

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



ПРОКОПЕНКО ВЛАДИСЛАВ СТАНИСЛАВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
член-корр. РААСН,
доктор технических наук, профессор
Строкова В.В.**

Белгород 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ¹

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Технологические процессы и оборудование для классификации цемента.....	12
1.2 Анализ российского рынка оборудования для классификации дисперсных материалов, применяемого в технологии производства цемента.....	16
1.3 Развитие отечественных научных направлений в области разработки оборудования для классификации дисперсных материалов .	18
1.4 Методики расчета процессов классификации в сепараторах.....	29
1.5 Выводы.....	33
2 ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	35
2.1 Оборудование, используемое для создания аэродинамического комплекса	36
2.2 Математический аппарат, используемый для анализа процессов классификации и рециркуляции	43
2.3 Сырьевые материалы и методы исследования	46
2.4 Выводы.....	52
3 КИНЕТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ	54

¹ Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия, в части пункта:

2. Разработка математических моделей физико-механических, физико-химических, биологических, гидромеханических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры, режимы изготовления и свойства строительных материалов и изделий;

7. Развитие, совершенствование и разработка новых энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов и оборудования для получения строительных материалов и изделий различного назначения.

3.1 Теоретическое обоснование повышения эффективности процесса классификации цемента путем использования аэродинамического комплекса	54
3.2 Разработка дизайна исследования	63
3.3 Анализ гранулометрического состава цемента при разделении в сепараторе в заводских условиях	68
3.4 Расчет гранулометрического состава материала при прохождении через аэродинамический комплекс с рециркуляцией	78
3.5 Моделирование осаждения цемента в аэродинамическом комплексе замкнутого цикла	97
3.6 Выводы	102
4 РАЗРАБОТКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА	106
4.1 Лабораторная установка аэродинамического комплекса для классификации цемента и средства управления	107
4.2 Процессы классификации цемента в аэродинамическом комплексе с рециркуляцией	108
4.3 Матричное моделирование процесса осаждения цемента в технологической системе аэродинамического комплекса	110
4.3.1 Определение основных характеристик и матрицы классификации сепаратора	111
4.3.2 Определение основных характеристик и матрицы классификации концентратора	114
4.3.3 Определение матрицы коэффициентов пропуска отдельных фракций пыли циклоном	117
4.3.4 Определение дисперсности готового продукта через дисперсность исходного материала	123
4.4 Расчет сопротивления каскада аппаратов	125
4.5 План и результаты многофакторного эксперимента работы	133

аэродинамического комплекса при разделении цемента.....	
4.6 Выводы.....	142
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	
ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА	
В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО	
КОМПЛЕКСА	145
5.1 Модернизация технологической линии по производству цемента	145
5.2 Оценка эффективности классификации цемента	
в аэродинамическом комплексе.....	147
5.3 Экономическое обоснование эффективности технологических	
процессов, протекающих в разработанном аэродинамическом	
комплексе	152
5.4 Апробация результатов диссертационного исследований	154
5.5 Выводы.....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	181
Приложение А. Анализ развития отечественных научных направлений	
в области разработки оборудования для разделения дисперсных	
материалов по ретроспективе диссертационных исследований	182
Приложение Б. Протокол лабораторных испытаний	192
Приложение В. Титульный лист стандарта организации на сепарацию	
цемента с применением аэродинамического комплекса	194
Приложение Г. Протокол о намерениях.....	195
Приложение Д. Справка о внедрении результатов работы	
в учебный процесс	196

ВВЕДЕНИЕ

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 CO₂, наряду с ужесточением экологических норм, в частности снижением ПДК пыли до 20 мг/м³ для новых линий и 50 мг/м³ – 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 классификация цемента, как самого высокоэнергозатратного технологического этапа.

В связи с этим разработана аэродинамическая установка (АУ) с применением концентратора для тонкой классификации и рециркуляции пылевоздушного потока, обеспечивающего повышение эффективности технологии процесса классификации цемента в замкнутом цикле – является актуальной задачей. Разработанное научно-техническое решение позволит снизить циркуляционную нагрузку на мельницу, повысит производительность и обеспечит сохранение удельной поверхности цемента без ущерба для качества готового 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 в 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 высококачественные 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, при котором 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.

Предложенная конструкция аэродинамического комплекса «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой системой рециркуляции продукта, получаемого в замкнутом цикле помола, эффективность данного комплекса превосходит существующие системы классификации «сепаратор + цикло» приблизительно на 18 %.

Предложены настройки аэродинамического комплекса, которые позволяют эффективно проводить классификацию цемента с необходимой удельной поверхностью. Для $S_{y\sigma} \sim 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$: расход сепарационного воздуха – $Q=460 \text{ м}^3/\text{ч}$, частота вращения ротора сепаратора – $n_p=800 \text{ об/мин}$, угол наклона лопастей концентратора – $\alpha_{л}=40^\circ$, ширина камеры рабочей зоны концентратора – $a=0,36 \text{ м}$; для $S_{y\sigma} \sim 400\text{--}450 \text{ м}^2/\text{кг}$ при прочих равных условиях $Q=380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p=1200 \text{ об/мин}$; для $S_{y\sigma} \sim 550 \text{ м}^2/\text{кг}$ – 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 ортокинетическом 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 ортокинетического 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 16 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

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 критического 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.

В настоящей главе проводится анализ современного состояния технологических процессов и оборудования для классификации в производстве цемента. Рассматриваются преимущества и недостатки различных схем разделения, дается оценка российского рынка сепарирующего и аспирационного оборудования в условиях санкционного давления и курса на локализацию. Отдельное внимание уделяется ретроспективе отечественных научных исследований на основе анализа диссертационных работ за период 1989–2025 гг., что позволяет выявить эволюцию научных приоритетов и сформировавшиеся исследовательские школы. Целью данной главы является систематизация существующих знаний, выявление ключевых тенденций, проблем и перспектив развития отрасли для обоснования направлений дальнейших исследований и разработок в области создания энергоэффективного и высокоэффективного оборудования для получения цементов с заданными свойствами.

1.1 Технологические процессы и оборудование для разделения цемента

При производстве цемента основной технологический процесс классификации происходит после помола клинкера совместно с гипсом и активными минеральными добавками. Выбор схемы классификации определяется

типом помольного цикла, который может быть реализован в двух вариантах: открытом и замкнутом [1, 2].

Открытый цикл помола характеризуется отсутствием стадии классификации материала после выхода из мельницы. В данной схеме измельчённый продукт направляется непосредственно на упаковку или в силосы хранения без дополнительной классификации по фракциям. Такой подход требует значительных энергозатрат, поскольку достижение заданной удельной поверхности (обычно 300–400 м²/кг по Блейну) должно обеспечиваться за один проход материала через мелющие органы. При этом часть материала оказывается перетёртой, что снижает энергетическую эффективность процесса и ухудшает гранулометрический состав конечного продукта.

Замкнутый цикл помола является современным и наиболее эффективным решением. В данной схеме после мельницы устанавливается классифицирующее оборудование, осуществляющее классификации потока материала на две фракции: готовый продукт с требуемой тониной помола и крупку (недомолотый материал), направляемую на повторный цикл измельчения. Такая организация процесса позволяет:

- точно регулировать удельную поверхность цемента в заданных пределах;
- получать цементы высоких марок прочности с оптимальным гранулометрическим составом;
- снизить удельный расход электроэнергии на 15–25 % за счёт исключения перемола материала [3, 4];
- повысить стабильность качества продукции.

В современной цементной технологии применяется ограниченный набор технологических процессов, каждый из которых характеризуется специфическими механизмами разделения и областью практического применения.

В технологии разделения дисперсных материалов в цементной промышленности используются два основных термина: классификация [5] – разделение частиц по крупности в воздушном потоке, и сепарация – процесс отделения твердых частиц от газового потока под действием центробежных и инерционных сил.

Воздушно-центробежная классификация является доминирующим технологическим процессом в мировой цементной промышленности, применяемым более чем на 95 % предприятий [3, 6, 7]. Сущность процесса заключается в классификации частиц в восходящем потоке газовой среды под действием баланса двух противоположно направленных сил: центробежной силы, отбрасывающей крупные частицы к периферии сепарационной зоны, и аэродинамической силы сопротивления, увлекающей мелкие частицы в центральный восходящий поток. Критический размер частицы d_{50} , для которой эти силы уравновешены, определяет границу классификации и может регулироваться в диапазоне 0–100 мкм путём изменения угловой скорости вращения рассекателя, расхода вторичного воздуха и концентрации твёрдой фазы в потоке [6, 8]. Процесс реализуется в замкнутом цикле помола без прерывания технологической линии, что обеспечивает непрерывность производства и оперативную корректировку гранулометрического состава готового цемента при колебаниях свойств исходного клинкера [2, 3].

Циклонная сепарация основана на создании спирального движения газопорошковой смеси внутри конического аппарата, где **сепарация** происходит за счёт различия в инерционных траекториях частиц разного размера. Крупные фракции (>100 мкм) под действием центробежных сил перемещаются к стенкам корпуса и выводятся через нижний патрубок, тогда как мелкие частицы уносятся центральным восходящим потоком через выхлопную трубу. Низкая селективность процесса, обусловленная широкой границей сепарации и значительным перекрытием фракций, ограничивает его применение в качестве самостоятельного метода получения готового цемента. В современных технологических схемах циклонная классификация выполняет вспомогательную функцию предварительной очистки газовых потоков от грубых фракций и служит первой ступенью двухступенчатой системы аспирации помольного агрегата совместно с тканевыми фильтрами [9, 10].

Гидравлическая классификация (седиментация) реализуется в жидкой среде и базируется на законе Стокса, согласно которому скорость свободного

осаждения сферической частицы пропорциональна квадрату её диаметра. В промышленном производстве общестроительных цементов данный процесс практически не применяется по трём объективным причинам: контакт цементного порошка с водой вызывает необратимую гидратацию с потерей вяжущих свойств; необходимость последующей термической сушки увеличивает энергозатраты на 25–30 %; интеграция мокрых процессов в сухие технологические линии, составляющие подавляющее большинство современных мощностей, экономически нецелесообразна. Основная область применения гидроседиментации ограничена лабораторной практикой для определения гранулометрического состава и калибровки эталонных фракций при разработке новых видов вяжущих [1, 11].

Вибрационно-воздушная гибридная классификация относится к перспективным технологическим процессам, сочетающим два последовательных этапа: предварительную дезагломерацию частиц вибрационным воздействием и последующую воздушно-центробежную сепарацию. Вибрация интенсивно разрушает агломераты, характерные для тонкодисперсных цементных порошков с высокой удельной поверхностью, что повышает селективность последующей стадии классификации на 15–20 %. Процесс особенно эффективен при обработке материалов с выраженной склонностью к агломерации, таких как портландцемент с содержанием фракции менее 10 мкм более 60 %, а также композиционные вяжущие с минеральными добавками. [12].

Электростатическая сепарация основана на различии в величине электрического заряда, приобретаемого частицами разного размера при трении о поверхности оборудования. В цементной технологии процесс остаётся экспериментальным из-за высокой чувствительности к влажности материала (требуется содержание влаги менее 0,5 %) и сложности масштабирования лабораторных установок до промышленной производительности [13].

Таким образом, для производства цемента в качестве основного технологического процесса классификации применяется воздушно-центробежная сепарация, реализуемая в динамических сепараторах второго-третьего поколений [2, 3, 7, 14–16].

1.2 Анализ российского рынка оборудования для разделения дисперсных материалов, применяемого в технологии производства цемента

Российский рынок оборудования для классификации дисперсных материалов (сепараторов, классификаторов, систем пылегазоочистки) в цементной промышленности остается критическим сегментом, напрямую влияющим на энергоэффективность, качество продукции и экологическую безопасность производства (таблица 1.1). По состоянию на февраль 2026 г., происходит падение внутреннего спроса на цемент. Согласно данным Союзцемента и аналитикам [17], в 2025 г. цементное производство в России сократилось на 9,4 % до 55,4 млн т, а спрос – на 9 % до 60,6 млн т, с дальнейшим прогнозируемым падением на 8–9 % в 2026 г. Это приводит к снижению загрузки заводов (до 50–60 % в среднем) и в настоящий момент не рассматривается начало строительства новых заводов, а только модернизации существующих мощностей.

Таблица 1.1 – Анализ рынка оборудования для классификации

Производитель	Страна	Типы Сепараторов	Эффективность (%)
Сибпромаш	Россия	Динамические, циклонные, воздушно-центробежные	75–85
Тяжмаш	Россия	Тяжелые помольные сепараторы, циклоны	70–80
Уралмашзавод	Россия	Помольные агрегаты с сепараторами, динамические	80–85
Экостройматериалы (ООО Стройтехнология)	Россия	Фильтры, циклоно-рукавные сепараторы	85–95
Ламел-777	Беларусь	Классификаторы, воздушно-проходные	75–85
FLSmidth	Дания	High-efficiency динамические (3–4 поколения)	85–95
KHD Humboldt Wedag	Германия	Динамические с ротором, комбинированные	85–90

Производитель	Страна	Типы Сепараторов	Эффективность (%)
Claudius Peters	Германия	Воздушно-центробежные, циклонные	80–90
Christian Pfeiffer	Германия	Динамические с регулируемым ротором	85–95
SINOMA	Китай	Бюджетные динамические, циклонные	75–85
CBMI	Китай	Комбинированные сепараторы	80–85
Nanjing Kisen	Китай	Воздушно-проходные, для помола	75–85

Решение ключевых задач производства цемента, осуществляемое в рамках Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года (пункт VIII. Приоритетные направления развития промышленности строительных материалов Российской Федерации), а также национального проекта «Жильё и городская среда», формирует гарантированный рынок сбыта для отечественного цемента, что особенно актуально в рамках реализации технологического суверенитета РФ [18].

Оборудование для разделения используется на двух основных этапах производства цемента:

- **Помол клинкера** – помольные установки: динамические, статические и комбинированные воздушно-проходные сепараторы для классификации сырья и цемента. Они повышают эффективность помола на 15–30 %, снижая энергопотребление и обеспечивая удельную поверхность до 500 м²/кг по Блейну.

- **Пылегазоочистка:** циклоны, рукавные фильтры и электрофильтры для очистки газов от вращающихся печей и мельниц. Это критично для соблюдения норм ПДК пыли 20 мг/нм³ для новых линий, 50 мг/нм³ – для линий, введенных в эксплуатацию после 2008 г. [19]. Рукавные фильтры доминируют с эффективностью >99,9 %.

В 2026 г. спрос на оборудование показывает рост на 15–20 % за счет модернизации старых заводов (построенных в 1946–1975 гг. [20]), где 80 %

компонентов все еще импортные, несмотря на импортозамещение. Усиливается тенденция к переходу на сухой способ производства, что приводит к снижению энергозатрат на 15–25 % и внедрению процессной автоматизации для оптимизации.

Доля иностранных предприятий на рынке сократилась с 60–70 % до 40–50 %, в то время как отечественные и белорусские производители увеличили своё присутствие до 50–60 %.

Иностранные поставщики. Европейские производители (FLSmidth, KHD Humboldt Wedag, Claudius Peters, Scheuch и др.) сохраняют нишу в сервисе и запчастях [21, 22, 23]. Китайские производители (SINOMA, CBMI, Tianjin Cement Industry Design & Research Institute и др.) [24, 25] доминируют с долей ~50 %, предлагая бюджетные аналоги с улучшенным качеством они показали рост на 20–30 % в 2024–2025 гг.

Отечественные/белорусские производители увеличивают свою долю на 25–30 % за счет реверс-инжиниринга. Основные производители: Тяжмаш, Уралмашзавод, Ламел-777, Урал-Омега и др. [26–30].

1.3 Развитие отечественных научных направлений в области разработки оборудования для разделения дисперсных материалов¹

Оборудование для разделения дисперсных материалов является ключевым звеном в технологических цепочках строительной, химической, горно-обогатительной и других отраслей промышленности. Эффективность работы сепараторов и классификаторов напрямую влияет на качество готовой продукции, энергопотребление и экологическую безопасность производств. Научные исследования в этой области отражают как традиционные подходы к конструктивному совершенствованию аппаратов, так и инновационные тренды, связанные с технологическими комплексами, применением методов

¹ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: 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. EDN UYUFFT.

вычислительной аэродинамики и автоматизацией технологических процессов.

Целью данной главы диссертационной работы явилась систематизация данных научных исследований в области оборудования для классификации материалов на основе анализа результатов исследований различных научных школ России, через диссертационные работы, защищенные под руководством ведущих ученых в этой области за период с 1989 по 2025 гг. [31]. Анализ диссертаций имеет определенные преимущества над анализом отдельных статей этих же авторов, поскольку любая диссертационная работа представляет собой некую интеграцию результатов исследований отдельных научных групп ученых (руководитель – аспирант) и научных школ (консультант – кандидат наук – аспирант) за продолжительный период с подведением неких промежуточных научных выводов и практических рекомендаций, в отличие от статей, демонстрирующих, как правило, результаты промежуточных исследований. Анализ проводился на основе 65 диссертаций [32-99] (Приложение А, таблица 1), защищенных в российских вузах и научно-исследовательских организациях по следующим специальностям: 05.02.13. Машины, агрегаты и процессы, 05.04.09. Вакуумная, компрессорная техника, 05.04.13. Машины и аппараты нефтегазового дела, 05.05.06. Горные машины, 05.07.05. Авиационные установки и компрессоры, 05.09.03. Электротехнические комплексы, 05.14.14. Тепловые электрические станции, 05.17.08. (2.6.13.) Процессы и аппараты химической технологии, 05.17.11. Технология силикатов, 01.02.05 (1.1.9.) Механика жидкости, газа и плазмы, 2.1.5. Строительные материалы и изделия, 05.15.08, 25.00.13. (2.8.9.) Обогащение полезных ископаемых, 05.13.06. Автоматизация и управление технологическими процессами, 05.18.12. Технология пищевых концентратов, 25.00.36. Геоэкология (защита окружающей среды от пыли/загрязнений) специальностям. В качестве источников информации использовались данные с официальных сайтов: ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov.ru>, Российской государственной библиотеки – <https://www.rsl.ru> и НЭБ – <https://www.elibrary.ru>. Для обработки данных использовался статистический анализ, оценка динамики защит диссертаций по годам, распределение по степеням (канд./докт.) (Приложение А, рисунок 1), выделение ключевых тематических кластеров и географическое картирование

научных центров (Приложение А, рисунок 2) (детальный анализ ведущих научных школ представлен в статье [31]).

Для выявления тенденций развития научных направлений отобранные диссертации были систематизированы по десятилетнему интервалу. В результате выявлено, что диссертации с 1989 по 1999 гг. отражают классический подход к исследованиям в области механики дисперсных сред и процессов их переработки. Доминируют фундаментальные и прикладные задачи, связанные с моделированием, расчетом и интенсификацией конкретных технологических процессов и аппаратов.

Тогда как исследования с 2000 по 2009 гг. в области сепарации и классификации тонкодисперсных материалов, проводились преимущественно в рамках инженерно-технологического направления, доминировал прикладной подход, ориентированный на совершенствование конструкций сепараторов, помольных комплексов и систем пневмокласификации, предназначенных в основном для строительной и горнодобывающей отраслей.

Диссертационные исследования с 2010 по 2019 гг. в области измельчения и сепарации материалов развивались в рамках таких прикладных инженерно-технологических направлений, как аэродинамика и математическое моделирование. Доминирует комплексный подход, ориентированный на создание энергоэффективного оборудования и цифровых систем управления для горно-обогатительной и строительной отраслей.

Период с 2020–2025 гг. стал началом системного перехода от классического машиноведения к интеграции задач управления, цифрового моделирования и решения экологических проблем.

На основе обобщения данных по конструктивным решениям оборудования, способам получения тонкодисперсных материалов и протекающих в них процессов, проведен анализ работ, который позволил выявить ключевые недостатки существующих решений. Это, в свою очередь, подтверждает актуальность сформулированной цели и задач, направленных на совершенствование процесса классификации цемента.

В работе В.Г. Дмитриенко [32] предложена конструкция центробежного

сепаратора, предназначенная для классификации тонкодисперсных порошков. Техническое решение предусматривает организацию тангенциального поддува дополнительного воздуха непосредственно в зону сепарации, что позволяет целенаправленно формировать вспомогательное закручивающее течение и корректировать аэродинамический профиль потока (рисунок 1.1). Внедрение данной схемы обеспечивает повышение эффективности разделения на 20 %.

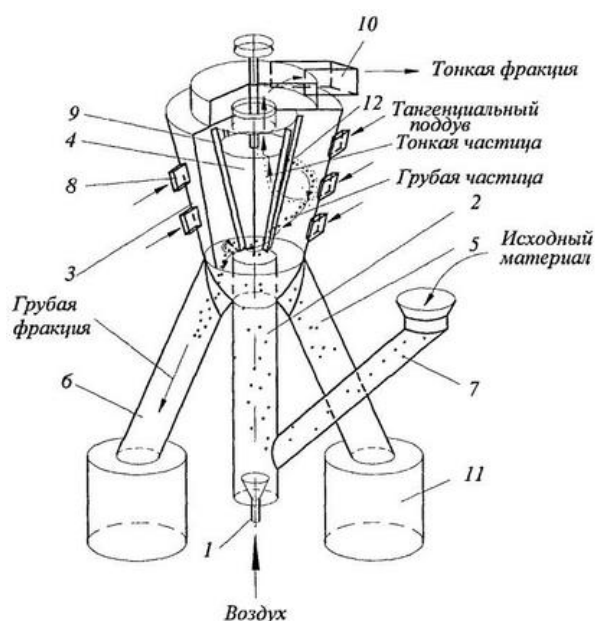


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема центробежного сепаратора с тангенциальным поддувом дополнительного воздуха 1 – сопло подачи рабочего энергоносителя; 2 – патрубок подачи исходного материала в сепаратор; 3 – корпус сепаратора; 4 – ротор; 5, 6 – патрубки отвода грубой фракции; 7 – загрузочный патрубок; 8 – сопло подачи дополнительного воздуха; 9 – лопатки ротора; 10 – улитка отвода тонкой фракции; 11 – бункер сбора грубой фракции; 12 – классифицируемый материал

снижается, согласно данным эксперимента ~2 раза.

В работе С.В. Мелихова [83] предложена конструкция центробежного сепаратора с турбинной зоной разделения. Техническое решение предусматривает использование ротора с регулируемым углом наклона лопастей (диапазон 50–90°), что позволяет целенаправленно управлять закруткой воздушного потока и распределением центробежных сил в зоне классификации (рисунок 1.2). Таким

Предлагаемое техническое решение предусматривает дополнительный ввод воздуха в рабочую зону, что приводит к увеличению общего аэродинамического сопротивления системы. Данное обстоятельство может потребовать перерасчёта аэродинамической характеристики вентилятора, изменения частоты его вращения или замены привода на более мощный. Кроме того, заявленный прирост эффективности разделения на 20 % получен для определённого гранулометрического состава исходного материала. При изменении настроек сепаратора на получение продукта с большей удельной поверхностью данный эффект

образом, конструкция предполагаемого сепаратора с турбинной зоной разделения, позволяет получать порошки с заданной величиной гранулометрического состава в пределах до 10 мкм, за счёт замены существующего ротора сепаратора на ротор типа «белочья клетка» с регулируемым количеством и углом поворота лопастей.

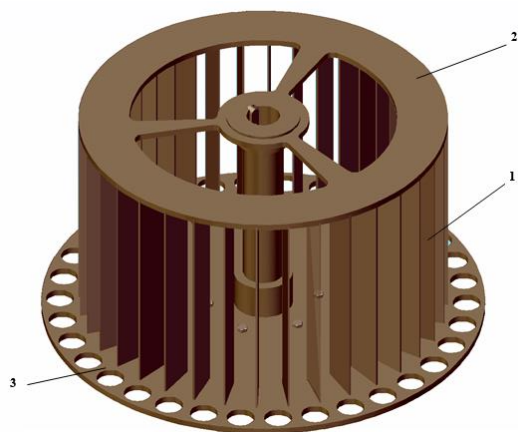


Рисунок 1.2 – Общий вид ротора центробежного сепаратора с турбинной зоной разделения: 1 – регулируемые лопасти, 2 – диск верхний, 3 – диск нижний

В предложенной конструкции центробежного сепаратора с турбинной зоной разделения реализован механизм изменения угла установки лопаток ротора. Однако регулировка лопаток ротора осуществляется в ручном режиме, что существенно ограничивает оперативность управления процессом классификации.

В работе Е.Б. Александровой [48] предложена конструкция центробежного сепаратора с переменным полем скоростей в зоне классификации. Новая конструкция центробежного сепаратора с переменным полем скоростей в зоне разделения для классификации мелкодисперсных порошков (рисунок 1.3) позволила повысить производительность для материала размером менее 20 мкм.

Предложенная конструкция с механической регулировкой не обеспечивает стабильного поддержания переменного поля скоростей в динамическом режиме. В процессе классификации требуется непрерывный мониторинг параметров готового продукта и оперативная корректировка режимов работы сепаратора. Механическое управление характеризуется медленным откликом и не позволяет своевременно компенсировать возмущения технологического процесса, что приводит к колебаниям гранулометрического состава и снижению качества конечной продукта.

В работе И.А. Овчинниковой [47] исследованы методики расчёта основных газодинамических и конструктивных параметров сепаратора с дополнительной зоной разделения материала и рекомендациях по выбору рациональных технологических режимов работы струйных противоточных помольных

комплексов для измельчения порошков пигментов и мрамора, обеспечивающих заданную тонкость измельчения при невысоком расходе рабочего воздуха и электроэнергии.

