В.С. Прокопенко // Современные проблемы материаловедения : Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции, Липецк, 27 февраля 2025 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2025. – С. 266-271. – EDN PYPZTY

10. **Прокопенко, В. С.** Методика определения основных характеристик и построения матрицы классификации сепаратора / В.С. Прокопенко, Т.Н. Орехова, Р.Р. Шарاپов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 15–17 октября 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 295-299. – EDN SNQOXQ

11. **Прокопенко, В. С.** Моделирование пропуска отдельных фракций пыли в циклоне и построение матрицы / В.С. Прокопенко, Т.Н. Орехова, Р.Р. Шарاپов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 15–17 октября 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 303-308. – EDN NEMIDN

12. **Прокопенко, В. С.** Моделирование и прогнозирование процесса разделения продукта в замкнутой системе с рециркуляцией / В.С. Прокопенко // Энерго-, ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях : Материалы Международной научно-практической конференции, Белгород, 20–21 сентября 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 167-173. – EDN SAYXUN

13. **Шарاپов, Р. Р.** Моделирование процесса сепарации цемента в аппаратах 3-го поколения / Р.Р. Шарاپов, **В.С. Прокопенко**, И.В. Багатырев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2013 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2013. – С. 1303-1306. – EDN SIZTJZ

Объекты интеллектуальной собственности

14. Пат. 2625841 Российская Федерация, МПК В07В 7/083. Способ разделения тонкодисперсных порошков / **В.С. Прокопенко**, Р.Р. Шарاپов, А.М. Агарков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2015155419.

Заявл. 23.12.2015. Оpubл. 19.07.2017. – Бюл. № 20. – 8 с.

15. Пат. 157341 Российская Федерация, МПК В01D 45/04. Инерционный пылеконцентратор / Р.Р. Шарапов, Ю.Г. Овсянников, И.П. Бойчук, А.М. Агарков, **В.С. Прокопенко**; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2014152565/05. Заявл. 24.12.2015. Оpubл. 27.11.2015. – Бюл. № 33. – 6 с.

Автор выражает глубокую признательность д.т.н., профессору Р.Р. Шарапову, за идею работы и помощь в период обучения в аспирантуре.

ПРОКОПЕНКО ВЛАДИСЛАВ СТАНИСЛАВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.07.2026 г.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 118

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