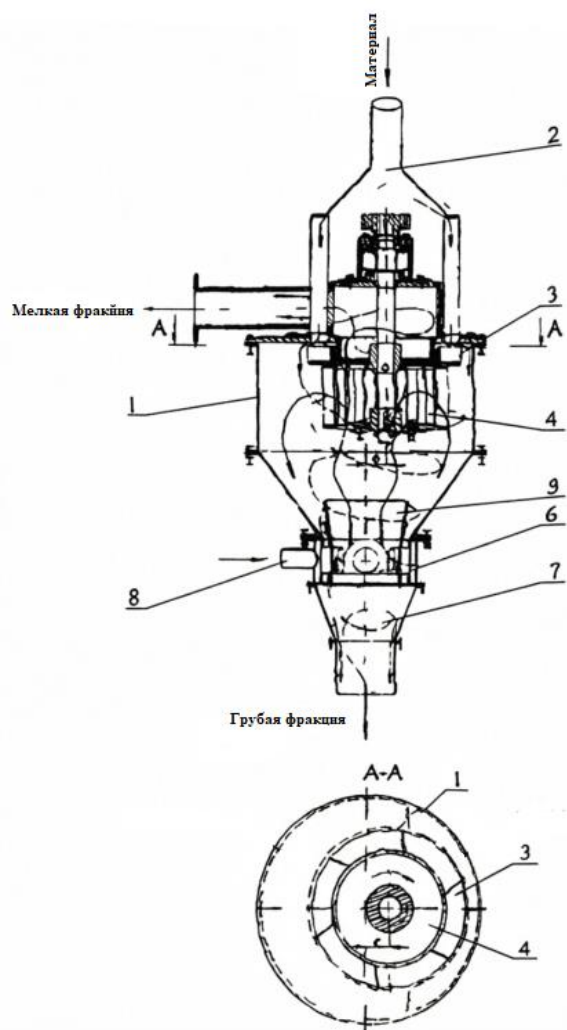


Рисунок 1.3 – Схема центробежного сепаратора со смещенным ротором: 1 – корпус сепаратора, 2 – патрубок подачи исходного порошка, 3 – разбрасывающий диск, 4 – смещенный ротор, 5 – диффузор, 6 – коллектор продувочного воздуха, 7 – патрубок крупки, 8 – патрубок продувочного воздуха

Особенностью конструкции сепаратора, работающего в струйном противоточном помольном комплексе является то, что цилиндрические отводные патрубки, установленные в узле отвода крупной фракции, под углом 45° относительно горизонтальной и 45° относительно вертикальной оси, создают восходящий вихревой поток, образуя дополнительную зону разделения, в которой происходит тщательное перемешивание материала с воздухом с последующим выделением ранее увлекаемой тонкой фракции.

Вследствие чего из-за уменьшения циклов циркуляции в системе растёт производительность, с одновременным ростом готового продукта, что объясняется создаваемым аэродинамическим сопротивлением двух потоков, потока от работы ротора и вихревого восходящего потока в дополнительной зоне разделения. Воздух в отводные цилиндрические патрубки подаётся через коллектор, куда в свою очередь приходит с разводного тройника, установленного между вентилятором аспирации и фильтром тонкой очистки. Тройник со встроенными в него шиберными заслонками служит для отвода уже отработавшего воздуха на повторный цикл сепарации и сброса излишнего давления

в фильтр тонкой очистки. При применении данной конструкции сепаратора, работающего в замкнутом цикле, уменьшается нагрузка на привод вентилятора, что ведёт к уменьшению энергозатрат.

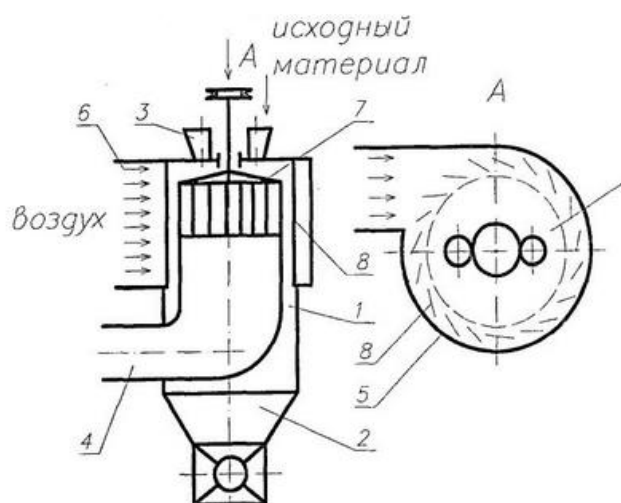


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема классификатора центробежного типа:

1 – сепарационная камера цилиндрической формы, 2 – бункер сбора грубой фракции ротора, 3 – загрузочные воронки, 4 – патрубок для отвода тонкой фракции, 5 – улитка, 6 – патрубок подачи рабочего энергоносителя, 7 – ротор, 8 – жалюзи

Таким образом, предложенная конструкция с шиберными заслонками для сброса избыточного давления в фильтр тонкой очистки создаёт дополнительную аэродинамическую нагрузку на систему газоочистки. Направление отработанного сепарационного воздуха, насыщенного мелкодисперсной пылью, непосредственно в фильтр приводит к ускоренному загрязнению фильтрующих элементов, росту перепада давления и снижению

пропускной способности системы.

В предложенном техническом решении не рассмотрен пример неравномерности подачи исходного материала на разбрасывающий диск. На практике возможны колебания расхода сырья, что нарушает симметрию распределения частиц в зоне сепарации и приводит к снижению эффективности разделения и нестабильности гранулометрического состава готового продукта. Кроме того, интенсивное ударное и абразивное воздействие частиц на кромки диска вызывает ускоренный износ рабочих поверхностей, что требует периодических остановок оборудования для ремонта или замены узла и повышает эксплуатационные затраты.

В работе Р.Р. Шарапова [6] рассматривается процесс разделения в воздушном центробежном сепараторе (рисунок 1.5). Предложена аэродинамическая схема центробежного сепаратора, обеспечивающая повышение эффективности разделения за счет совершенствования аэродинамических режимов его работы, что

позволила повысить эффективность его работы до 85 %, увеличить выход готового продукта на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии до расчетных 4 кВт·т/ч при производстве цемента. Достигаются такие показатели благодаря установке дополнительного клапана между вентилятором и сепаратором, который позволяет перекрывать трубопровод и работает следующим образом: перекрывая клапан 9 от минимума до максимума, в патрубок сброса воздуха 8 подаём от минимума до максимума сепарационного воздуха, в связи с чем, через патрубок 11 в систему засасывается от минимума до максимума свежего воздуха, и поэтому разрежение в сепараторе изменяется от минимума до максимума. Это позволяет увеличивать количество мелких фракций, поступающих в готовый продукт и тем самым повышать эффективность воздушного центробежного сепаратора и помольного агрегата в целом.

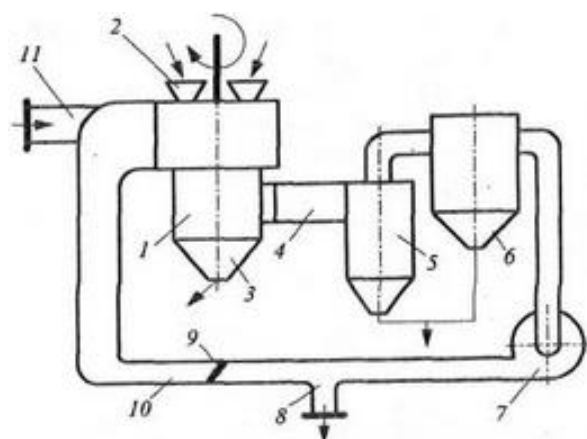


Рисунок 1.5 – Схема центробежного воздушного сепаратора: 1 – корпус сепаратора; 2–4, 8, 11 – патрубки подачи исходного материала, вывода грубой фракции, сепарационного воздуха, сброса воздуха и подачи свежего воздуха соответственно, 5 – осадительные циклоны; 6 – фильтр сепарационного воздуха; 7 – внешний вентилятор; 9 – поворотный клапан; 10 – газоход сепарационного воздуха

В данной работе предложено механическое регулирование положения клапана, что делает более трудоемкий процесс наладки и эксплуатации, так как настройки сепаратора и вентилятора требуют быстрой корректировки во время работы. Несмотря на наличие системы мониторинга (датчиков контроля качества готового продукта), отсутствие автоматического привода исключает возможность мгновенной реакции на отклонения показателей. Возникающая инерционность в управлении потоком сепарационного воздуха приводит к неслаженной работе оборудования, что может стать причиной нестабильности гранулометрического состава и снижения качества конечного продукта.

В работе В.Н. Трофимченко [75] рассмотрено техническое решение, направленное на совершенствование процесса дезагрегации частиц в

динамическом сепараторе за счёт внедрения устройства в виде многозаходных лент (рисунок 1.6). Конструктивное решение снижает вероятность возврата тонкой фракции, захваченной в виде агрегатов, в зону доизмельчения, тем самым повышая общую эффективность сепарации и энергетическую эффективность технологической линии. Экспериментально установлено, что при классификации молотого мела с размером частиц до 200 мкм применение многозаходных лент позволяет повысить производительность сепаратора на 5 %.

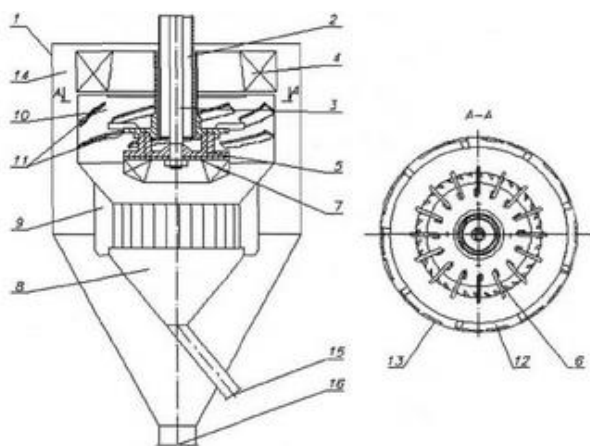


Рисунок 1.6 – Схема динамического сепаратора: 1 – корпус; 2 – загрузочный канал; 3 – приводной вал; 4 – вентилятор; 5 – распределительное устройство; 6 – контролопасти; 7 – крыльчатка; 8 – камера осаждения крупной фракции; 9 – лопасти; 10 – сепарационная камера; 11 – устройство; 12 – многозаходные ленты; 13 – канал отвода материала; 14 – камеры осаждения мелкой фракции; 15, 16 – разгрузочный канал крупной и мелкой фракции соответственно

помола цемента, основанная на статистических методах прогнозирования с использованием контрольных карт (рисунок 1.7). Разработанная система снизила выпуск некачественного цемента в 2,1 раза, повысила производительность цеха на 1,7 %, снизила потребление электроэнергии на 3,6 % и существенно уменьшила нагрузку на операторов.

Данная автоматизированная система управления качеством помола цемента не может достаточно быстро адаптироваться при частых изменениях режима (переналадка мельницы, смена сырья) требуется постоянный пересчёт контрольных пределов, что может приводить к снижению эффективности

В данной работе не рассмотрено влияние закреплённые лент, которые создают дополнительные динамические нагрузки, что приводит к необходимости точной центровки и контролю вибраций на высоких оборотах. Также при добавлении в конструкцию лент требуется периодический осмотр, очистка от налипания, контроль износа кромок лент, что увеличивает трудозатраты на ТО.

В работе А.Н. Кузенкова [93] предложена автоматизированная подсистема управления качеством

производства.

В работах ведущих ученых Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) последних лет [100–104] особое внимание уделено проблемам классификации и сепарации пылегазовых потоков. Это подтверждает актуальность поиска оптимальных конструктивных решений в данной области.

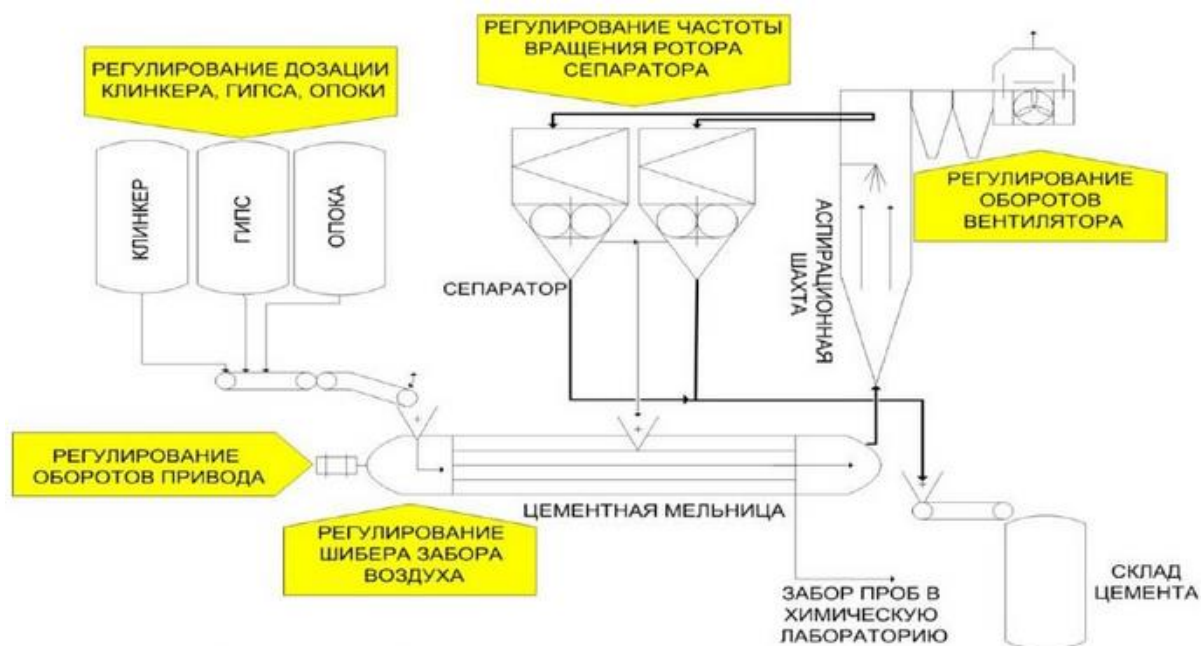


Рисунок 1.7 – Технологическая схема помола цемента с управляющими воздействиями

Также обобщая результаты остальных работ, можно отметить, что в работах материаловедческого профиля, т.е. направленных на повышение эффективности существующих либо создание новых материалов, как правило, делается акцент на получение неких конечных характеристик композита (прочность, долговечность, устойчивость к внешним воздействиям и т.д.), предполагая, что исходное сырьё уже обладает требуемой дисперсностью, без глубокого анализа технологических параметров его получения и внесения изменений в технологию получения, сепарации и классификации. Исключение составляют работы, в которых проводится сравнение характеристик вещества (кинетики помола, удельной поверхности, фракционного состава, степени механоактивации – как интегральной характеристики физико-химических изменений поверхности дисперсных частиц), измельченного в различных помольных агрегатах. Однако и в этих исследованиях

отсутствует глубокий анализ влияния параметров и режимов работы агрегатов на характеристики дисперсного вещества с рекомендациями по их модернизации. В работах же, связанных с разработкой оборудования, его модернизацией, оценкой процессов работы аппаратов минимальная роль отводится анализу вещества, для переработки или получения которого и предназначено оборудование. Из чего следует необходимость коллаборации ученых и специалистов для поиска технологических решений по повышению качества классификации тонкодисперсных материалов с целью точности разделения, повышения производительности, автоматизации процесса, уменьшения энергозатрат и минимизации воздействия на окружающую среду, с учетом состава и свойств материалов, подвергаемых переработке.

Для будущих работ, как показал анализ диссертационных исследований и современных тенденций в технологии получения тонкодисперсных материалов, необходимо переходить от рассмотрения отдельных аппаратов к системному подходу – проектированию и оптимизации комплекса оборудования как единого технологического цикла. Данный подход позволит обеспечить качество классификации вещества по дисперсности, выделение более мелких частиц, повышение количества конечного продукта и снижение энергопотребления на производстве, такое решение предлагают авторы [31], на примере классификации цемента.

Таким образом, анализа диссертационных работ (Приложение А, рисунок 3), позволяет отметить, что междисциплинарный подход, объединяющий исследования в области материаловедения, вычислительной аэродинамики, машиностроения, цифровизации, автоматизации, экологических аспектов, – остается, как и прежде, весьма актуальным и демонстрирует высокую значимость направления, связанного с изучением процессов измельчения, сепарации и классификации тонкодисперсных материалов, для развития энергоэффективных и устойчивых технологий производства широкого спектра материалов в различных отраслях промышленности. В связи с этим разработка аэродинамического комплекса (АК) для тонкой классификации и рециркуляции пылевоздушного

потока, обеспечивающего повышение эффективности технологического процесса классификации цемента в замкнутом цикле – является актуальной задачей.

1.4 Методики расчета процессов классификации в сепараторах

Расчет и моделирование процессов классификации являются фундаментом для проектирования, оптимизации и управления работой сепараторов. Комплексный подход к расчету должен учитывать, как макроскопические балансовые закономерности, так и микроскопическую физику поведения отдельных частиц и их агрегатов в турбулентном потоке. На основании анализа существующих методик можно выделить три взаимосвязанных уровня моделирования: матричные модели, аналитические зависимости кривых эффективности и модели, основанные на уравнениях движения и переноса.

Матричные модели. Моделирует классификации материала на мелкие и крупные фракции. Динамический сепаратор представлен диагональной матрицей классификации, каждый элемент которой показывает относительную часть фракции, переходящей в реальный материальный поток (конечный продукт). Кривую КПД (обратную кривую Тромпа) можно рассчитать, используя измеренные данные потоков сепаратора о гранулометрическом составе. Если данные о размере частиц на сепараторе не доступны, для расчёта матрицы классификации возможно аналитическое описание кривой КПД.

Процесс классификации описывается балансом масс по узким фракциям. При обозначении F_i , C_i , T_i как массовых долей i -й фракции (с характерным размером d_i) в питании, крупном и тонком продуктах соответственно, выполняется условие сохранения массы:

$$F_i = C_i + T_i \quad (1.1)$$

Ключевым расчетным параметром служит фракционная эффективность (кривая Тромпа) [52] $E(d_i)$ – доля частиц данного размера, извлекаемых в крупный продукт:

$$E(d_i) = \frac{C_i}{F_i} \quad (1.2)$$

Матричная форма представления. Для всего гранулометрического спектра удобна компактная запись в векторно-матричной форме:

$$C = E \cdot F, T = (I - E) \cdot F. \quad (1.3)$$

где F , C , T – векторы-столбцы гранулометрических составов, E – диагональная матрица фракционных эффективностей, I – единичная матрица. Такая форма наглядно отражает перераспределение материала между продуктами классификации.

Функция $E(d)$ представляет собой исчерпывающую характеристику качества классификации [5, 7, 12, 87, 105]. Её ключевые параметры:

- d_{50} – размер частиц, имеющих 50 %-ную вероятность попасть в крупный продукт;
- Коэффициент совершенства классификации, k – например, $k = d_{25} / d_{75}$. Чем ближе k к 1, тем «острее» классификации фракций;
- *By-pass* – ненулевая эффективность извлечения для самых мелких частиц;
- *Fish-hook effect* [78, 106] – аномальное повышение эффективности извлечения сверхмелких фракций в крупный продукт, часто наблюдаемое в циклонных сепараторах.

При наличии гранулометрического анализа всех потоков матрица E рассчитывается напрямую. При отсутствии экспериментальных данных (например, на стадии проектирования) кривую эффективности аппроксимируют аналитическими функциями, параметры которых (d_{50} , k) оценивают на основе опытных данных для аналогичных аппаратов или с помощью корреляций, связывающих их с режимными параметрами (скорость газа, загрузка, геометрия).

Аналитические модели кривых эффективности.

Эти модели позволяют компактно описать кривую Тромпа с помощью математических функций, что удобно для инженерных расчётов и встраивания в модели технологических циклов.

- **Функция Плитта** [4, 107]. Одна из распространённых двухпараметрических моделей:

$$E(d) = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{d}{d_{50}} \right)^m \right]. \quad (1.5)$$

где m – параметр крутизны кривой (связан с κ), а d_{50} – разделительный размер. Константа $0,693 \approx \ln 2$ обеспечивает выполнение условия $E(d_{50}) = 0,5$. Модель проста, но не всегда точно описывает реальные кривые, особенно при наличии побочного уноса.

- **Модель с побочным уносом [6, 8, 63].** Более реалистичная трёхпараметрическая модель:

$$E(d) = R_f + (1 - R_f) \cdot E^*(d). \quad (1.6)$$

где R_f – постоянная доля побочного уноса (материал, минуящий зону разделения), а $E^*(d)$ – «очищенная» функция эффективности (например, функция Плитта или логистическая кривая), описывающая собственно процесс классификации.

- **Логистическая функция.** Часто используется благодаря гибкости:

$$E(d) = \frac{1}{1 + \exp(-s \ln(\frac{d}{d_{50}}))}. \quad (1.7)$$

где s – параметр крутизны.

Выбор модели и калибровка её параметров (d_{50} , m , R_f) по экспериментальным данным – ключевой этап создания адекватной расчётной схемы.

Моделирование учётом турбулентности и динамики частиц.

Распределение концентрации частиц в зоне разделения описывается стационарным уравнением конвективной диффузии. Для получения приближённых аналитических зависимостей уравнение сводят к двум квазиодномерным задачам для усреднённых концентраций частиц.

Для углублённого анализа и оптимизации конструкции сепаратора необходим переход к физическим моделям, описывающим движение и сегрегацию частиц в потоке.

Уравнение конвективно-диффузионного переноса [77, 97, 105].

Распределение массовой концентрации частиц i -й фракции c_i в зоне разделения в стационарном режиме описывается уравнением:

$$\nabla \cdot (u c_i - D_i \nabla c_i - v_s c_i) = 0, \quad (1.8)$$

где: u – вектор скорости несущей среды (газа или жидкости), D_i – коэффициент турбулентной диффузии (обычно принимается равным коэффициенту турбулентной вязкости), v_s – вектор скорости седиментации (осаждения) частицы размера d_i под действием центробежных/гравитационных сил.

Самое главное помнить, что, седиментационный член входит со знаком **минус**, поскольку направленный перенос частиц под действием внешних сил противоположен диффузионному потоку.

Для получения инженерных зависимостей сложную трёхмерную задачу упрощают. Например, в циклонном сепараторе часто рассматривают два основных направления движения:

1. *Тангенциальное движение*: частица увлекается вращающимся потоком; усреднённая тангенциальная скорость принимается функцией радиуса.

2. *Радиальное движение*: под действием центробежной силы частица движется к стенке, но этому противодействует сила аэродинамического сопротивления (по закону Стокса для мелких частиц). Баланс сил определяет радиальную скорость дрейфа. Ключевым безразмерным критерием является **число Стокса** $Stk = \tau_p \cdot |\nabla u|$, где τ_p – время релаксации частицы [63, 97, 107]. Частицы с $Stk \gg 1$ эффективно отделяются, с $Stk \ll 1$ – следуют за потоком газа.

Учёт турбулентной дисперсии. Турбулентность, характеризуемая коэффициентом D_i , приводит к размытию границ классификации [77, 97], что объясняет конечную крутизну реальной кривой Тромпа и наличие побочного уноса. В приближённых моделях это учитывается введением эффективного «коэффициента турбулентного перемешивания» в выражение для вероятности захвата частицы.

Таким образом, выбор методики расчёта зависит от поставленной задачи: матричная модель незаменима для оперативного анализа и балансовых расчётов, аналитические функции – для инженерного проектирования и моделирования циклов, а фундаментальные модели – для глубокой оптимизации и разработки новых конструкций сепараторов.

1.5 Выводы

1. Анализ современного состояния рынка оборудования для разделения дисперсных материалов в цементной промышленности России выявил необходимость и актуальность проведения исследований, направленных на совершенствование технологических процессов классификации цемента. Актуальность обусловлена совокупностью факторов: устареванием основного фонда цементных заводов (более 80 % предприятий эксплуатируют оборудование, введённое в строй в 1946–1975 гг.), ужесточением экологических требований к выбросам в атмосферу (снижение предельно допустимой концентрации взвешенных веществ до 20 мг/нм³ для вновь вводимых линий), ростом спроса на высокомарочные и специальные цементы, а также стратегической задачей обеспечения технологического суверенитета страны. При этом отечественные производители не могут предложить в достаточном объёме конкурентоспособные аналоги динамических сепараторов третьего поколения, что создаёт технологический разрыв и сохраняет зависимость от импорта на одном из ключевых этапов производства цемента – в помольном цикле. Проведение данной работы позволит разработать научно обоснованные подходы к повышению эффективности процессов классификации, снизить энергозатраты на помол до 25%, обеспечить соответствие современным экологическим нормам и формирование отечественной технологической базы для производства высокопроизводительных аэродинамических систем.

2. Рассмотрение технологических процессов и оборудования, применяемых для классификации цемента, показал, что воздушно-центробежная сепарация в замкнутом цикле помола подтвердила свой статус базовой технологии, обеспечивающей гибкость, энергосбережение (15–25 %) и высокое качество цемента. Перспективы связаны с развитием гибридных (вибрационно-воздушных) методов для дезагломерации и повышения селективности, в то время как гидравлическая и электростатическая сепарация сохраняют нишевой характер.

3. Оценка российского рынка оборудования показала, что он находится в

стадии трансформации: доля отечественных и белорусских производителей достигла 50–60 %, а китайские поставщики заняли лидирующие позиции (около 50 %) в новых проектах. Европейские компании сохраняют присутствие в сегменте высокотехнологичного оборудования и сервиса. Основными направлениями остаются модернизация устаревшего оборудования, ужесточение экологических норм и экономия энергии, однако активность внедрения нового оборудования сдерживается падением спроса на цемент.

4. Представленный анализ диссертационных работ выявил четкую эволюцию от прикладного материаловедения и химической технологии (1989–1999 гг.) через инженерное проектирование и оптимизацию оборудования (2000–2009 гг.) к этапу математического моделирования и автоматизации (2010–2019 гг.). Современный период (2020–2025 гг.) характеризуется смещением фокуса на цифровое управление, прогнозирование и экологические решения. Образованы сильные научные школы в Белгороде, Томске, Иванове и других городах. Выявлена потребность в усилении междисциплинарной кооперации материаловедов и машиностроителей для перехода от совершенствования отдельных аппаратов к проектированию оптимизированных технологических комплексов.

5. Рассмотренные расчетные методы включают балансовые матричные модели, аналитические аппроксимации кривых эффективности (Тромпа) и фундаментальные физические модели, основанные на уравнениях переноса с учетом турбулентности и числа Стокса. Комбинированное применение этих методов на разных стадиях проектирования и анализа позволяет прогнозировать работу сепараторов, оптимизировать их конструкцию и режимы эксплуатации для минимизации энергозатрат.

2 ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс производства цемента требует не только тонкого помола клинкера с комплексов добавок, но и точной классификации полученного порошка по гранулометрическому составу. От качества классификации фракций напрямую зависят ключевые эксплуатационные свойства цемента – в первую очередь, кинетика его твердения и активность. Кроме того, низкое качество классификации измельченного вещества ведет к повышению энергоемкости технологических процессов за счет отправки материала на неоправданный домол. В условиях стремления к повышению энергоэффективности и соответствию международным стандартам, актуальными становятся вопросы оптимизации режимов работы сепарационного оборудования, а также адекватной оценки эффективности классификации.

В данной главе представлены: эволюция конструкций инерционных пылеуловителей, применяемых для классификации тонкодисперсных материалов; математический аппарат анализа процессов классификации; данные по исходным сырьевым материалам и методы применяемых исследований. Приведено обоснование применения предложенного аэродинамического комплекса для эффективной классификации и разделения цемента, на который получен патент РФ. Особое внимание уделено использованию метода планирования эксперимента и критериям эффективности, таким как кривая Тромпа и точечный критерий Эдера–Майера, для объективной оценки и прогнозирования работы сепарационных систем.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях с применением оборудования кафедр «Подъемно-транспортных и дорожных машин», «Механического оборудования», а также при использовании лабораторной базы Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

2.1 Оборудование, используемое для создания аэродинамического комплекса

К наиболее простым устройствам для классификации частиц по крупности относятся отстойные газоходы (рисунок 2.1). Они обеспечивают выделение из газового потока преимущественно крупной и средней фракций с размером частиц от 0,05 до 0,5 мм, которые осаждаются в специальных сборниках [108].

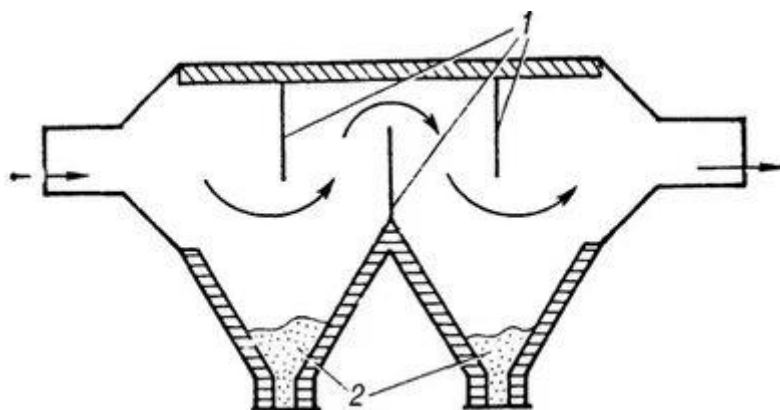


Рисунок 2.1 – Отстойные газоходы:

1 – перегородки, 2 – сборник пыли

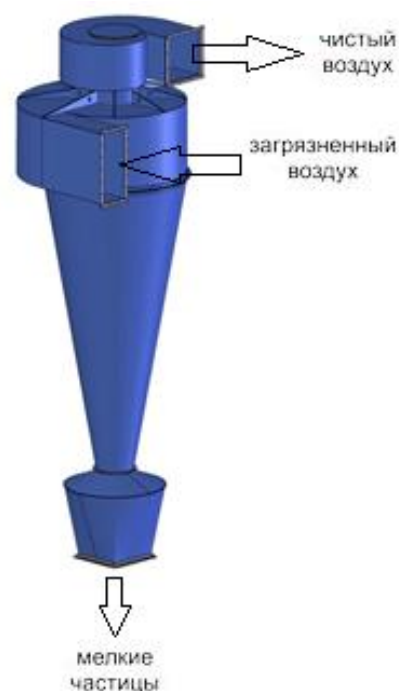


Рисунок 2.2 – Циклоны

СК-ЦН-34

Для дальнейшего разделения более тонкой фракции применяются циклоны, например, типа СК-ЦН-34 (рисунок 2.2) [109, 110]. В них из несущей среды выделяются частицы тонкой фракции (размером до 10 мкм). Сверхтонкая фракция, как правило, улавливается на последующих ступенях очистки, например, с помощью фильтров.

Важным технологическим параметром для работы всех перечисленных устройств является относительная влажность газового потока, поскольку она

существенно влияет на процессы агрегации частиц и, как следствие, на эффективность осаждения.

Статический V-образный сепаратор широко используется для классификации предварительно измельчённого материала, главным образом в составе систем замкнутого цикла помола с валковыми мельницами (рисунок 2.3) [111]. Основной функцией сепаратора является разделение материала после его измельчения в валках.

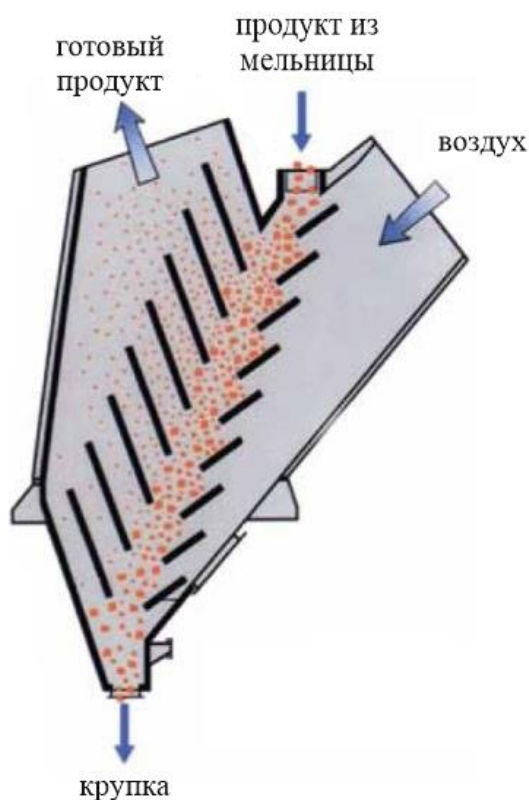


Рисунок 2.3 – Статический V-образный сепаратор

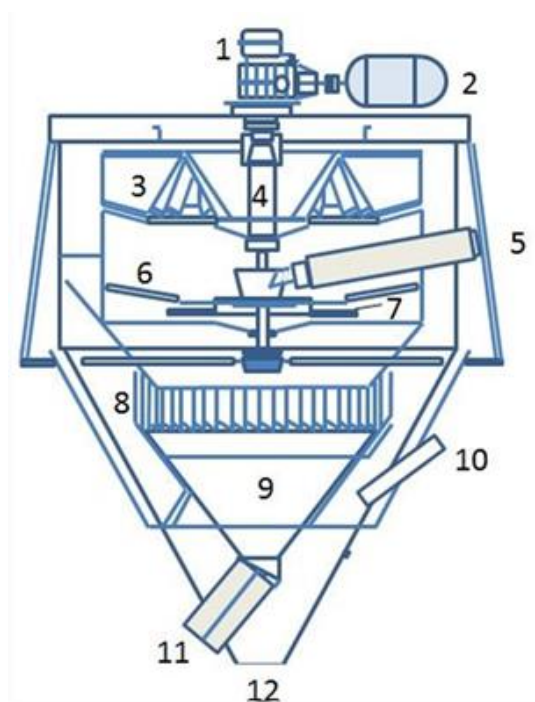


Рисунок 2.4 – Сепаратор первого поколения:

- 1 – редуктор, 2 – двигатель,
- 3 – рабочее колесо вентилятора, 4 – вал,
- 5 – ввод питания, 6 – направляющие лопатки,
- 7 – распределительная тарелка,
- 8 – воздушные лопатки, 9 – хвостовой конус,
- 10 – выход воздуха, 11 – выход крупки,
- 12 – выход готового продукта

Материал подаётся в верхнюю часть аппарата и под действием силы тяжести движется вниз по наклонной ступенчатой решётке. Поперечный поток воздуха,

подаваемый через входной патрубок, продувает материал, разделяя его на фракции. Мелкие частицы уносятся воздушным потоком к верхнему выходу сепаратора в качестве готового продукта, а более крупные фракции, не увлекаемые потоком, осаждаются в нижнюю часть и возвращаются на повторное измельчение.

Динамические сепараторы, в отличие от статических V-образных, обеспечивают более высокую селективность и эффективность классификации благодаря использованию центробежной силы, которая значительно превосходит по интенсивности гравитационную.

Ключевым конструктивным отличием является наличие вращающихся элементов (ротора с лопатками) непосредственно в сепарационной зоне, что позволяет более точно разделять частицы по размеру. Применение таких сепараторов в помольных установках позволяет достичь существенного технологического и экономического эффекта: повышение производительности агрегатов на 25–50 % при одновременном снижении удельного энергопотребления на 10–20 %.

Конструктивное исполнение динамических сепараторов непрерывно развивалось, пройдя несколько поколений. Сепараторы первого поколения (рисунок 2.4) [112] характеризовались наличием встроенного вентилятора и системой встречно направленных лопаток. Материал подавался сверху на распределительный диск, после чего воздушным потоком от вентилятора поднимался вверх. В зоне действия вращающихся лопаток происходило сепарационное разделение: мелкие фракции уносились потоком в систему аспирации (например, в циклон или фильтр), а более крупные частицы, отбрасываемые центробежной силой к периферии, направлялись через возвратный патрубок обратно в мельницу для доизмельчения.

Второе поколение сепараторов получило новую конструкцию: вентилятор был вынесен за пределы сепарационной камеры (рисунок 2.5) [113]. Это разделило функции транспортировки воздуха и непосредственно сепарации, повысив гибкость управления процессом. Распределительная плита и сепарирующий ротор с лопатками приводятся в движение отдельным приводом. Современные модели

также оснащаются индивидуальными приводами для вентилятора (работающего, как правило, на постоянной скорости) и для регулируемого ротора, что позволяет оперативно изменять настройки классификации и повышает общую эффективность установки.

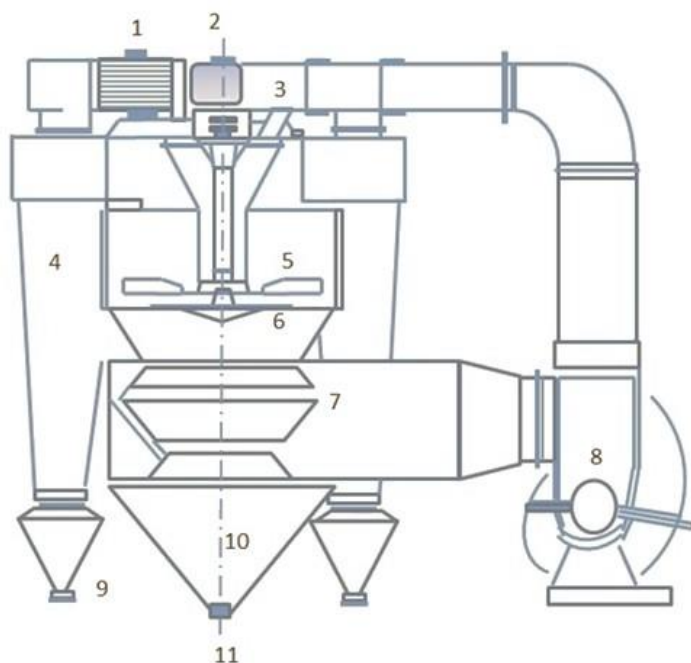


Рисунок 2.5 – Сепаратор

второго поколения:

- 1 – двигатель, 2 – редуктор,
- 3 – ввод питания, 4 – циклоны,
- 5 – направляющие лопатки, 6 – распределительная тарелка, 7 – воздушные лопатки,
- 8 – вентилятор,
- 9 – выход готового продукта,
- 10 – конус возврата,
- 11 – выход крупки

Третье поколение представлено наиболее совершенными динамическими сепараторами, в которых используется вращающаяся сепарационная клетка (ротор корзинного типа) и внешний циклон для отвода готового продукта (рисунок 2.6) [114, 115]. Материал равномерно распределяется по вращающейся клетке, состоящей из специальных профилированных пластин. Мелкие частицы проходят сквозь зазоры между пластинами и уносятся воздушным потоком, в то время как крупные фракции отбрасываются к периферии и направляются в возвратный конус. Важной особенностью конструкции является подача так называемого третичного воздуха в нижнюю часть этого конуса. Это предотвращает слипание частиц (агрегацию) и снижает количество материала, выпадающего из процесса активной классификации, что повышает общую эффективность сепарации.

Также существуют и другое оборудование для гравитационного разделения, это классификаторы кипящего слоя (рисунок 2.7). Они показывают высокую эффективность при разделении либо материалов одинаковой дисперсности, но с

разными свойствами, либо материалов с сильно различающейся крупностью частиц [116, 117]. В то же время, для продукта крупностью до 5 мм они менее эффективны, чем обычные гравитационные сепараторы, когда содержание крупной фракции составляет менее 40 % [118].

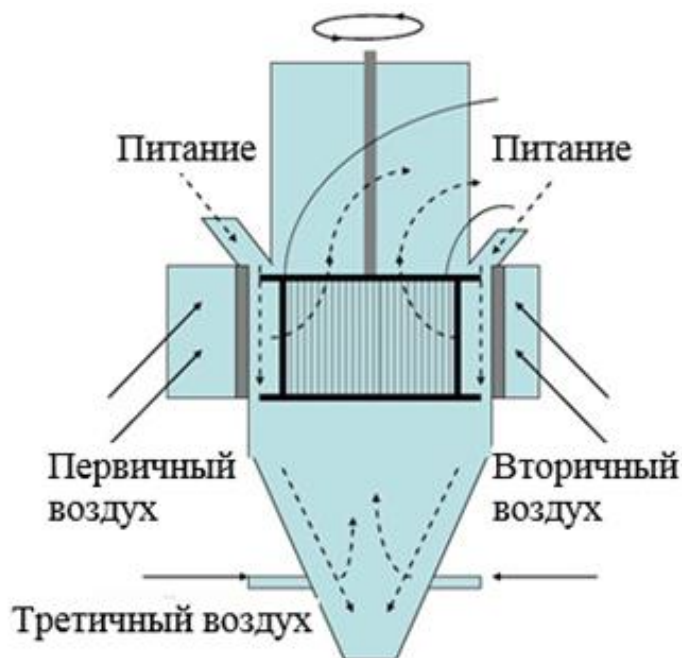


Рисунок 2.6 – Сепаратор третьего поколения

Еще одним примером аппарата, реализующего принцип разделения в кипящем слое для тонкодисперсных порошков (с размером частиц менее 70 мкм), является сепаратор, предложенный Е.В. Харламовым [117]. Однако его рабочий принцип кардинально отличается от механизма действия классических центробежно-воздушных сепараторов, в основе которых лежат законы газодинамики. Именно для обработки тонкодисперсных материалов такие традиционные сепараторы не применяются, поскольку характеризуются крайне низкой производительностью и неудовлетворительной эффективностью классификации.

Другим примером сепаратора с кипящим слоем, осуществляющим разделение тонких порошков (все частицы менее 70 мкм) является сепаратор, предложенный Харламовым Е.В. [117]. Принцип разделения в этом аппарате отличается от принципа работы чисто центробежных воздушно-проходных сепараторов, в

которых используются законы газодинамики. Однако для тонких продуктов такие сепараторы не применяются, ввиду весьма низкой производительности и эффективности.

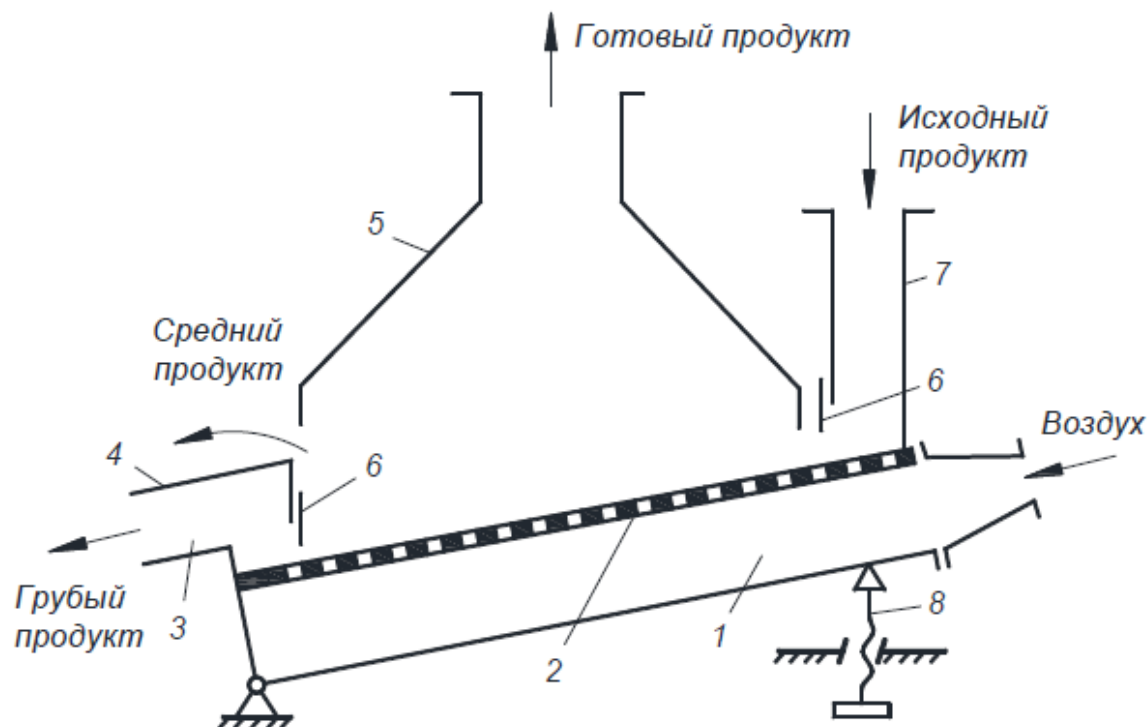


Рисунок 2.7 – Классификатор с кипящим слоем: 1 – воздухораспределитель; 2 – перфорированная перегородка; 3 – патрубок вывода крупки; 4 – патрубок промежуточной фракции; 5 – патрубок вывода готового продукта; 6 – регулировочное устройство; 7 – патрубок подачи исходного продукта; 8 устройство регулирования угла наклона перфорированной решетки

Для повышения эффективности классификации и увеличения производительности установок иногда применяют последовательное соединение нескольких аппаратов. Однако такая компоновка, как правило, приводит к росту энергозатрат на производство готового продукта.

В работе автора А.М. Агаркова [119] был предложен инерционный пылеконцентратор с регулируемыми параметрами (рисунок 2.8). Для управления процессом разделения дисперсных частиц в воздушном потоке предусмотрено одновременное перемещение жалюзийных элементов поперек корпуса в диапазоне от 0 до величины a , а также вращение вокруг своих осей жалюзийных элементов в

диапазоне от 0° до 180° . Варьируя параметры α° и a , можно в широких пределах изменять дисперсность продукта на выходе из пылесадителя.

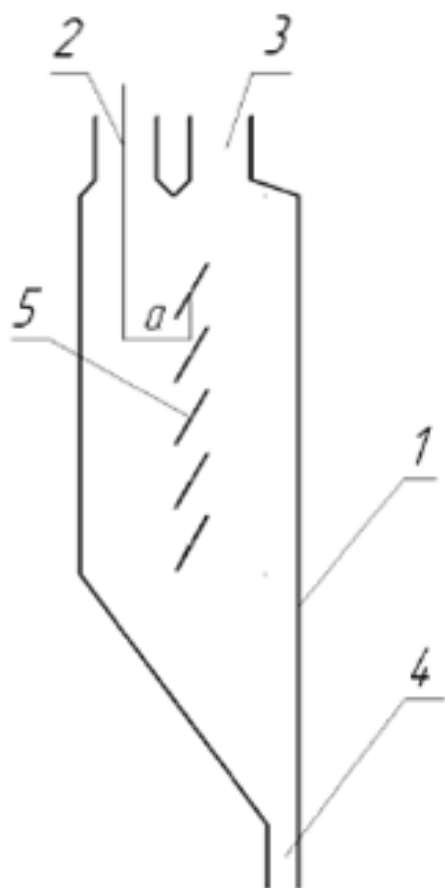


Рисунок 2.8 – Инерционный пылеконцентратор: 1 – корпус, 2 – патрубок подвода, 3 – патрубок вывода тонкого материала, 4 – патрубок вывода грубой фракции, 5 – жалюзийные элементы

Таким образом, анализ конструкций для классификации тонкодисперсных порошков показывает, что для получения цемента требуемого качества наиболее эффективно применение современных динамических сепараторов последнего поколения. Однако полная замена существующего оборудования связана со значительными капитальными затратами. В качестве экономически обоснованного решения для повышения эффективности классификации без глубокой модернизации может быть рассмотрена установка дополнительного инерционного пылеконцентратора. Такой подход позволяет повысить общую производительность системы без роста энергозатрат.

В целях совершенствования технологических процессов разделения цемента в рамках данного исследования для **классификации материала** предложено

использование **аэродинамического комплекса**, лабораторная установка которого базируется в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортных и дорожных машин» БГТУ им. В.Г. Шухова. Для удобства восприятия конструктивных особенностей и сути работы аэродинамического комплекса в контексте со сравнительными результатами по разделению цемента, схема и описание процессов, протекающих в аппаратах аэродинамического комплекса представлены в главе 4.1.

На способ классификации тонкодисперсных порошков с применением данного аэродинамического комплекса получен патент РФ [120]. Комплекс включает: сепаратор; концентратор; осадительные циклоны; зернистый фильтр; расходомерное устройство; центробежный вентилятор; рециркуляционный газоход; жидкостный дифференциальный манометр; установка жидкостных дифференциальных манометров. На инерционный пылеконцентратор также получен патент РФ [121]. В диссертационной работе А.М. Агаркова [119] представлено детальное описание инерционного пылеконцентратора, включающее принцип действия, методы регулировки и методику подбора параметров для эффективной работы устройства.

2.2 Математический аппарат, используемый для анализа процессов классификации и рециркуляции

Метод планирования эксперимента. Для настройки лабораторного аэродинамического комплекса и прогнозирования его эффективности использовали центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП 2^4) полного факторного эксперимента (ПФЭ), с помощью которого проводился подбор режимом [122]. В качестве независимых факторов были приняты:

x_1 – расход сепарационного воздуха, Q м³/ч;

x_2 – частота вращения ротора сепаратора, n_p об/мин;

x_3 – наклон лопастей концентратора, град α_l ;

x_4 – ширина камеры рабочей зоны концентратора, a мм.

Метод оценки эффективности процесса классификации. Для оценки эффективности процесса разделения широко применяется кривая Тромпа. Данная зависимость графически отражает селективность (избирательность) работы сепаратора в зависимости от размера частиц. Под селективностью понимается доля материала определённой фракции (крупности), направляемая в поток возврата (в технологии цемента – это крупка). Построение и анализ кривой Тромпа считаются наиболее информативным подходом для оценки и оптимизации работы сепарационного оборудования.

Методика построения кривой Тромпа включает отбор и анализ трёх ключевых проб: исходного питания сепаратора, готового продукта и фракции возврата (крупки). Каждая проба подвергается гранулометрическому анализу, по результатам которого определяется количественное содержание частиц в заданных интервалах крупности.

Теоретические основы и фундаментальные свойства функций фракционного разделения подробно исследованы в работах ряда авторов, таких как М.Д. Барский [123], В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков и Н.И. Зверева [124]. В научной литературе представлено множество математических моделей для описания и аппроксимации кривой Тромпа [125].

В качестве примера можно привести исследование [126], в котором функции селективности аппроксимируются с помощью различных двухпараметрических законов распределения. К числу наиболее удачных и часто применяемых аппроксимаций относятся функция Плитта, Розина–Раммлера, Линча, нормально-логарифмический закон распределения:

1) аппроксимация Плитта

$$\Phi_M(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^p}; \quad (2.1)$$

2) модифицированная аппроксимация Розина–Раммлера

$$\Phi_M(x_i) = \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^p\right); \quad (2.2)$$

3) функция Линча

$$\Phi_M(x_i) = \frac{e^{p-1}}{e^{pt} + e^{p-2}}, \quad (2.3)$$

где $t = \frac{x_i}{x_{50}}$;

4) нормально-логарифмический закон

$$\Phi_M(x_i) = (1 - \frac{p}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{p^2}{2} \ln^2 t} dt). \quad (2.4)$$

В используемых аппроксимациях параметр x_{50} представляет собой границу разделения – размер частиц, при котором материал распределяется поровну между крупным и мелким продуктами.

Параметр p характеризует крутизну кривой Тромпа и служит количественной мерой четкости разделения. Определение этих двух параметров фактически позволяет установить аналитический вид самой функции селективности, а следовательно – и рассчитать полные результаты процесса разделения: определить выходы продуктов и их гранулометрический состав.

Таким образом, знание функции фракционного разделения дает возможность не только прогнозировать результаты процесса, но и объективно оценивать эффективность работы конкретного сепаратора. В настоящее время разработано значительное количество критериев эффективности, базирующихся на анализе кривых селективности, систематизация которых представлена в работах, например, М.Д. Барского [123]. Наибольшее распространение в практике, благодаря своей простоте и удобству применения, получил точечный критерий Эдера–Майера.

$$k_{75/25} = \frac{x_{75}}{x_{25}} 100 \%. \quad (2.5)$$

где: x_{25} , x_{75} – размеры частиц, соответствующие на кривой Тромпа селективности извлечения в готовый продукт, равные 25 и 75 %, соответственно.

В рамках данного исследования для оценки эффективности процесса классификации применялся метод анализа кривой Тромпа ввиду его наглядности, информативности и способности количественно описывать как границу разделения (x_{50}), так и классификации продукта (через параметр p и/или соотношение x_{75}/x_{25}). Данный подход позволяет не только объективно оценить разделение продукта, но и прогнозировать гранулометрический состав продуктов классификации, что

является ключевым для оптимизации технологического режима в замкнутом цикле помола цемента.

2.3 Сырьевые материалы и методы исследования

Сырьевые материалы. Исходный материал (после мельниц), подвергнутый анализу на предмет оценки эффективности действующего на цементных заводах оборудования и процессов классификации и разделения, был получен от 6 предприятий-партнёров, специализирующихся на производстве цемента (кодированное обозначение предприятий, по согласованию с которыми они не разглашаются, приведено в главе 3.2). В результате анализу подвергались цементы следующих классов: ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н, ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н, ЦЕМ II/А-И 42,5Н.

В качестве контрольного цемента для отладки работы аэродинамического комплекса использовали цемент ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»», г. Сланцы, Сланцевский район, Ленинградская обл. (ГОСТ 31108–2020 [120]).

Согласно сертификату соответствия – это цемент типа ЦЕМ II подтипа В со шлаком (Ш) от 21 % до 35 %, класса прочности 42,5, нормальнотвердеющий.

Химический состав пробы цемента представлен в таблице 2.1. Согласно данным анализа, основными компонентами являются CaO (56,8 %), SiO₂ (24,3 %) и Al₂O₃ (6,08 %). Наряду с ними в составе присутствуют MgO (4,32 %), SO₃ (3,1 %), Fe₂O₃ (2,67 %), а также щелочные оксиды (суммарно R₂O – 0,75 %, включая Na₂O – 0,16 % и K₂O – 0,88 %). Потери при прокаливании составляют (п.п.п. – 1,26 %), содержание хлоридов Cl ~ 0,02 %.

Минеральный состав цемента, соответствует требованиям (таблица 2.2).

Согласно действующему российскому стандарту ГОСТ 31108-2020 [125] удельная поверхность для цемента типа ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н не является нормируемым показателем. Значение удельной поверхности, определяем по ГОСТ 310.2-76 [126], может указываться производителем в паспорте качества как

справочное. Для цементов данного типа типичный диапазон составляет 300–380 м²/кг.

Таблица 2.1 – Химический состав пробы цемента ЦЕМ II/В-III 42,5Н

Оксиды	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п.	Cl
Содержание, %	24,3	6,08	56,8	2,67	4,32	0,75	3,1	0,16	0,88	1,26	0,02

Таблица 2.2 – Минеральный состав цемента

Минерал	Формула	Содержание, %
Алит	C ₃ S	1,89
Белит	C ₂ S	68,24
Алюминат	C ₃ A	11,59
Феррит	C ₄ AF	8,12
Итого	–	89,84

Измерение удельной поверхности на приборе ПСХ показало, что проба, прошедшая через аэродинамический комплекс, имеет удельную поверхность $S_{уд} = 355$ м²/кг, что соответствует ожидаемому диапазону для данного типа цемента.

Методика проведения оценки эффективности классификации цемента.

Материал, поступивший с 6 заводов-партнеров, был изначально взвешен и разделен на одинаковые пробы для проведения эксперимента в лабораторном комплексе.

Исследуемая проба подавалась в сепаратор, где осуществлялась первичная классификация материала по крупности. Фракция частиц размером более 80 мкм (крупка) направлялась на повторный помол, в то время как тонкодисперсная фракция (0–80 мкм) поступала в концентратор через соединительный патрубок. В концентраторе происходит дополнительное разделение: готовый продукт (частицы

≤ 45 мкм) направлялся в циклон, где осуществлялось его выделение и сбор в качестве конечного продукта. Крупная фракция (> 45 мкм), выделенная в концентраторе, возвращается в сепаратор для повторной классификации. Поток воздуха, выходящий из циклона, по патрубку подается во внешний зернистый фильтр, предназначенный для доочистки воздуха от остаточного продукта. Очищенный газ затем возвращается в сепаратор с помощью выносного центробежного вентилятора, обеспечивая замкнутую рециркуляцию газовой фазы и устойчивую работу всего комплекса.

В такой конфигурации комплекса поток материала после сепаратора направляется в концентратор, где происходит дополнительная тонкая классификация. Крупная фракция, не соответствующая требованиям к готовому продукту, возвращается в сепаратор для повторного разделения, в то время как целевая фракция (преимущественно 5–30 мкм) направляется непосредственно в циклон для окончательного сбора и вывода из технологического цикла.

Методы анализа. Исследование материала осуществлялось с использованием общепринятых в строительном материаловедении физико-химических и физико-механических методов анализа. Экспериментальные работы проводились как на сертифицированном и аттестованном высокотехнологичном оборудовании в соответствии с действующими нормативными документами, так и на специально разработанном лабораторном аэродинамическом комплексе, созданном для классификации тонкодисперсных порошков. Все полученные экспериментальные данные были подвергнуты корректной статистической обработке с целью обеспечения достоверности результатов.

Традиционным методом *контроля однородности и дисперсности сыпучих материалов* является ситовый анализ. Данный вид анализа регламентируется ГОСТ 310.2-76 [126].

Также *гранулометрический анализ* проводился при помощи лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec Plus Fritsch в диапазоне от 0,01 до 2000 мкм.

Для определения *удельной поверхности* использовался прибор BELSORP-miniX (MicrotracBEL Corp.) по методам БЭТ и Баррета-Джойнера-Халенды (BJH) [127].

Проведённый сравнительный анализ нормативных требований к тонкости помола цемента в разных странах и регионах (таблица 2.3), показал существенные различия как в методах контроля, так и в установленных предельных значениях.

Таблица 2.3 – Нормативные требования к тонкости помола цемента в мире

Стандарт	Регион	Метод испытания	Требования	Год принятия
ГОСТ 310.2-76	Россия	Ситовый анализ	Остаток на сите 80 мкм \leq 12 %	1976 (изм. 1984)
JIS R 5201	Япония	Блейн	Удельная поверхность \geq 260 м ² /кг	2015
EN 196-6	Европа	Блейн, ситовый анализ	Остаток на сите 90 мкм \leq 10 %	2018
ASTM C204-18e1	США	Блейн	Удельная поверхность 280–420 м ² /кг	2018
IS 4031	Индия	Блейн, ситовый анализ	Остаток на сите 90 мкм \leq 10 %	2021

В России до сих пор действует ГОСТ 310.2-76 [126], который был принят в 1976 г., а изменения в него внесли в 1984 г., предусматривающий исключительно ситовой анализ с допуском остатка на сите 80 мкм до 12 %. Такой подход менее чувствителен к изменениям в тонкодисперсной области (0–30 мкм), критически важной для формирования прочности цементного камня. Более того, использование контрольного сита с более крупными ячейками (80 мкм вместо 90 мкм, как в международных стандартах) формально ужесточает требования, однако

отсутствие контроля удельной поверхности не позволяет объективно оценить качество помола и его соответствие современным технологическим и эксплуатационным требованиям.

В Японии (JIS R 5201), европейских странах (EN 196-6), США (ASTM C204-18e1) и Индии (IS 4031) основным методом оценки тонкости помола является определение удельной поверхности по методу Блейна, что отражает современные тенденции к более точной характеристике дисперсности цемента. При этом требования к количеству варьируются: например, в Японии – минимальное значение $2600 \text{ см}^2/\text{г}$ (что эквивалентно $260 \text{ м}^2/\text{кг}$), в США установлен диапазон $280\text{--}420 \text{ м}^2/\text{кг}$, а в Европе и Индии акцент сделан на ситовом остатке – не более 10 % на сите с отверстиями 90 мкм.

Таким образом, российская нормативная база в части оценки тонкости помола цемента отстаёт от мировой практики и требует актуализации – в частности, внедрения комплексного подхода, сочетающего как ситовой анализ, так и определение удельной поверхности по методу Блейна, что позволит повысить сопоставимость качества отечественной продукции с международными аналогами и обеспечить более точное управление свойствами цемента на этапе производства. Необходимо отметить, что в последние годы производители цемента уделяют особое внимание контролю удельной поверхности, для чего приобретается специализированное оборудование. Это подтверждается полученными от предприятий-партнеров статистическими данными, контролируемые на регулярной основе (так, на некоторых предприятиях такой контроль начался лишь в середине 2025 г.).

Таким образом, можно увидеть, что не один из ГОСТов из таблицы 2.3 не регламентирует фракционный размер цемента, а только регламентирует остаток на сите и удельную поверхность.

В работе Пироцкого В.З. [128] были приведены данные, где представлены параметры зернового состава, прочностные свойства цемента, удельные энергозатраты для технологических схем измельчения (ТСИ) типа одностадийной системы «Трубная мельница – динамический сепаратор» («ТМ-СД») (таблица 2.4).

Таким образом, Пироцкий В.З. наглядно демонстрируют наличие корреляционной зависимости между гранулометрическим составом, удельной поверхностью и прочностью цемента, что указывает на ограниченность нормативного подхода и необходимость более глубокого анализа дисперсности для оптимизации технологии.

Таблица 2.4 – Параметры зернового состава, прочностные свойства цемента и удельные энергозатраты для ТСИ «ТМ-СД» [128].

Наименования показателя	Усл. обозн.	Ед. изм.	Удельная поверхность, $S_{уд}$, м ² /кг								
			270	300	320	350	380	400	420	450	500
Коэффициент равномерности	n	–	0,80	0,85	0,90	0,95	0,98	1,02	1,05	1,1	1,12
Характеристический размер	d'	мкм	30,6	27,4	25,8	23,4	21,2	19,9	19,0	17,6	15,5
Содержание фракции:											
+5–30 мкм	R_5D_{30}	%	41,7	45,0	47,7	51,2	53,4	55,6	58,3	61,2	64,4
–5 мкм	D_5		20,0	20,0	20,4	20,6	22,5	21,8	22,0	22,5	24,0
+85 мкм	R_{008}		10,4	7,3	5,4	3,3	2,9	1,2	0,8	0,3	0,1
+45 мкм	R_{004}		25,6	27,8	19,2	15,5	15,0	10,0	8,0	6,0	3,7
Отношение фракции: +5–30/–5	$\frac{R_5D_{30}}{D_5}$	–	2,0	2,1	2,3	2,5	2,55	2,6	2,7	2,8	2,7
Прочность на сжатие:											
2 сут.	$R_{сж2}$	МПа	17	20	22	25	27	30	32	35	37
28 сут.	$R_{сж28}$		35	40	45	50	55	60	65	70	72

Наименования показателя	Усл. обозн.	Ед. изм.	Удельная поверхность, $S_{уд}$, м ² /кг								
			270	300	320	350	380	400	420	450	500
Удельные энергозатраты на измельчение	$\mathcal{E}_{изм.}$	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$	30	33	35	38	41	43	46	49	55

Таким образом, проведенный анализ применяемых стандартов и методов испытаний подтверждает, что действующая нормативная база (ГОСТ, EN) регламентирует марку цемента прежде всего по прочностным показателям, а также в качестве критерия оценки используется удельная поверхность и остаток на контрольном сите. При этом полный гранулометрический состав материала в стандартах не нормируется. Важность контроля фракционного состава, определяющего реакционную способность цемента, подтверждается исследованиями ряда авторов. В частности, данные Пироцкого В.З. наглядно демонстрируют наличие корреляционной зависимости между гранулометрическим составом, удельной поверхностью и прочностью цемента, что указывает на ограниченность нормативного подхода и необходимость более глубокого анализа дисперсности для оптимизации технологии.

2.4 Выводы

1. Проведенный анализ процесса развития технологий классификации показал произошедшую эволюцию от простых гравитационных аппаратов (отстойные газоходы, статические сепараторы) к высокоэффективным динамическим сепараторам, использующим центробежную силу. Наиболее совершенные модели 2-го и 3-го поколений позволяют независимо регулировать параметры, обеспечивая высокую селективность и снижение энергозатрат. Это стало основанием для выбора в качестве технологического решения установки

дополнительного инерционного пылеконцентратора. Такой подход позволяет повысить общую производительность системы без роста энергозатрат.

2. Для оптимизации и подбора режима работы аэродинамического комплекса применяли метод математического планирования эксперимента (ЦКРП), который позволяет выявить влияние ключевых технологических факторов (расход воздуха, частота вращения ротора и др.) на качество классификации. Для объективной оценки эффективности классификации применялся критерий Эдера–Майера который соответствует кривой Тромпа для размера частиц x_{25} , x_{75} .

3. В качестве сырья для отладки работы аэродинамического комплекса использовался цемент марки ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н, полученный с предприятия ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»». Анализ применяемых стандартов и методологии подтверждает, что действующая нормативная база (ГОСТ, EN) регламентирует марку цемента прежде всего по прочностным показателям, используя в качестве критерий удельную поверхность и остаток на контрольном сите. При этом полный гранулометрический состав материала в стандартах не нормируется. Важность контроля фракционного состава, определяющего реакционную способность цемента, подтверждается исследованиями ряда авторов. В частности, данные Пироцкого В.З. наглядно демонстрируют наличие корреляционной зависимости между гранулометрическим составом, удельной поверхностью и прочностью цемента, что указывает на ограниченность нормативного подхода и необходимость более глубокого анализа дисперсности для оптимизации технологии.

4. Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в данной работе, проводились в лабораториях с применением оборудования кафедр «Подъёмно-транспортных и дорожных машин», «Механического оборудования», а также при использовании лабораторной базы Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Контроль проб осуществлялся современными методами анализа: ситовым анализом, лазерной гранулометрией, анализом удельной площади поверхности и др.

3 КИНЕТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Современное цементное производство сталкивается с необходимостью одновременного решения нескольких взаимосвязанных задач: повышения качества продукции, снижения энергозатрат и минимизации экологической нагрузки. Одним из ключевых этапов, определяющих эффективность всего технологического цикла, является процесс классификации (разделения) измельчённого материала в замкнутом помольном контуре. Несмотря на широкое применение динамических сепараторов, анализ промышленных данных свидетельствует о существенных недостатках традиционных схем: значительная доля готового продукта возвращается на повторный помол, что приводит к переизмельчению, росту удельного энергопотребления и снижению производительности оборудования.

3.1 Теоретическое обоснование повышения эффективности процесса классификации цемента путем использования аэродинамического комплекса

На основе анализа технологических процессов производства цемента (рисунок 3.1) предложена обобщённая схема, иллюстрирующая роль *состава* – как интегрального фактора, определяющего качество цемента, рассматриваемого как конечного продукта, являющегося самостоятельным видом (или разновидностью) 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.

Химический и минеральный состав цемента закладываются на первом этапе технологического процесса – при добыче, измельчении и подготовке сырьевой смеси.

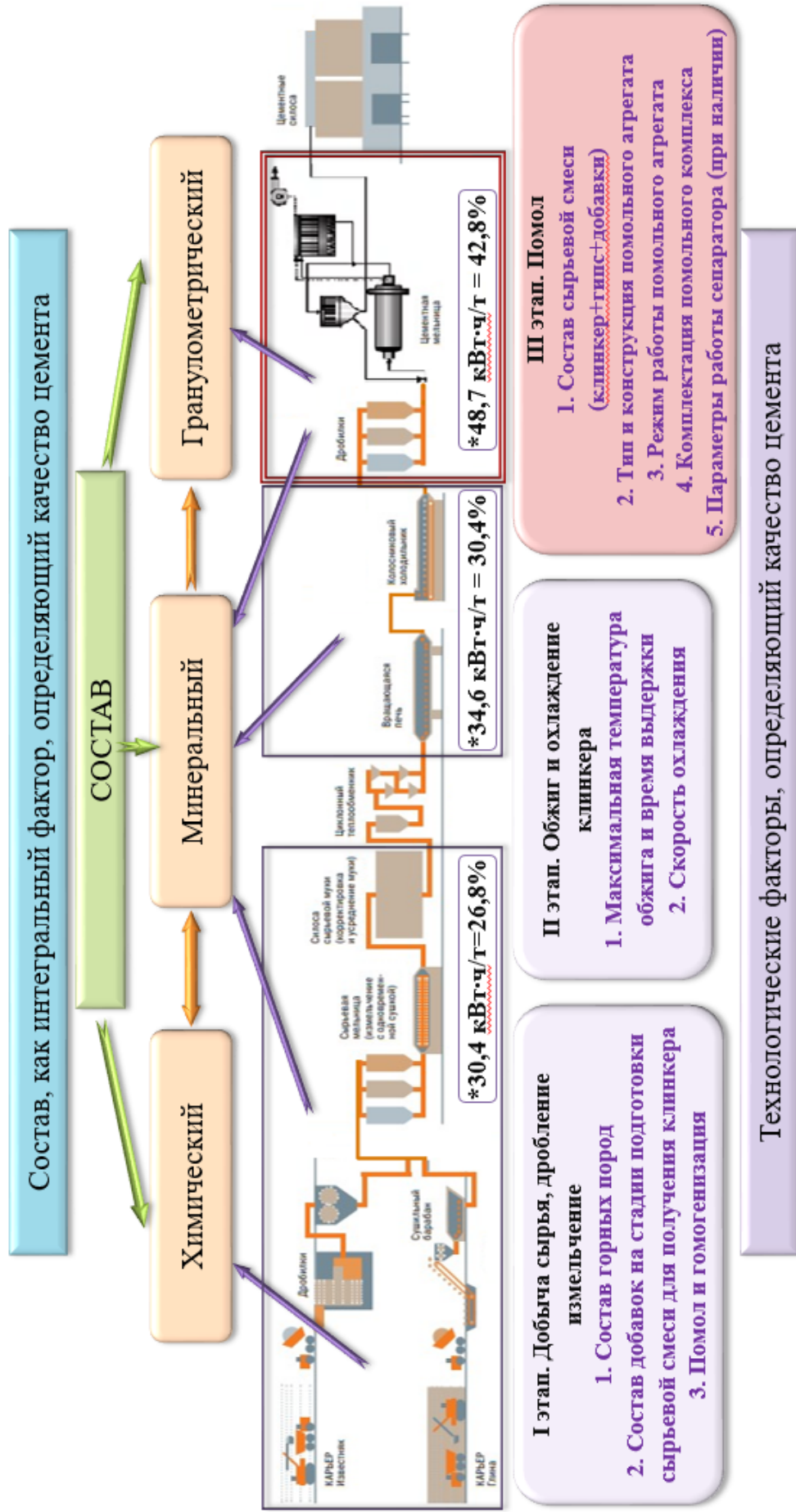


Рисунок 3.1 – Обобщённая схема взаимосвязи состава, как интегрального фактора, с ключевыми этапами производства цемента, влияющими на свойства готового продукта (* – оценка энергопотребления по данным

На этом этапе решающее значение имеют правильный подбор и дозирование сырьевых компонентов (карбонатных и глинистых пород, корректирующих добавок), а также обеспечение их гомогенизации. От правильности выбора исходных горных пород, т.е. минерального состава, и точности химического состава (при необходимости корректируемого добавками) сырьевой шихты напрямую зависит возможность получения клинкера с заданным минеральным составом и, как следствие, требуемыми свойствами цемента.

Минеральный состав клинкера формируется на втором этапе – в процессе обжига и последующего охлаждения. Основными управляющими параметрами здесь являются максимальная температура обжига (обычно 1450–1500 °С), продолжительность выдержки материала в зоне спекания, а также скорость и режим охлаждения клинкера. Эти факторы определяют количественное соотношение основных клинкерных минералов (алит, белит, трёхкальциевый алюминат, четырёхкальциевый алюмоферрит), что в конечном итоге влияет на кинетику помола клинкера, кинетику гидратации цемента, прочностные характеристики и долговечность цементного камня.

Минеральный и гранулометрический состав цемента формируется на третьем этапе – в процессе помола клинкера совместно с гипсом и (при необходимости) минеральными добавками.

При прочих равных химическом и минеральном составах, наиболее значимые изменения в потребительских свойствах цемента происходят на третьем этапе – на стадии помола клинкера с добавками и последующей классификации. Именно **гранулометрический состав** готового продукта в значительной степени определяет удельную поверхность, реологические характеристики цементного теста и бетонной смеси, скорость набора прочности и конечные эксплуатационные показатели бетона [129].

Помимо этого, как известно, основные затраты электроэнергии при производстве цемента приходятся на помол сырьевой смеси (основу которой составляет клинкер) при получении цемента. Согласно данным компании Christian

Pfeiffer (рисунок 3.2), которая более 80 лет занимается поставками оборудования для цементных предприятий [130], результаты оценки расхода электроэнергии при производстве цемента показали, что общее энергопотребление составляет 116,6 кВт·ч на тонну цемента. В данные значения энергопотребления входят такие этапы, как: добыча сырья; подготовка сырья; помол сырья; производство клинкера; помол цемента и отгрузка. При этом самый энергозатратный этап – это помол цемента, на который приходится 48,7 кВт·ч/т, что составляет более 40 % от общего энергопотребления.

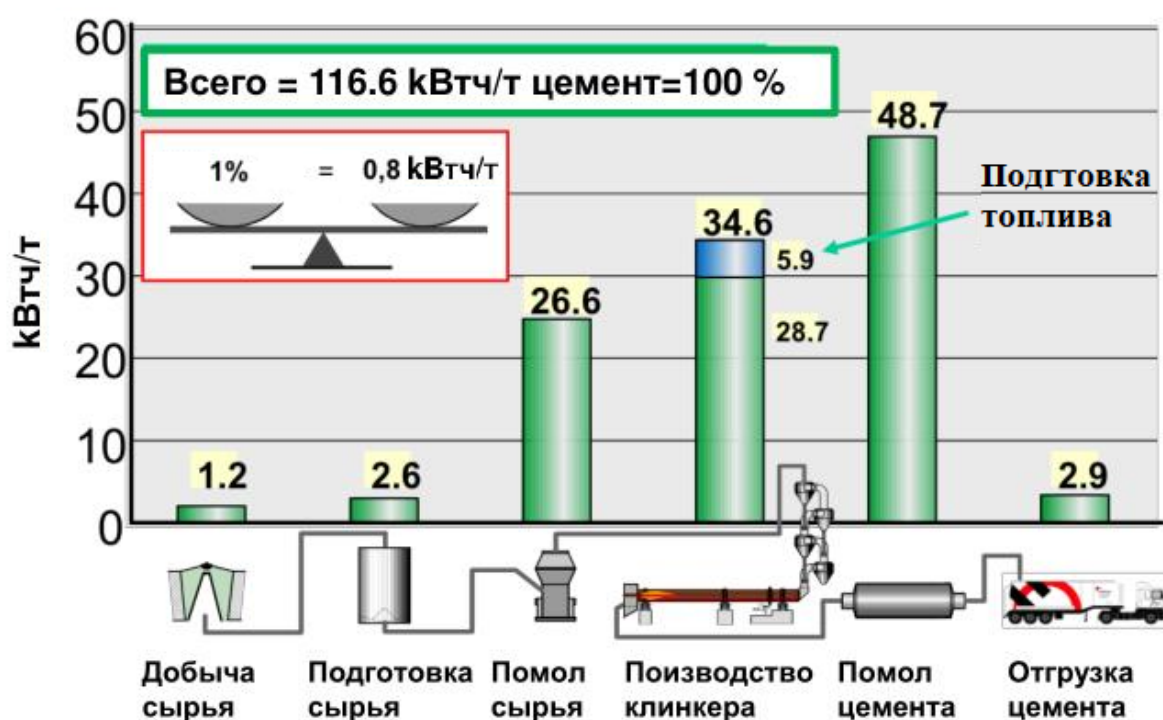


Рисунок 3.2 – Затраты электроэнергии при производстве цемента, представленные компанией Christian Pfeiffer [130]

Таким образом, третий технологический этап, представленный на рисунке 3.1, по расходу электроэнергии является самым энергозатратным, что подчеркивает необходимость оптимизации технологических процессов именно данного этапа производства цемента для повышения энергоэффективности производства в целом.

В связи с этим в рамках настоящей работы рассмотрено совершенствование процессов тонкого измельчения и воздушной классификации цемента.

Проведённый анализ научной литературы позволил выявить ключевые

проблемы и актуальные задачи, стоящие перед исследователями в области технологии производства цемента в замкнутом цикле, а также в сфере получения тонкодисперсных порошков. Результаты обобщены и представлены в виде технологических проблем и возможных путей их решения (рисунок 3.3). Реализация предложенных подходов способна повысить эффективность цементного производства, снизить удельный расход электроэнергии и, как следствие, уменьшить углеродный след. Среди технологических проблем, которые снижают эффективность и повышают энергоёмкость процесса классификации цемента необходимо выделить:

1. Попадание готового продукта в крупку – это явление указывает на недостаточную селективность системы классификации (сепарации) внутри мельничного агрегата. В результате частицы, уже соответствующие требуемому гранулометрическому составу, повторно поступают в зону помола, что ведёт к избыточному измельчению, увеличению энергозатрат и снижению общей производительности цикла.

2. Высокая энергоёмкость процесса помола в замкнутом цикле, несмотря на его преимущества в получении более однородного продукта, характеризуется значительным потреблением электроэнергии. Это связано как с необходимостью многократной переработки материала, так и с работой вспомогательного оборудования – сепараторов, вентиляторов, транспортирующих систем.

3. Нестабильный гранулометрический состав готовой продукции. Колебания в дисперсности цемента могут возникать вследствие изменений в работе сепаратора, колебаний влажности или зернового состава исходного клинкера, а также из-за неравномерной загрузки мельницы. Такая нестабильность негативно сказывается на качестве цемента и конечных прочностных характеристиках бетона.

4. Экологические проблемы – это когда выделением пыли, шумом и вибрацией, создаётся риски как для окружающей среды, так и для здоровья персонала. Кроме того, высокое энергопотребление косвенно способствует увеличению углеродного следа производства.

ПРОБЛЕМЫ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ ПОМОЛА		
ПРОБЛЕМЫ	СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ	РЕЗУЛЬТАТ
Неоптимальный гранулометрический состав материала, подаваемого в сепаратор	Стабилизация параметров помола Предварительная классификация сырья	Увеличение доли целевых фракций 5–30 мкм на 15–20 % Снижение вариативности качества подачи материала на 25 % Повышение стабильности технологического процесса
Низкая эффективность сепарации	Применение сепараторов нового поколения Применение комплекса аппаратов для классификации	Снижение возврата крупки с 36 % до 3–7 % Уменьшение переизмельчения на 25 % Повышение четкости классификации на 35 %
Неоптимальные режимные параметры сепаратора	Автоматизация регулирования параметров Внедрение АСУ ТП*	Снижение колебаний скорости ротора на 60 % Стабилизация воздушного потока в пределах ± 5 %
Высокая энергоёмкость процесса сепарации	Оптимизация кратности рециркуляции материала Совершенствование аэродинамики трубопровода	Снижение удельного энергопотребления на 5–7 кВт·ч/т Уменьшение циркуляционной нагрузки на 20–30 % Сокращение затрат на электроэнергию на 15–20 %
Нестабильное качество готовой продукции	Совершенствование технологии сепарации Многостадийная классификация Постоянный контроль качества	Соответствие гранулометрии стандартам на 98 %
Экологические проблемы	Герметизация системы Совершенствование аспирации Использование рециркуляции газов	Снижение пылевыведений на 70–80 % Уменьшение выбросов CO ₂ на 20–25 % Соответствие экологическим нормативам на 100 %
Высокие эксплуатационные затраты	Применение износостойких материалов Внедрение системы ППР** Оптимизация техобслуживания	Увеличение межремонтного периода на 40 % Снижение затрат на ремонт на 25–30 % Повышение коэффициента технического использования до 0,95

* АСУ ТП – автоматические системы управления технологическими процессами

** ППР – планово-предупредительный ремонт

Рисунок 3.3 – Проблемы и способы повышения эффективности классификации цемента в замкнутом цикле помола

Для решения существующих технологических проблем в процессе помола цемента и достижения устойчивого положительного результата предлагается реализовать комплекс взаимосвязанных мер, направленных на оптимизацию работы сепарационного узла. В их числе:

- повышение производительности сепаратора за счёт улучшения селективности разделения частиц по крупности;
- снижение удельного расхода электроэнергии на помол за счёт минимизации переизмельчения и оптимизации циркуляционных потоков;
- исключение или значительное сокращение возврата готового тонкодисперсного продукта в мельницу, что в традиционных схемах приводит к неоправданному перемалыванию уже соответствующего требованиям материала, увеличению времени пребывания в цикле и снижению общей эффективности процесса;
- снижение пылевыведения в зоне классификации за счёт герметизации потоков и более точного контроля аэродинамических параметров.

Анализ причин, приводящих к неэффективному разделению дисперсного вещества в существующей технологической системе «сепаратор + циклон» (таблица 3.1), показал, что помимо возможной неточной регулировки оборудования в части сепаратор, основной причиной поступления высокодисперсного вещества в составе крупки на домол является ортокинетический эффект [131, 132]. Данный эффект (рисунок 3.4) заключается в том, что крупные частицы становятся центром притяжения и утягивают за собой частицы более мелкого размера, уже являющиеся готовым продуктом.

Предлагается, что указанный комплекс мер может быть реализован в виде единого технологического решения (аэродинамического комплекса) – путём установки концентратора между основным сепаратором и циклоном. В такой конфигурации поток материала после сепаратора будет направляться в концентратор, где происходит дополнительная тонкая классификация. Крупная фракция, не соответствующая требованиям к готовому продукту, будет возвращаться в сепаратор для повторного разделения, в то время как целевая

фракция (преимущественно 5–30 мкм) – направляться непосредственно в циклон для окончательного сбора и вывода из технологического цикла.

Таблица 3.1 – Причины, приводящих к неэффективному разделению дисперсного вещества в существующей технологической системе «сепаратор + циклон»

Работа динамического сепаратора	Работа циклона	Взаимодействие системы в целом	Свойства материала	Технологические и эксплуатационные причины
Неточные регулировки	Низкая эффективность улавливания (5–20 мкм)	Несбалансированность аэродинамических режимов	Высокая влажность материала	Отсутствие или неисправность систем автоматического контроля и регулирования
Конструктивные особенности	Материал проскакивает, минуя зону эффективного осаждения	Некорректная рециркуляция	Наличие сильно обожженного (пережженного) клинкера	Нерегулярное или неполное техническое обслуживание
Механические проблемы и износ оборудования	Осевшие на стенках тонкие частицы могут быть вынесены в патрубок вывода воздуха в фильтр или вентилятор	Негерметичность системы	Изменение гранулометрического состава подаваемого материала	Попытка работать на производительности, значительно превышающей паспортную мощность оборудования
	Неправильно подобранная конструкция входных / выходных патрубков	Некорректная работа системы подачи материала	Высокая тонкость подаваемого целевого продукта	
	Механические проблемы и износ оборудования			

При такой организации процесса из основного сепаратора будет отбираться преимущественно тонкая фракция размером 0–80 мкм. Данная фракция содержит наибольшее количество частиц, склонных к коагуляции и агломерации под

действием ортокинетического эффекта в условиях высокой турбулентности потока. Далее тонкий продукт будет направляться в концентратор, где осуществляется более селективное разделение: целевая тонкая фракция (готовая продукция с требуемой удельной поверхностью) отделяется и направляется в циклон для осаждения, после чего материал готов к силосированию, упаковке или отгрузке.



Рисунок 3.4 – Ортокинетический эффект

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. Кроме того, предложенная схема будет способствовать повышению однородности гранулометрического состава готового цемента, что положительно сказывается на его физико-механических характеристиках и стабильности свойств. При этом необходимо отметить, что введение данного аэродинамического комплекса не повлечет изменение в химическом или минеральном составе цемента, а повысит производительность и снизит энергозатраты производства.

Таким образом, **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 однородности гранулометрического состава готового цемента, что повысит производительность и снизит энергозатраты производства.

3.2 Разработка дизайна исследования

Для подтверждения рабочей гипотезы был разработан дизайн эксперимента, включающий как теоретические, так и практические этапы в зависимости от сегмента исследования (рисунок 3.5). Конечным продуктом будет являться аэродинамический комплекс, который будет состоять из сепаратора, концентратора и циклона. Декомпозиция данной исследовательской работы выглядит как три этапа, которые логически продолжают друг друга.

Применение аэродинамического комплекса позволит исключить ортокинетический эффект, который приводит к рециркуляции мелкодисперсного продукта, повысить стабильность гранулометрического состава цемента и снизить энергетические затраты на единицу продукции. Кроме того, более чёткое разделение фаз позволит уменьшить аэродинамическое сопротивление системы и снизить эмиссию пыли в атмосферу рабочей зоны. В совокупности это обеспечит

совершенствование технологического процесса производства цемента в части: роста производительности помольного комплекса, улучшения качества цемента и снижения экологической нагрузки, что соответствует современным требованиям к ресурсо- и энергосберегающим технологиям в цементной промышленности.

Анализ возможного оборудования для технологической схемы аэродинамического комплекса показал, что для повышения производительности без повышения энергозатрат возможно применение концентратора, конструкция которого была предложена авторами [121], но применение одного концентратора для классификации не является эффективным так как конструкция классификатора не позволяет разделять тонкие частицы (менее 50 мкм) в общем потоке материала. В работе [119] описывается процесс очистки запыленного воздуха от тонких частиц (менее 50 мкм) путем использования аналогичного концентратора.

Этап I. Моделирование аэродинамического комплекса с рециркуляцией	
Показатель	Метод
Функции разделения аппаратов	Определение начальной кратности циркуляции расчётом через баланс масс
Матричное моделирование классификации	Построение матриц классификации для сепаратора, концентратора и циклона
Оценка производительности системы	Решение балансовых уравнений
Этап II. Подготовка материала для пропускания через аэродинамический комплекс	
Показатель	Метод
Гранулометрический состав	ГОСТ 310.2-76
Определение удельной площади поверхности	ГОСТ 310.2-76
Разделение на равные пробы	Весы
Этап III. Оценка эффективности классификации и качества продукта полученного через аэродинамический комплекс	
Показатель	Метод
Взвешивание полученной пробы	Весы
Гранулометрический состав	ГОСТ 310.2-76
Определение удельной площади поверхности	ГОСТ 310.2-76
Точность разделение	Расчет по уравнению Тромпа

Этап IV. Подбор настроек для аэродинамического комплекса	
Показатель	Метод
Изменение частоты вращения ротора сепаратора	Частотный преобразователь
Изменение частоты вращения ротора вентилятор	Частотный преобразователь
Наклон лопастей в концентраторе	Ручной инструмент
Ширина камеры рабочей зоны концентратора	Ручной инструмент

Рисунок 3.5 – Декомпозиция дизайна проведения исследования

Таким образом, для эффективной классификации тонкодисперсных материалов в рамках технологического процесса с целью повышения производительности рекомендуется использовать концентратор в комплексе с сепаратором. В такой схеме концентратор выполняет конечную классификацию потока мелких частиц, направленную из зоны действия сепаратора, который обеспечивает классификацию более крупного продукта чем готовый продукт. Такой подход позволяет снизить нагрузку на сепаратор, повысить эффективность классификации и достичь требуемого качества готового продукта при снижении удельного энергопотребления.

Таким образом, в работе для повышения производительности и уменьшения энергозатрат производства цемента за счет доизвлечения из крупки готового продукта предложена схема аэродинамического комплекса с рециркуляцией для классификации продуктов¹, представленная на рисунке 3.6. В данном аэродинамическом комплексе по ходу движения сепарационного воздуха между динамическим сепаратором (1) и циклоном (3) был установлен инерционный концентратор (2), где происходит гравитационное и инерционное осаждение

¹ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: 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.

крупных частиц.

Общая схема работы аэродинамического комплекса, с указанием потоков материала различного гранулометрического состава (R_{ij}) (таблица 3.2), заключается в следующем. В сепаратор (1) подается исходный продукт R_{11} из которого путем изменения настроек сепаратора (скорость вращения ротора и объемный расход воздуха) выходит грубый продукт (R_{31}) размером не более $d=80$ мкм. При этом за счет ортокинетического эффекта крупные частицы, являясь центрами притяжения, увлекают за собой мелкие, уже являющиеся готовым продуктом.

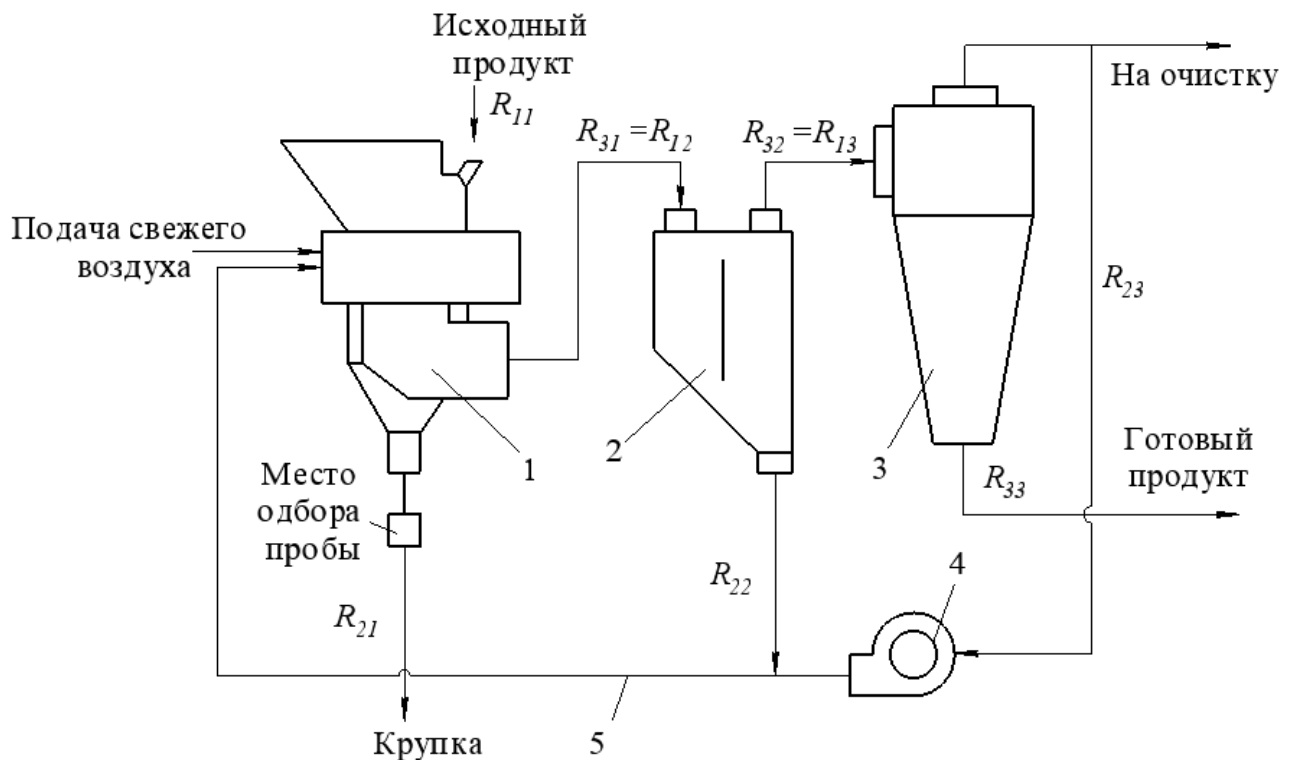


Рисунок 3.6 – Схема аэродинамического комплекса с рециркуляцией:

- 1 – сепаратор; 2 – концентратор; 3 – циклон; 4 – вентилятор;
5 – рециркуляционный газопровод.

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

Продукт, который будет размером $d > 80$ мкм (крупка) уходит из сепаратора на повторный помол (R_{21}), а грубый продукт, который был выделен (R_{31}) пойдет в концентратор (2) (R_{12}). Продукт, который попал в концентратор, за счет бóльшей инерции крупных частиц, превышающих размер готового продукта, выпадает из потока в патрубок возврата сепарационного воздуха (R_{22}), который возвращается в центробежный сепаратор. Материал из концентратора, т.е. выделенный тонкий продукт (R_{32}) в виде пылевоздушного потока, поступает в циклон (3) (R_{13}). В циклоне происходит осаждение пыли в готовый продукт (R_{33}), который выводится. Очищенный воздух (R_{23}) подается с помощью вентилятора (4) обратно в сепаратор по газоходу (5).

Таблица 3.2 – Структура обозначений потоков материала различного гранулометрического состава (R_{ij}) в аэродинамическом комплексе (см. рисунок 3.4)

Обозначения вида продукта в потоке материала		j – аппарат					
		1 – сепаратор		2 – концентратор		3 – циклон	
		поток	вид продукта*	поток	вид продукта*	поток	вид продукта*
i – признак продукта	1 – исходный для j -го аппарата	R_{11}	исходный продукт	R_{12}	грубый продукт	R_{13}	готовый продукт
	2 – грубый для j -го аппарата	R_{21}	крупка	R_{22}	грубый продукт	R_{23}	очищенный воздух
	3 – тонкий для j -го аппарата	R_{31}	грубый продукт	R_{32}	готовый продукт	R_{33}	готовый продукт

* Вид продукта – это наименование материала например, «крупка», «готовый продукт», «очищенный воздух», после его прохождения через сепаратор, концентратор или циклон, что определяет его дальнейший путь в технологической схеме

Ключевым преимуществом предложенной схемы является снижение

циркуляционной нагрузки на мельницу за счёт того, что только действительно недостаточно измельчённый материал возвращается в помол, а не вся фракция, как в традиционных системах. В результате ожидается сокращение удельного расхода электроэнергии на 10–15 %, уменьшение износа оборудования и повышение стабильности работы всего технологического комплекса. Кроме того, повышение энергоэффективности напрямую способствует снижению углеродного следа производства.

Таким образом, показано, что использование аэродинамического комплекса позволит снизить ортогенетический эффект в сепараторе, благодаря чему повысится эффективность классификации тонкодисперсных порошков за счет извлечения из грубого продукта – готового. Такое техническое решение позволит предотвратить повторный помол готового продукта, что уменьшит затраты электроэнергии, износ оборудования и повысит общую производительность технологической линии.

3.3 Анализ гранулометрического состава цемента при разделении в сепараторе в заводских условиях²

В рамках диссертационной работы анализу подвергались статистические данные, которые были получены с заводов-партнеров, которые условно обозначены как *В, О, П, Р, С, К* [129]. Каждый завод предоставил данные:

- по материалу, который выходит из мельницы и подается в сепаратор;
- по готовому продукту, полученному после сепаратора;
- по крупке, которая выходит из сепаратора и отправляется на повторный помол.

При этом важно отметить, что анализу подвергались общестроительные цементы различных марок, которые, согласно классификации ГОСТ 31108-2020,

² Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: *Прокопенко, В.С.* Анализ эффективности классификации цемента в системе замкнутого цикла помола с применением сепаратора / В.С. Прокопенко, В.С. Строкова, Е.А. Поспелова, Д.А. Мишин // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2026. № 1. С. 52-56.

принадлежат по вещественному составу к различным типам [125].

Заводы *В*, *О* и *П* выпускают портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н: завод *В* предоставил усредненные данные за 1 месяц; завод *О* – за 3 месяца; завод *П* – за 1 месяца.

Завод *Р* предоставил усредненные данные по цементу ЦЕМ I 52,5Н за 2 месяца. Завод *С* – по портландцементу со шлаком ЦЕМ II/В-III 42,5Н за 1 год. Завод *К* – по портландцементу с известняком ЦЕМ II/А-И 42,5Н за 2 месяца.

Сравнительный анализ (рисунок 3.7) 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*, *С* и *К* почти половина материала – от 40,1% до 49,6 %, возвращается в виде крупки.

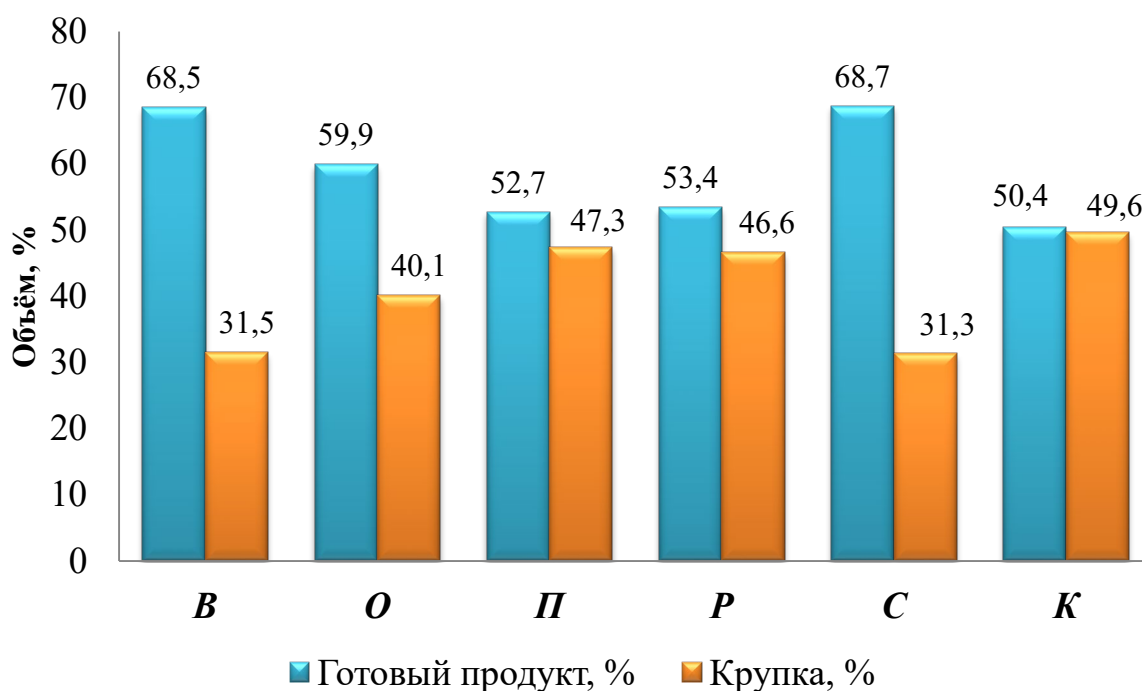


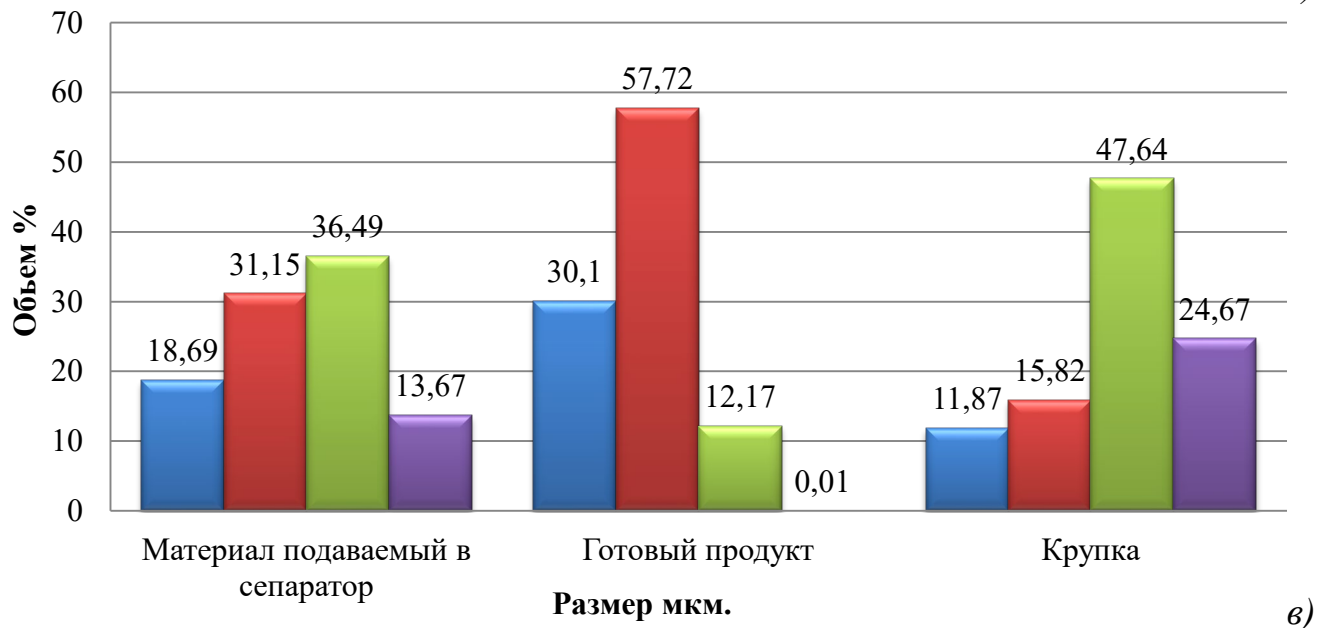
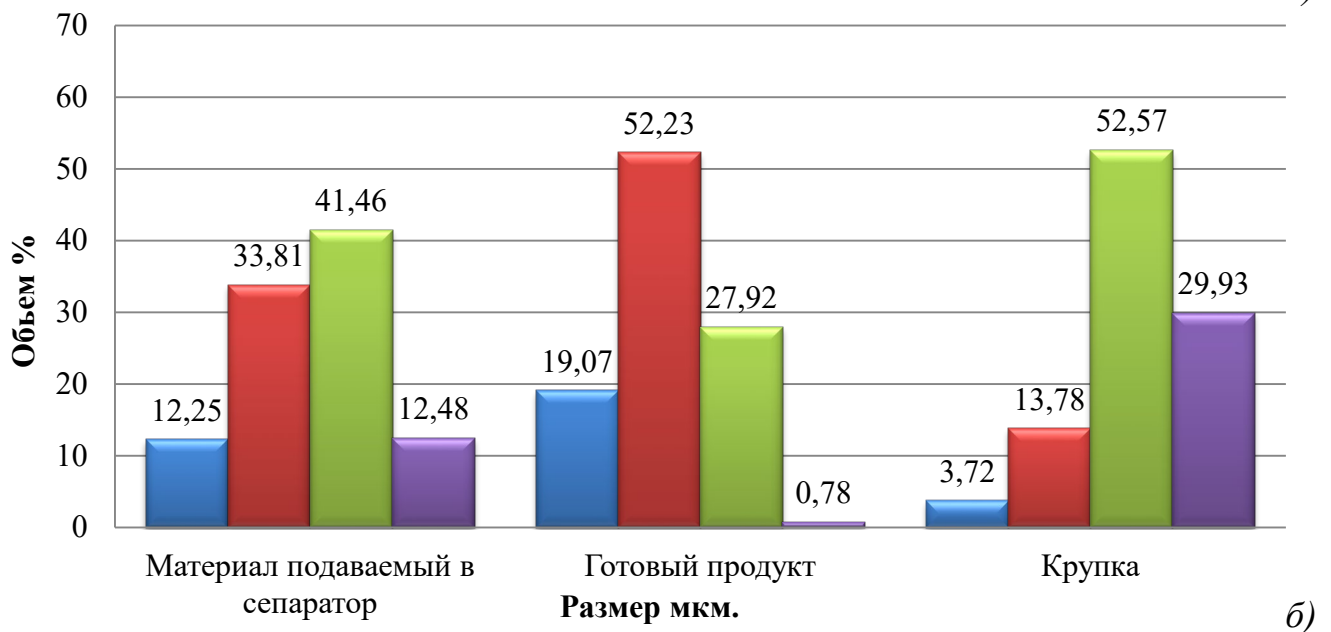
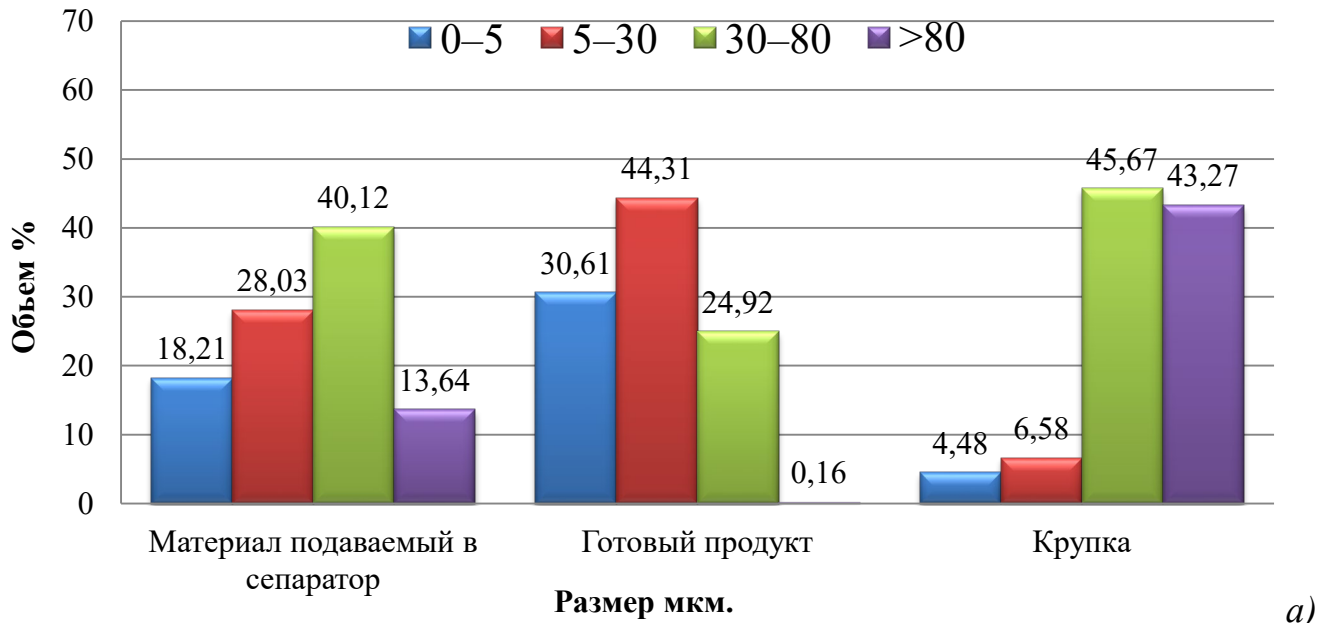
Рисунок 3.7 – Эффективность классификации материала сепаратором на заводах *В*, *О*, *П*, *Р*, *С*, *К*

Систематизированные данные по гранулометрическому составу – объемная доля каждой фракции в зависимости от диаметра частиц (0–5 мкм, 5–30 мкм, 30–80 мкм и более 80 мкм), были сгруппированы и представлены в пересчете на 100 %

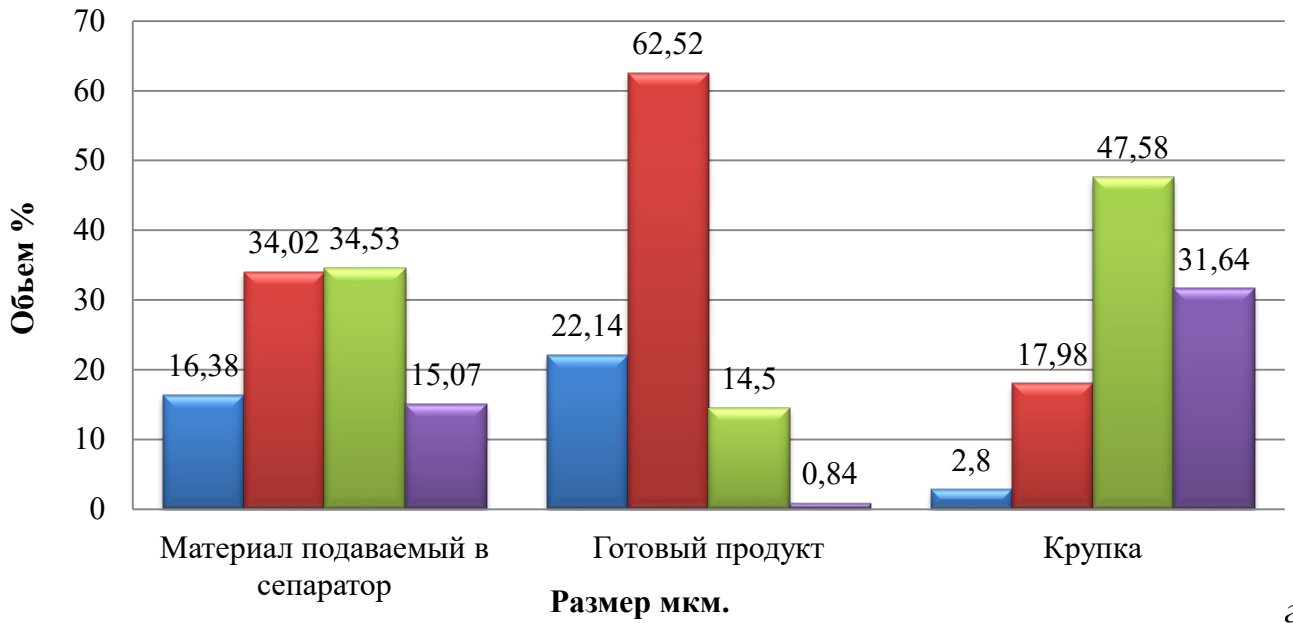
по каждому виду продукта (таблица 3.3): материал, подаваемый в сепаратор, готовый продукт и материал направляемый на повторный помол (крупка) (рисунок 3.8).

Таблица 3.3 – Систематизированные данные по заводам *В, О, П, Р, С, К*

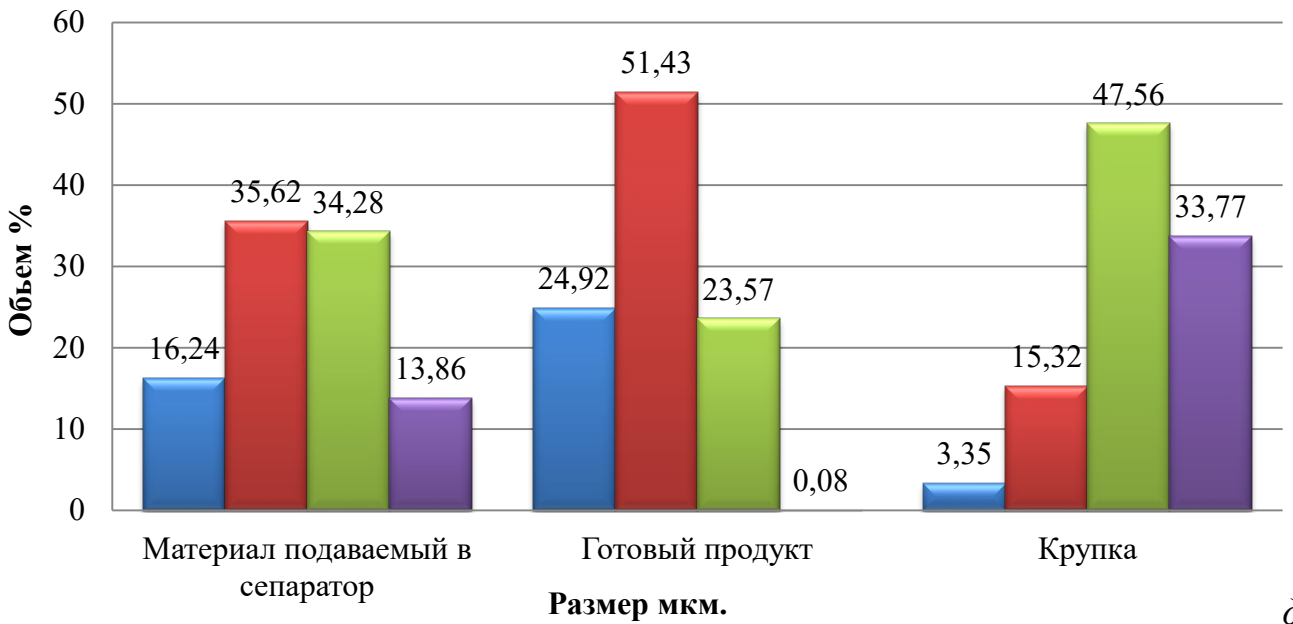
Завод	Класс цемента	Размер фракции, мкм	Материал, подаваемый в сепаратор, %	Готовый продукт, %	Крупка, %
<i>В</i>	ЦЕМ I 42,5Н	0–5	18,21	30,61	4,48
		5–30	28,03	44,31	6,58
		30–80	40,12	24,92	45,67
		Более 80	13,64	0,16	43,27
<i>О</i>		0–5	12,25	19,07	3,72
		5–30	33,81	52,23	13,78
		30–80	41,46	27,92	52,57
		Более 80	12,48	0,78	29,93
<i>П</i>		0–5	18,69	30,1	11,87
		5–30	31,15	57,72	15,82
		30–80	36,49	12,17	47,64
		Более 80	13,67	0,01	24,67
<i>Р</i>		0–5	16,38	22,14	2,8
		5–30	34,02	62,52	17,98
		30–80	34,53	14,5	47,58
		Более 80	15,07	0,84	31,64
<i>С</i>	0–5	16,24	24,92	3,35	
	5–30	35,62	51,43	15,32	
	30–80	34,28	23,57	47,56	
	Более 80	13,86	0,08	33,77	
<i>К</i>	0–5	17,34	29,66	3,47	
	5–30	28,63	49,18	5,48	
	30–80	33,65	21,07	49,99	
	Более 80	20,38	0,09	41,06	



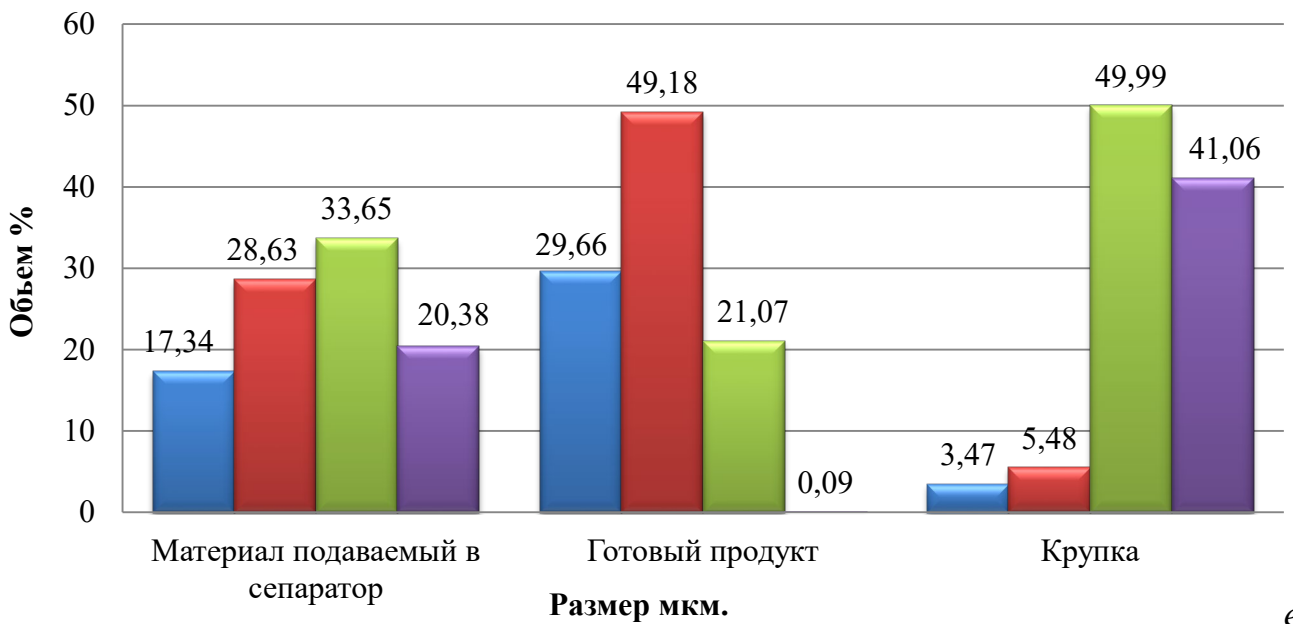
72



e)



d)



e)

Рисунок 3.8 – Гранулометрический состав материала при производстве в замкнутом цикле по трем основным видам продуктов:

a – с завода **В**, *б* – с завода **О**, *в* – с завода **П**, портландцемент ЦЕМ I 42,5Н;
г – с завода **Р**, портландцемент ЦЕМ I 52,5Н; *д* – с завода **С**, портландцемент ЦЕМ II/В-III 42,5Н; *е* – с завода **К**, портландцемент ЦЕМ II/А-И 42,5Н

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 смесь 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 %, 34,02 %, 35,62 %, 28,63 % (**В**, **О**, **П**, **Р**, **С**, **К** соответственно). 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).

После прохождения через сепаратор вещество разделяется на два вида продукта: готовый продукт – цемент, который составляет 68,5 %, 59,7 %, 52,7%, 53,4 %, 65,3 %, 50,4 % от всего материала, поступающего в сепаратор, и крупку, которая уходит на домол и ее количество составляет 31,5 %, 40,1 %, 47,3%, 46,6 %, 31,7 %, 49,6 % (**В**, **О**, **П**, **Р**, **С**, **К** соответственно).

Гранулометрический состав готового продукта – цемента, имеет широкий разброс. Основную часть составляет фракция 5–30 мкм – 44,31 %, 52,23 %, 57,72 %, 62,52 %, 61,43 %, 49,18 %, (**В**, **О**, **П**, **Р**, **С**, **К** соответственно), что указывает на высокую степень измельчения и соответствие стандартам. Также присутствует значительная доля мелких частиц (0–5 мкм) – 30,61 %, 19,07 %, 30,10 %, 22,14 %, 24,92 %, 29,66 %, и частиц фракции 30–80 мкм – 24,92 %, 27,92 %, 12,17 %, 14,50 %, 13,57 %, 21,07 % (**В**, **О**, **П**, **Р**, **С**, **К** соответственно). Содержание крупной

фракции (более 80 мкм) не превышает 0,01–0,84 %. Такое распределение показывает высокую однородность цемента, что соответствует стандартам качества.

Третий анализируемый продукт – крупка, содержит частицы, которые не прошли через сепаратор и направляются обратно в мельницу для повторного помола. Анализ гранулометрического состава крупки свидетельствует о том, что лишь менее половины вещества действительно требует повторного помола: фракция более 80 мкм составляет – 43,27 %, 29,93 %, 24,68 %, 31,64 %, 33,77 %, 41,06 % (**В, О, П, Р, С, К** соответственно). Остальной материал по дисперсности соответствует готовому продукту, в котором преобладает фракция 30–80 мкм – 45,67 %, 52,57 %, 47,64 %, 47,58 %, 47,56 %, 49,99 %, а частицы менее 30 мкм составляют 11,06 %, 17,5 %, 27,69 %, 20,78 %, 18,67 %, 8,95 % (**В, О, П, Р, С, К** соответственно).

Для установления характера зависимости изменения доли высокодисперсной фракции в составе различных продуктов от типа цемента, был проведен сравнительный анализ обобщённых данных, приведенных в таблице 3.3, по содержанию фракции 0–30 мкм (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Обобщённые данные по содержанию фракции 0–30 мкм в различных продуктах

Завод	Класс цемента	Содержание фракции 0–30 мкм в различных продуктах, %		
		материале, подаваемом в сепаратор	готовом продукте	крупке
В	ЦЕМ I 42,5Н	46,24	74,92	11,06
О		46,06	71,3	17,5
П		49,84	87,82	27,69
Р	ЦЕМ I 52,5Н	50,4	84,66	20,78
С	ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н	51,86	76,35	18,67
К	ЦЕМ II/А-И 42,5Н	45,97	78,84	8,95

Материал, который подаётся в сепаратор из мельницы на заводах **В**, **О** и **П**, выпускающих одинаковую марку цемент ЦЕМ I 42,5Н, составляет ~ 46–50 %. На заводе **Р** доля частиц 0–30 мкм повышается (~50 %), что объясняется интенсификацией помола для выпуска высокомарочного цемента (ЦЕМ I 52,5Н). Доля фракции 0–30 мкм на заводе **С**, где производится цемент из клинкера и шлака (ЦЕМ II/В–III 42,5Н), – максимальная (51–52 %). Шлак является более твёрдым продуктом, чем клинкер, и чтобы компенсировать гранулометрический состав, необходимо проводить помол на марку выше, что приводит к переизмельчению материала в мельнице. На заводе **К** (ЦЕМ II/А–И 42,5Н), где ~46 % материала подаётся в сепаратор, также прослеживается зависимость, связанная с составом данного цемента. Так как твердость известняка меньше, чем клинкера, основная задача мельницы в замкнутой системе – не только получить готовый продукт, но и подготовить материал для эффективной классификации. Поэтому 46 % материала размером 0–30 мкм является оптимальным с технологической точки зрения для подачи на сепаратор, так как обеспечивает стабильную циркуляционную нагрузку и не перегружает сепаратор слишком мелким материалом.

Анализ содержания частиц фракции 0–30 мкм в готовом продукте, получаемом после прохождения материала через сепаратор, показал, что все заводы получают 71–84 % материала, который соответствует характеристикам цементов по зерновому составу, предложенным Пироцким В.З. [125], где он приводил соответствие гранулометрического состава – удельной поверхности цемента (как показателя качества, нормируемого в ГОСТах) для замкнутого цикла производства. Распределение по доле высокодисперсного вещества в готовом продукте также коррелирует с типом получаемого цемента, как и в материале, подаваемом в сепаратор.

Как следует из данных таблицы 3.4, наблюдается прямая зависимость между дисперсностью материала на входе в сепаратор и гранулометрическим составом возвратной крупки. Увеличение доли фракции 0–30 мкм в подачу сепаратора с 46 % до 52 % сопровождается значительным ростом содержания этой же фракции в крупке – с 9 % до 28 %. Такое явление указывает на недостаточную эффективность

классификации, при которой мелкие, уже готовые частицы не отделяются от грубых и вместе с ними возвращаются на доизмельчение.

Этот эффект, известный как ортокинетический, может быть объяснен явлением, впервые описанным немецким ученым Рихардом Зигмонди [133]. Крупные частицы в потоке служат центрами притяжения для мелких, захватывая их своим аэродинамическим следом, в результате мелкие частицы, которые должны были бы отделиться в готовый продукт, «прилипают и утягиваются» за крупными частицами и уносятся вместе с ними в крупку на повторный помол, снижая общую эффективность классификации, что приводит к понижению производительности и увеличению энергозатрат.

Анализ обобщённых данных, по содержанию фракции 0–80 мкм в различных видах продукта (таблица 3.5) показал, что 56–75 % вещества уходит в 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 3.5 – Обобщённые данные по содержанию фракции 0–80 мкм в различных продуктах

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

Представленные данные свидетельствуют о многократной рециркуляции материала, что повышает содержания мелких частиц (0–5 мкм) в цементе, приводит к повышению водопотребности растворной смеси и может негативно влиять на плотность упаковки цементных частиц. Одновременно происходит перерасход электроэнергии на повторный помол готового продукта, снижение производительности помольного агрегата и ускоренный износ мелющих тел мельницы. В этой связи, с целью минимизации попадания готовой фракции на повторный помол, актуальной является задача модернизация технологической линии производства цемента в замкнутом цикле. Проведенные исследования [121, 134] показали, что одним из эффективных путей решения данной задачи является применение аэродинамического комплекса, включающего «сепаратор + концентратор + циклон». Данный комплекс позволит повысить технологичность процесса и качество классификации материала в замкнутом цикле при производстве цемента, сократить энергозатраты и увеличить выход готовой продукции.

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 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 оптимизации работы технологической линии.

3.4 Расчет гранулометрического состава материала при прохождении через аэродинамический комплекс с рециркуляцией³

Для углубленного понимания и прогнозирования процесса классификации в замкнутом цикле необходим математический аппарат. В этом разделе представлена расчетная модель, основанная на теории вероятностей и описывающая трансформацию гранулометрического состава материала при его многократной рециркуляции через систему аппаратов [135]. Модель позволяет количественно оценить влияние кратности рециркуляции на конечный продукт [124].

Полную информацию о процессе классификации дают функции разделения. Поэтому цель этого раздела – определить параметры функций разделения и рассчитать ее характеристики по известным конструктивно-технологическим или режимным параметрам системы.

При прохождении материала через систему устройств заданный гранулометрический состав готового продукта может не обеспечиваться. Рассмотрим прохождение материала через аэродинамический комплекс с рециркуляцией.

Пусть известны характеристики отдельных аппаратов, входящих в аэродинамический комплекс, т.е. их функции разделения $\phi(d)$ известны. Функция $\phi(d)$ описывает зависимость относительного коэффициента прохода (пропуска) узкой фракции исходного материала $(d, d + \Delta d)$ в один из продуктов классификации от среднего размера частиц этой фракции [124] и называется функцией разделения. За рубежом, как правило, рассматривается переход исходного материала в крупный продукт $\phi_k(d)$ (кривые Тромпа), а в отечественной литературе чаще приводятся кривые разделения (функций парциальных выносов), характеризующие переход исходного материала в мелкий

³ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: 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.

продукт $\phi_M(d)$. Эти функции разделения связаны между собой соотношением:

$$\phi_k(d) + \phi_M(d) = 1. \quad (3.1)$$

Задача состоит в определении гранулометрического состава каждого продукта разделения при известном исходном составе материала. После каждого аппарата возможно повторное разделение на грубый и тонкий продукт. Поэтому производится оперирование с функциями разделения тонкого и грубого продукта.

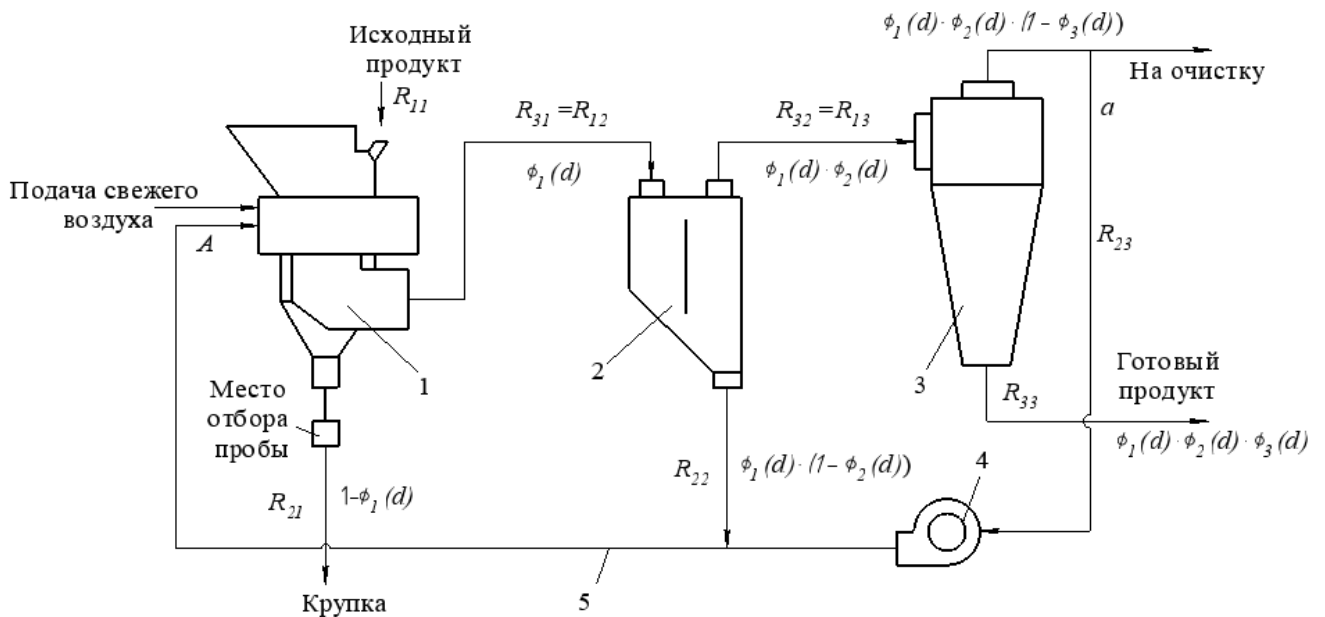


Рисунок 3.9 – Схема аэродинамического комплекса с рециркуляцией грубого продукта (структура потока продуктов согласно рисунка 3.4)

Функцию разделения j -го аппарата по выходу в i -й продукт обозначают через ϕ_{ij} ($j = \overline{1, N}$, N – число аппаратов системы, $i = 2$ – грубый, $i = 3$ – тонкий) [124]. Рассмотрим простой замкнутый контур, т.е. контур с вводом исходного порошка в одном месте с циркуляцией материала по замкнутому контуру (рисунок 3.9).

Функция разделения для сепаратора $\phi_1(d)$, концентратора $\phi_2(d)$ и циклона $\phi_3(d)$ схемы известны. Вероятность выноса частиц диаметром d в тонкий продукт в системе аппаратов определится произведением вероятностей ее выхода в тонкий продукт в сепараторе, концентраторе и циклоне. Функция разделения относительно

тонкого разделения продукта будет определяться выражением:

$$\phi_{33}(d) = \phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot \phi_3(d). \quad (3.2)$$

Вероятность выпадения частиц в грубый продукт сепаратора:

$$\phi_{21}(d) = 1 - \phi_1(d). \quad (3.3)$$

Вероятность выпадения частиц в грубый продукт концентратора и циклона определится как произведение двух и трех последовательных событий:

$$\phi_{22}(d) = \phi_1(d)(1 - \phi_2(d)), \quad (3.4)$$

$$\phi_{23}(d) = \phi_1(d)\phi_2(d)(1 - \phi_3(d)). \quad (3.5)$$

Гранулометрический состав исходного, грубого и тонкого продуктов для j -го аппарата обозначается $R_{ij}(d)$ ($R_{1j}(d)$, $R_{2j}(d)$, $R_{3j}(d)$), где $i = 1, 2, 3$ – признак продукта (исходный, грубый и тонкий). По известному гранулометрическому составу исходного продукта $R_1(d)$ и функция разделения ϕ_{ij} гранулометрический состав i -го продукта j -го аппарата рассчитывается по формуле:

$$R_{ij}(d) = \frac{1}{\overline{\phi_{ij}}} \int_0^{R_1} \phi_{ij}(d) dR_1, \quad (3.6)$$

где $\overline{\phi_{ij}}$ – полный вынос материала в рассматриваемый продукт. Полный вынос показывает массовую долю этого продукта в общей подаче материала. Полный вынос рассчитывается как:

$$\overline{\phi_{ij}} = \int_0^1 \phi_{ij}(d) dR_1. \quad (3.7)$$

Для простой разомкнутой системы аппаратов функция разделения в общем случае может быть описана формулой:

$$\phi_{ij} = \prod_{k=1}^j \phi_k^{a_{3k}} (1 - \phi_k)^{a_{2k}}, \quad k = 1, 2, \dots, j, \quad (3.8)$$

где a_{2k} , a_{3k} – признаки соединения классификаторов в систему (каскад):

– при $a_{3k} = 1$, $a_{2k} = 0$ – последовательность событий проходит через тонкий продукт k -го аппарата;

– при $a_{3k} = 0$, $a_{2k} = 1$ – через грубый продукт;

– при $a_{3k} = 0$, $a_{2k} = 0$ – аппарат не включен в данную цепочку.

Для замкнутой системы аппаратов фракционный вынос можно посчитать следующим образом. Пусть в начальный момент доля рециркуляции a равна нулю

($a = 0$). Если принять массопоток на входе в аппарат равным 1, то производительность каскада по грубому продукту $(B_2)_0$ будет:

$$(B_2)_0 = 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))). \quad (3.9)$$

После второго и третьего аппаратов материал подается на рециркуляцию в точку A . Массопоток рециркуляции равен:

$$(B_2)_0 \cdot a = 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))) \cdot a. \quad (3.10)$$

После смешения и прохождения по каскаду получаем массопоток $(B_2)_1$, который равен:

$$(B_2)_1 = 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))) + \\ + 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))^2 \cdot a. \quad (3.11)$$

После n -го прохождения выражение будем иметь вид:

$$(B_2)_n = 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))) + \\ + 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))^2 \cdot a + \dots + \\ + 1 \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))^{n+1} \cdot a^n. \quad (3.12)$$

или:

$$(B_2)_n = \left[1 + (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))) \cdot a + \dots \right. \\ \left. + (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))^n \cdot a^n \right] \times \\ \times (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))). \quad (3.13)$$

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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (B_2)_n = \frac{\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))}{1 - a \cdot (\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot (1 - \phi_3(d)) + \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d)))}. \quad (3.14)$$

Фракционный вынос тонкого продукта с учетом рециркуляции доли материала будет представлен выражением:

$$\phi^P(d) = \frac{\phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot \phi_3(d)}{1 - a \cdot \phi_1(d) \cdot \phi_2(d) \cdot \phi_3(d)}. \quad (3.15)$$

Полученные формулы (3.14), (3.15), после подстановки их в (3.6), позволяют получить гранулометрический состав целевого продукта после многократной рециркуляции.

В работе по стохастическому моделированию процессов классификации (см. [132]) была указана формула:

$$\phi(d) = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_{zp}} \exp\left(-\frac{s}{2}\left(1 - \frac{d}{d_{zp}}\right)\right)}, \quad (3.16)$$

которая описывает функцию разделения. Несмотря на ограниченные прогностические способности, эту формулу применяют как удобную аппроксимирующую зависимость. Параметр s является аналогом числа Пекле [44, 136-138] в диффузионных процессах. Для сепаратора функция разделения, полученная в [139, 140], имеет вид:

$$\phi(d) = \exp\left(-\frac{0,00065d^2 \exp(0,00021d^2)}{1 + 0,00053d^2}\right) \quad (3.17)$$

и представлена на рисунок 3.10. Из рисунка видно, что граница разделения соответствует $d \approx 30$ мкм. Зависимость (3.16) при тех же условиях и числе $Pe = 10$ представлена на рисунок 3.11. Формула (3.17) учитывает конструктивно-технологические особенности сепаратора и является более точной.

Таким образом, график на рисунке 3.10 представляет собой функцию разделения сепаратора, построенную по точной зависимости (3.17) и аппроксимированную общим выражением (3.14). Функция разделения показывает вероятность выноса частиц в тонкий продукт в зависимости от их размера. Граница разделения составляет 30 мкм, что означает вероятность попадания частиц данного размера как в тонкий, так и в грубый продукт. Плавный переход функции отражает неидеальность реального процесса сепарации.

На рисунке 3.11 представлены функции, иллюстрирующие влияние граничного размера частиц на эффективность сепарации. Увеличение $d_{гр}$ приводит к смещению функций вправо, что соответствует более грубому разделению и

увеличению доли крупных частиц в тонком продукте. Это демонстрирует возможность управления процессом сепарации путём регулировки режимных параметров (например, скорости вращения ротора или расхода воздуха). Функции подтверждают, что сепаратор обеспечивает высокую селективность в диапазоне 10–60 мкм.

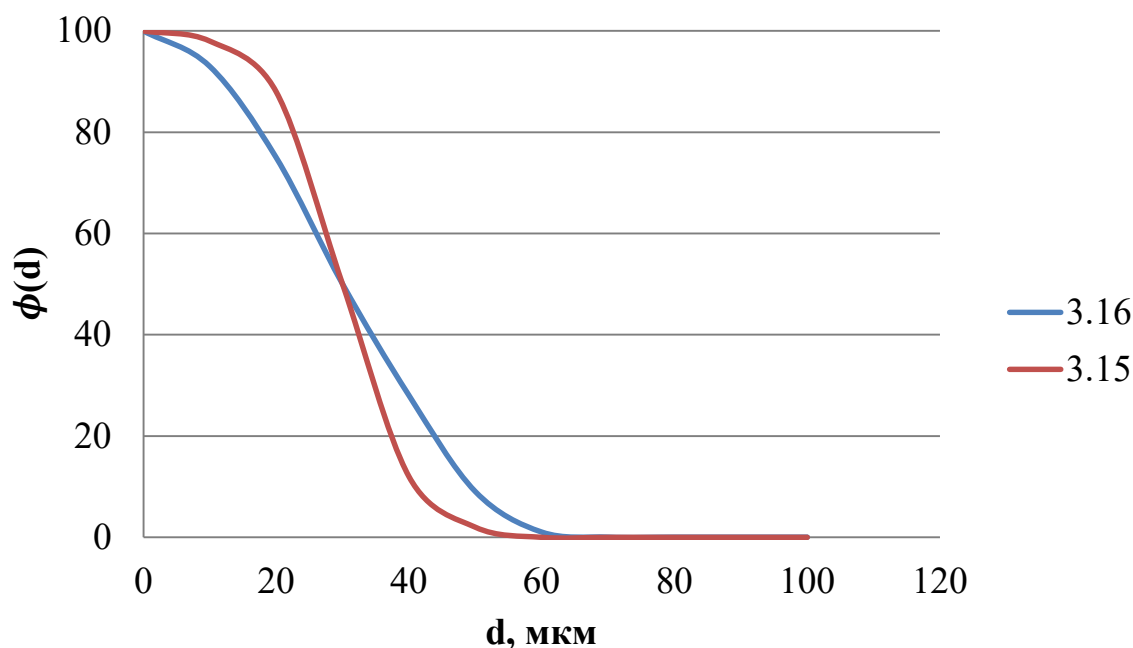


Рисунок 3.10 – Функция разделения сепаратора, построенная по зависимости (3.17) учитывающей конструктивные параметры аппарата

Для концентратора функция разделения при $Pe = 3,6$ и различных значениях d_{zp} будет иметь вид, представленный на рисунке 3.12.

Для циклона функция разделения при $Pe = 8$ и различных значениях d_{zp} будет иметь вид, представленный на рисунке 3.13.

График на рисунке 3.12 показывает вероятностные характеристики классификации в инерционном концентраторе. По сравнению с сепаратором, функции имеют более пологий вид, что отражает менее резкое разделение, характерное для гравитационно-инерционного осаждения. Концентратор эффективно отделяет частицы крупнее 40–50 мкм, выполняя функцию доочистки потока после сепаратора и снижая нагрузку на циклон.

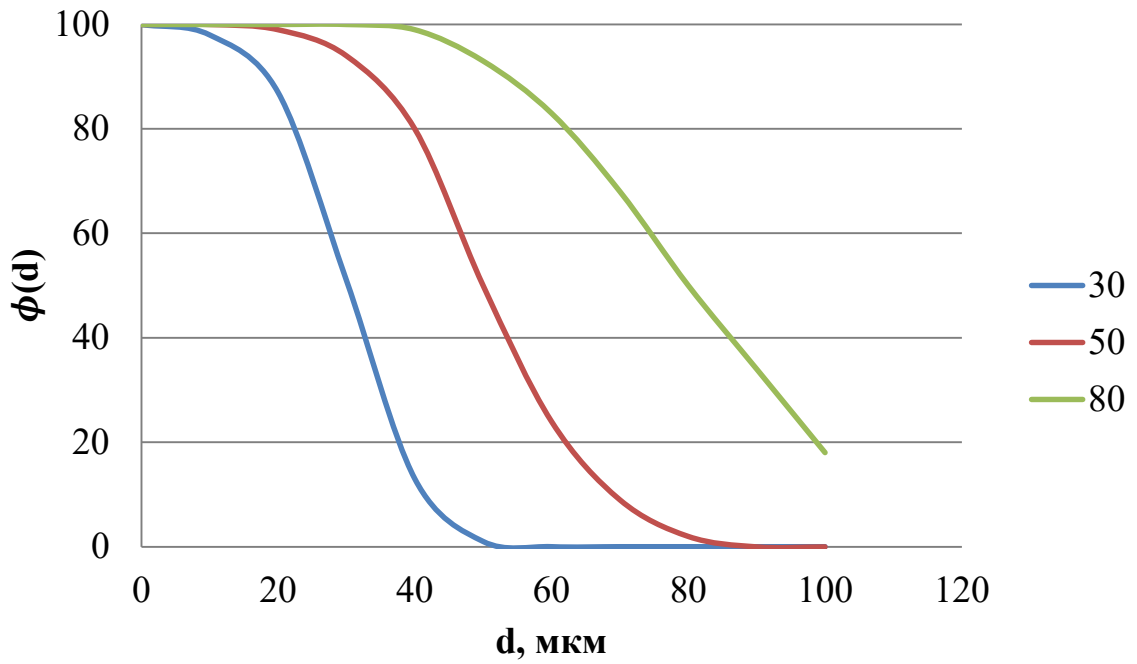


Рисунок 3.11 – Функция классификации в сепараторе при значении $Pe = 10$ и различных значениях $d_{zp} = 30, 50, 80$ мкм, соответственно

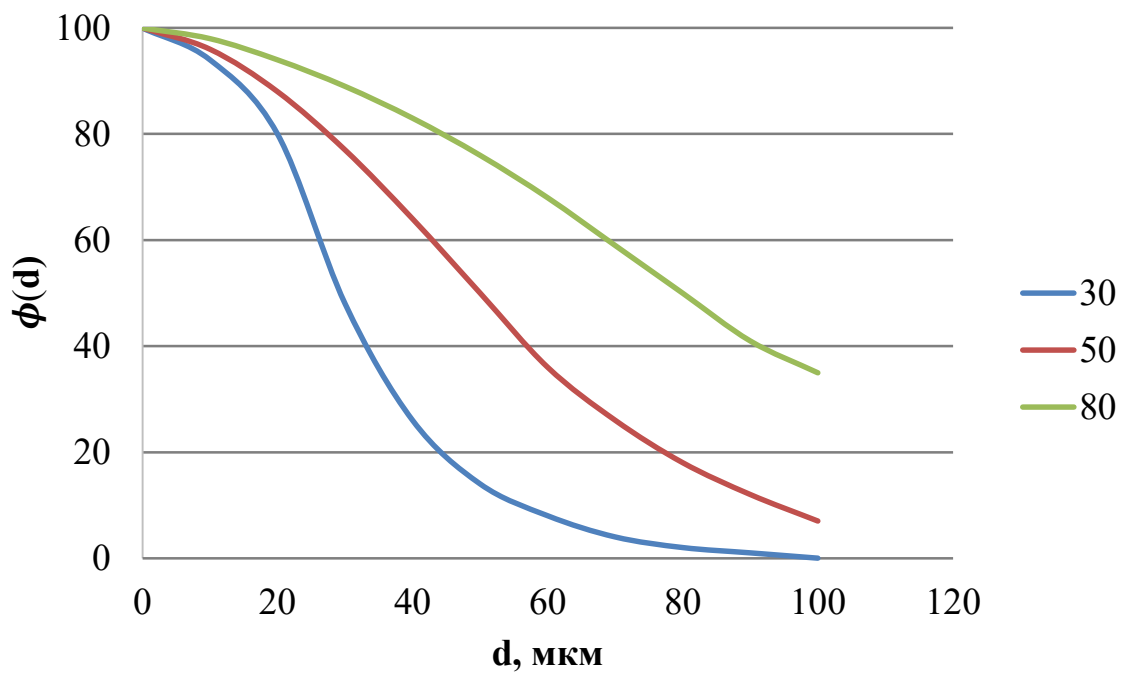


Рисунок 3.12 – Функция классификации в концентраторе при значении $Pe = 3,6$ и различных значениях $d_{zp} = 30, 50, 80$ мкм, соответственно

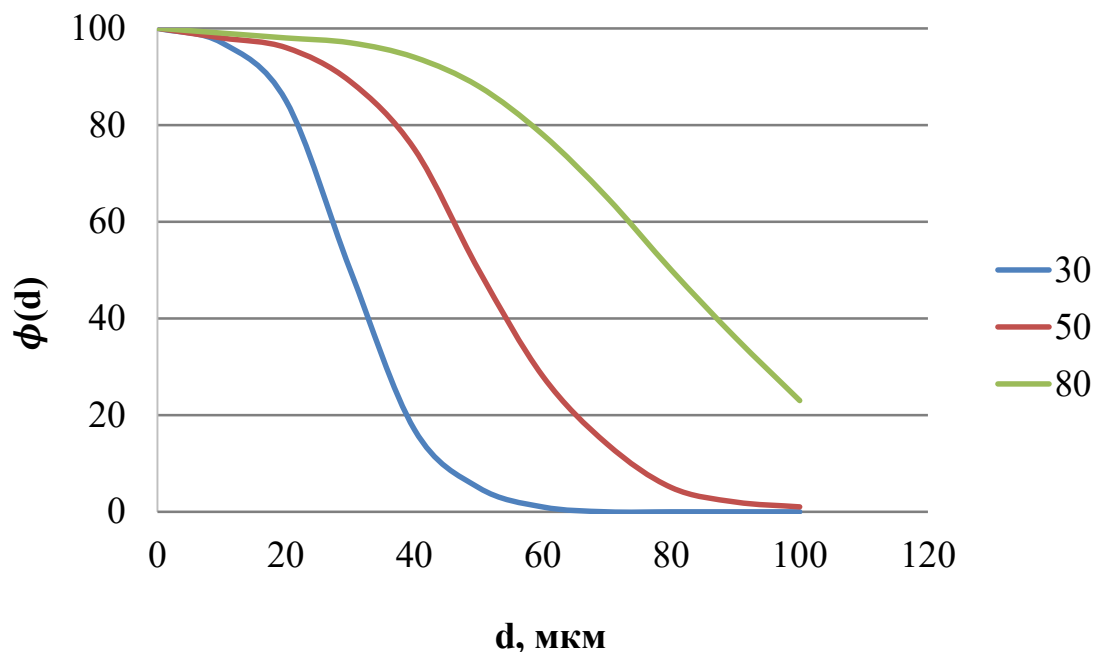


Рисунок 3.13 – Функция классификации в циклоне при значении $Pe = 8$ и различных значениях d_{2p} – 30, 50, 80 мкм, соответственно

На рисунке 3.13 показана эффективность осаждения частиц в циклоне в зависимости от их размера. Высокое значение числа Пекле ($Pe = 8$) указывает на преобладание инерционных сил над диффузионными, что обеспечивает высокую степень улавливания частиц крупнее 10–15 мкм. График подтверждает роль циклона как завершающей стадии сепарации с высокой степенью очистки воздуха и минимизацией выбросов пыли.

Тогда функций разделения относительно тонкого разделения продукта $\phi_{33}(d)$ будет иметь вид, представленный на рисунке 3.14.

На рисунке 3.14 представлена интегральная функция разделения для всего аэродинамического комплекса, построенная как произведение функций разделения сепаратора, концентратора и циклона. Функция имеет более крутой подъём по сравнению с функциями отдельных аппаратов, что свидетельствует о повышении чёткости классификации в комплексе. График показывает, что комбинированная система обеспечивает высокий выход целевой фракции (5–30 мкм) при минимальном уносе мелких частиц в возврат.

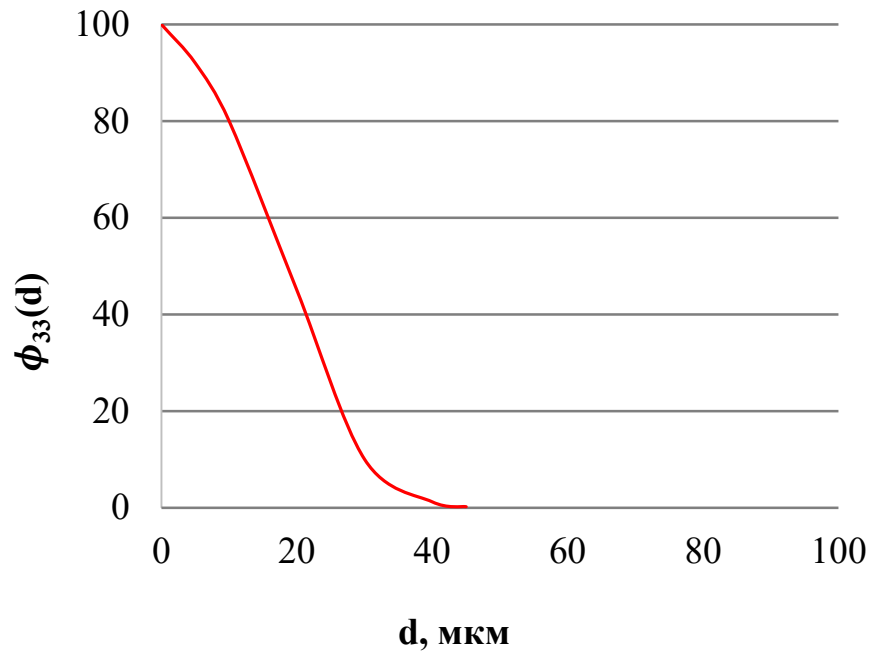


Рисунок 3.14 – Функция классификации относительно тонкого продукта, полученного из циклона $\phi_{33}(d)$

Вероятность выпадения частиц в грубый продукт в сепараторе ($\phi_{21}(d)$), концентраторе ($\phi_{22}(d)$) и циклоне ($\phi_{23}(d)$) представлена на рисунок 3.15–3.17.

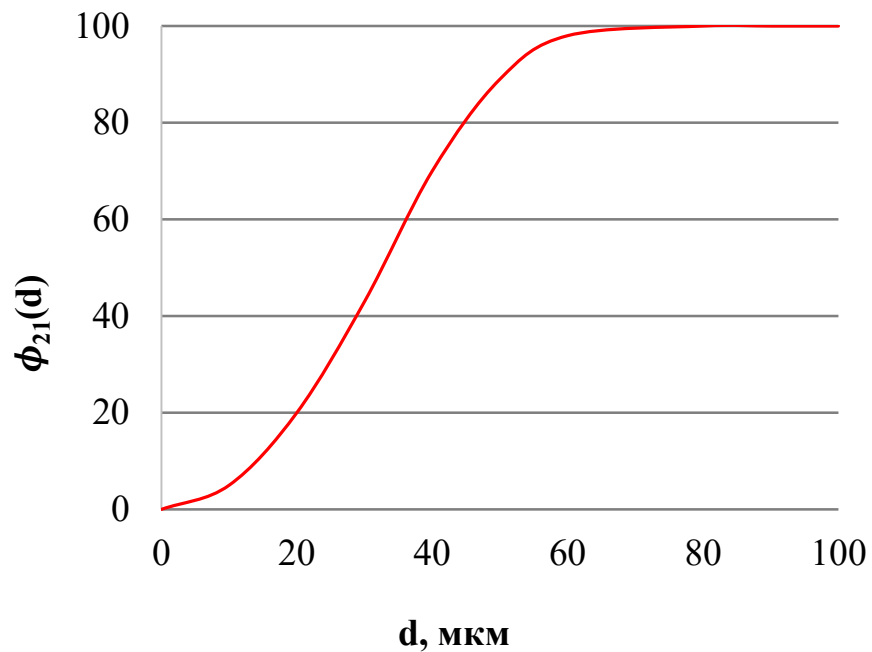


Рисунок 3.15 – Вероятность выпадения частиц в грубый продукт из сепаратора $\phi_{21}(d)$

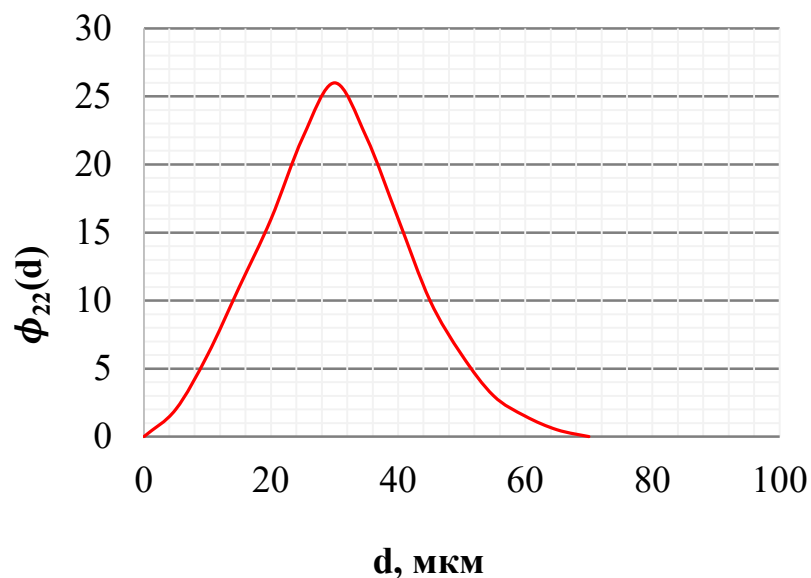


Рисунок 3.16 – Вероятность выпадения частиц в грубый продукт из концентратора $\phi_{22}(d)$

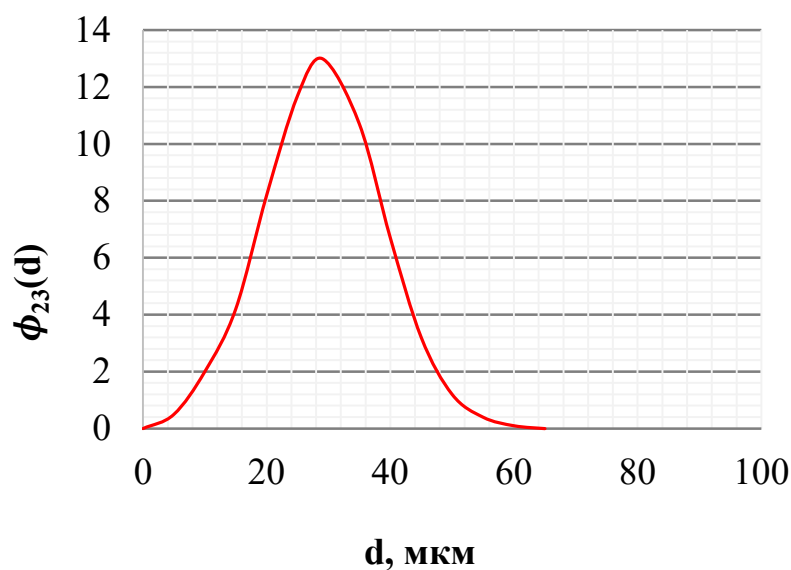


Рисунок 3.17 – Вероятность выпадения частиц в грубый продукт из циклона $\phi_{23}(d)$

Таким образом, графики на рисунках 3.15–3.17 отображают доли частиц, которые на каждой стадии процесса направляются в грубый продукт (возврат). Функции показывают, что наибольший возврат крупных частиц происходит в сепараторе, тогда как концентратор и циклон возвращают преимущественно промежуточные и мелкие фракции. Это подтверждает необходимость

многоступенчатой сепарации для минимизации потерь готового продукта и снижения нагрузки на мельницу.

Фракционный состав материала, возвращаемый на рециркуляцию всех аппаратов (3.14), представлен на рисунок 3.18.

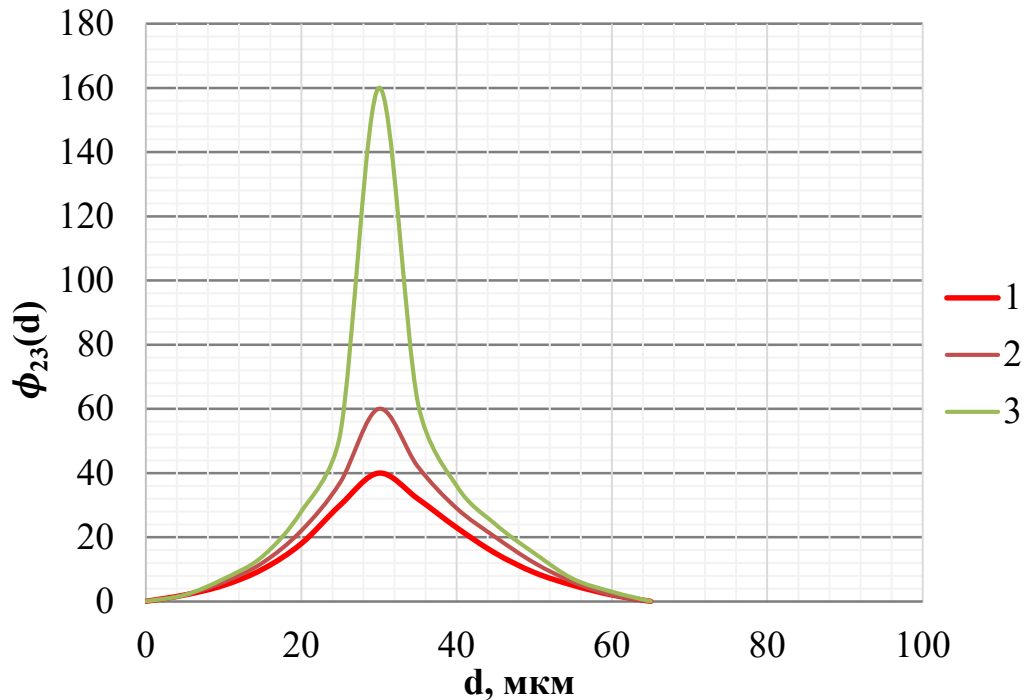


Рисунок 3.18 – Фракционный состав, возвращаемый на рециркуляцию всех аппаратов аэродинамического комплекса:

функция 1 – $a = 0$; функция 2 – $a = 1$; функция 3 – $a = 2$

На рисунок 3.18 наглядно показано, что параметр рециркуляции a является эффективным инструментом управления процессом сепарации, позволяя оптимизировать работу комплекса для получения цемента с требуемыми дисперсными характеристиками.

В том случае, когда учитывается возврат только от концентратора, фракционный состав, возвращаемый на рециркуляцию, будет описываться выражением (3.18):

$$\phi(d) = \frac{\phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))}{1 - a \cdot \phi_1(d) \cdot (1 - \phi_2(d))} \quad (3.18)$$

и иметь вид, представленный на рисунке 3.19.

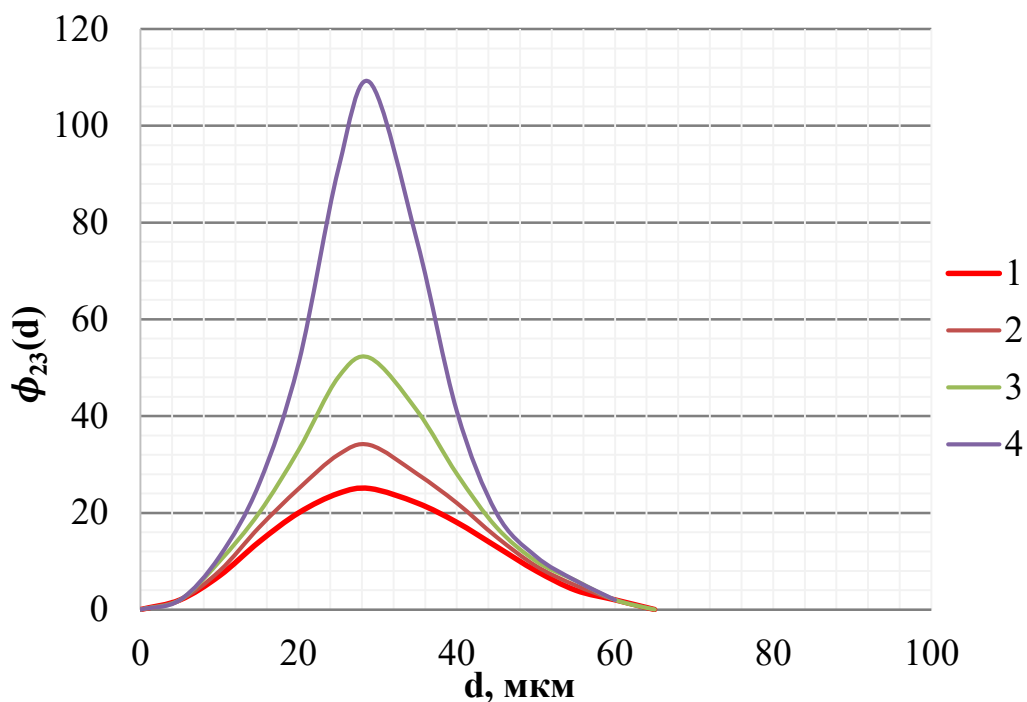


Рисунок 3.19 – Фракционный состав, возвращаемый на рециркуляцию только из концентратора:

функция 1 – $a = 0$; функция 2 – $a = 1$; функция 3 – $a = 2$; функция 4 – $a = 3$

Графики на рисунках 3.18 и 3.19 демонстрируют влияние кратности рециркуляции на количество и состав возвращаемого материала. При увеличении параметра a возрастает доля мелких фракций в возвратном потоке, что свидетельствует о более полном извлечении целевого продукта. Однако при $a > 2$ наблюдается насыщение эффекта, что указывает на оптимальный диапазон рециркуляции (2–3 раза) для данного комплекса. Таким образом, дальнейшее увеличение параметра a приводит к разрывному решению, что может трактоваться как нецелесообразность повышения кратности рециркуляции.

Фракционный вынос тонкого продукта с учетом рециркуляции доли материала (3.15) будет иметь вид, представленный на рисунках 3.20 и 3.21.

Графики на рисунках 3.20, 3.21 показывают эффективность извлечения тонкой фракции в зависимости от наличия рециркуляции. При $a = 0$ (без рециркуляции) функция выноса соответствует одноступенчатому разделению.

Введение рециркуляции ($a = 1$) существенно повышает выход частиц размером менее 30 мкм, что подтверждает целесообразность использования замкнутой схемы.

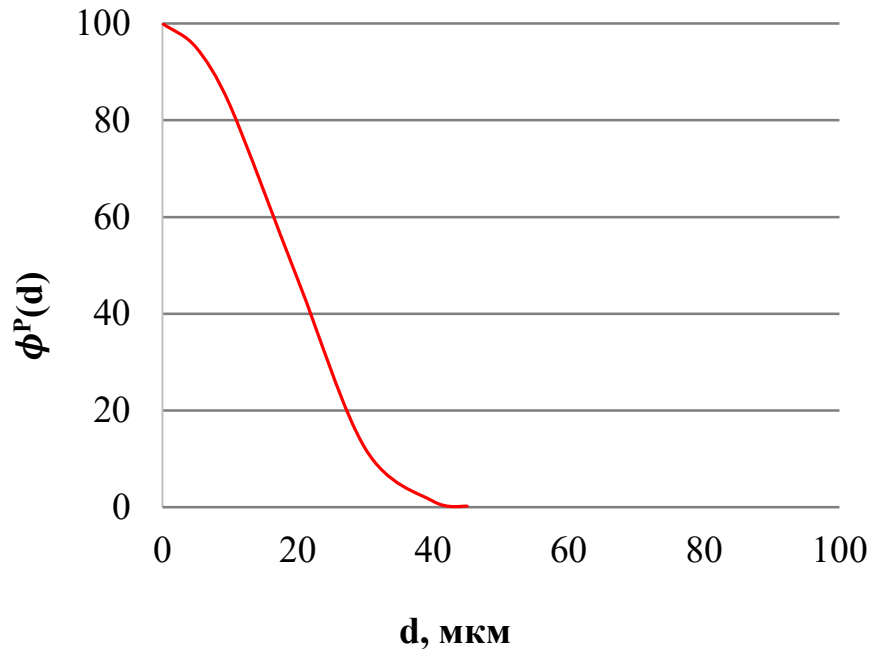


Рисунок 3.20 – Фракционный вынос тонкого продукта с учетом рециркуляции при $a=0$

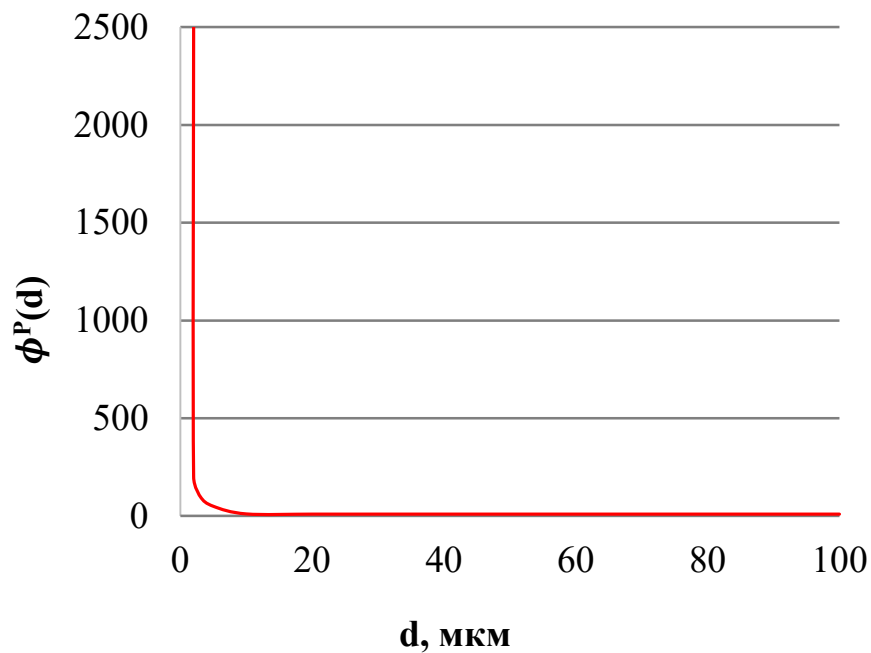


Рисунок 3.21 – Фракционный вынос тонкого продукта с учетом рециркуляции при $a=1$

Рассчитаем гранулометрический состав грубого и тонкого продуктов аппаратов замкнутой системы. Гранулометрический состав исходного продукта $R_1(d)$ известен и представлен в таблице 3.6 и на рисунке 3.22 (данные по цементу, который был использован в качестве контрольного для отладки работы аэродинамического комплекса, представлены в главе 2.3).

Таблица 3.6 – Гранулометрический состав цемента ЦЕМ I 42,5Н

Класс цемента	Размер фракции	Материал, %
ЦЕМ I 42,5Н	0–5 мкм	9,64
	5–30 мкм	31,56
	30–80 мкм	28,84
	Более 80 мкм	29,96

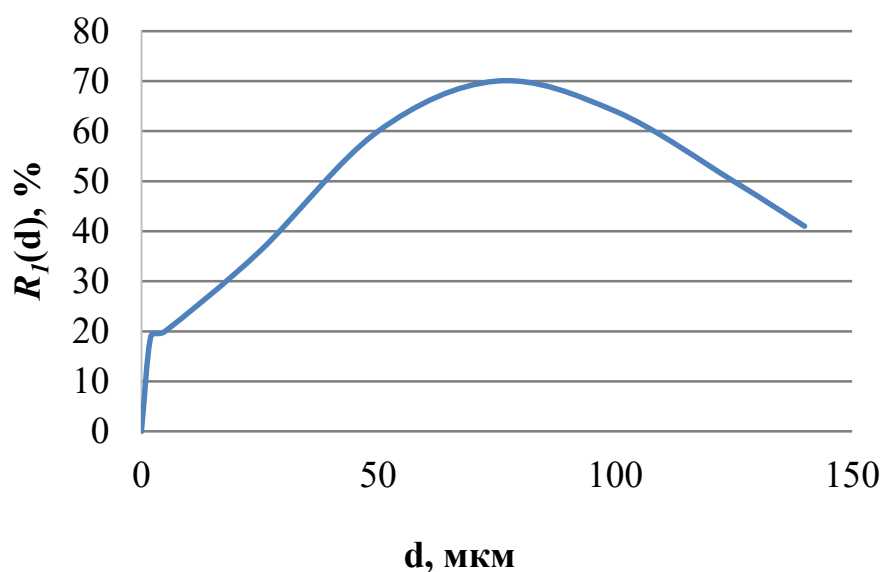


Рисунок 3.22 – Гранулометрический состав исходного продукта $R_1(d)$

Гранулометрический состав грубого продукта после сепаратора $R_{21}(d)$, концентратора $R_{22}(d)$ и циклона $R_{23}(d)$ представлен на рисунках 3.23–3.25.

Таким образом, графики на рисунках 3.23–3.25 показывают изменение состава возвращаемого материала на каждой стадии. После сепаратора в возврате преобладают частицы >80 мкм, после концентратора – фракция 40–80 мкм, после

циклона – мелкие частицы (<10 мкм), унесённые воздушным потоком. Это подтверждает, что каждая ступень выполняет свою функцию в сепарации.

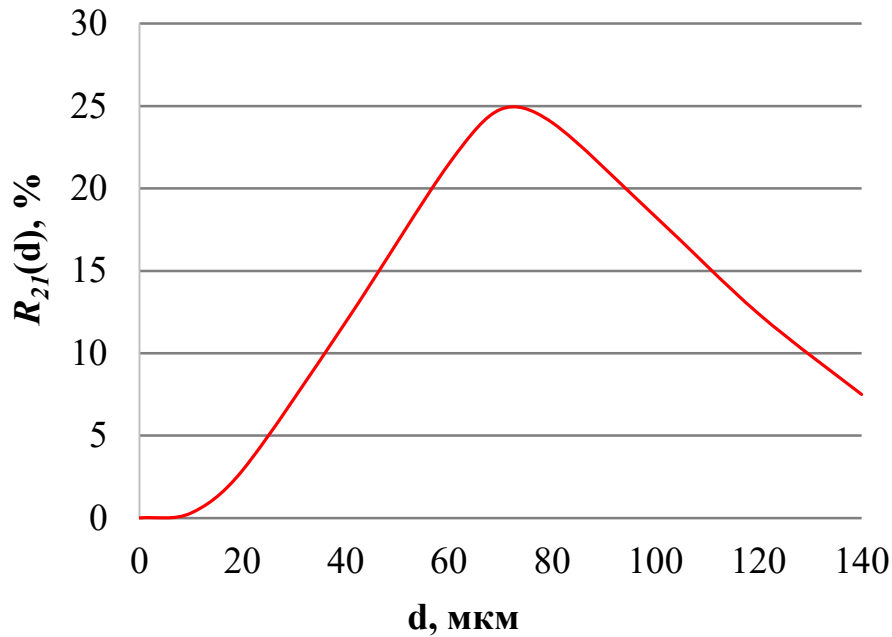


Рисунок 3.23 – Гранулометрический состав продукта после сепаратора $R_{21}(d)$

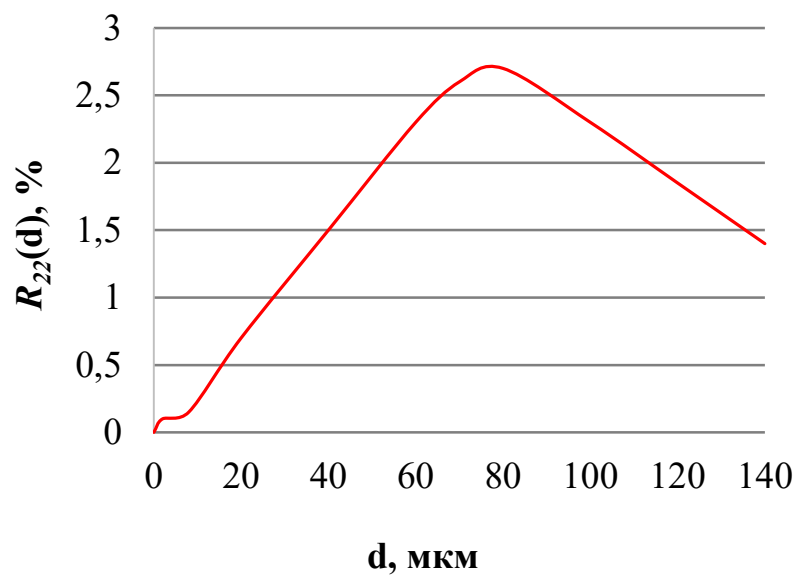


Рисунок 3.24 – Гранулометрический состав продукта после концентратора $R_{22}(d)$

Совмещённые графики на рисунке 3.26 наглядно демонстрируют трансформацию грубого продукта по мере прохождения комплекса. Наблюдается последовательное уменьшение среднего размера частиц в возврате, что

свидетельствует о постепенной «доочистке» потока от готовой фракции.

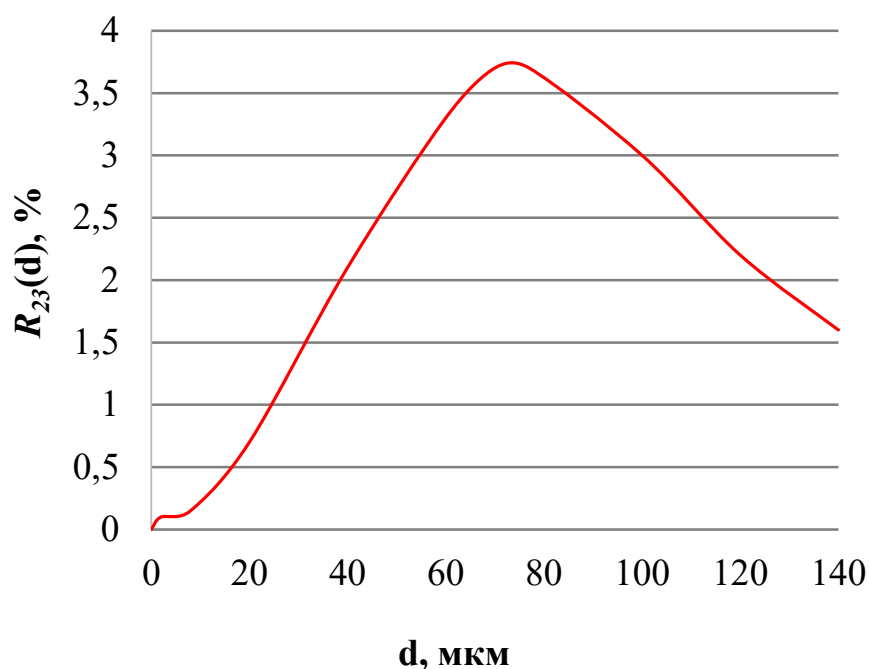


Рисунок 3.25 – Гранулометрический состав продукта после циклона $R_{23}(d)$

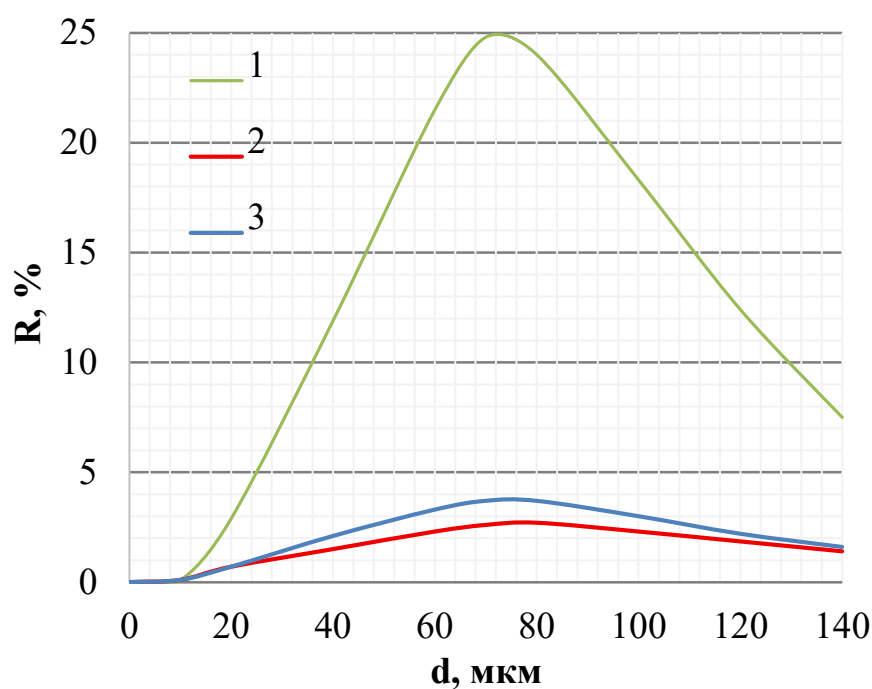


Рисунок 3.26 – Гранулометрический состав продукта, отправляемого: на домол после сепаратора – **функция 1** – $R_{21}(d)$; в сепаратор после концентратора – **функция 2** – $R_{22}(d)$ и циклона – **функция 3** – $R_{23}(d)$

Гранулометрический состав тонкого продукта концентратора $R_{32}(d)$ и циклона $R_{33}(d)$ представлен на рисунках 3.27–3.29.

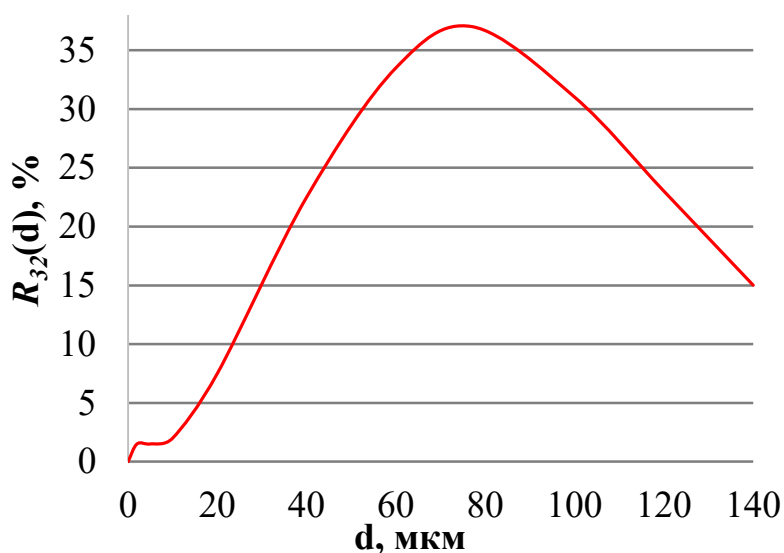


Рисунок 3.27 – Гранулометрический состав продукта после концентратора $R_{32}(d)$

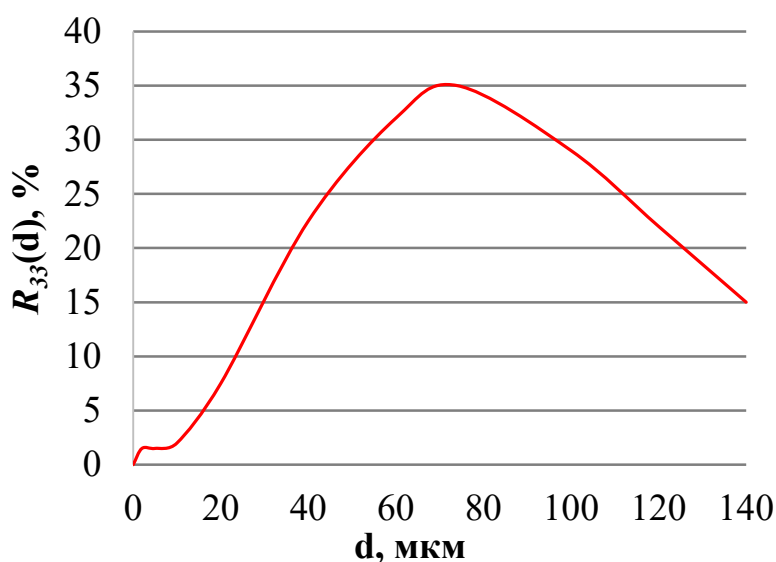


Рисунок 3.28 – Гранулометрический состав продукта из циклона $R_{33}(d)$

Данные графики показывают, что после концентратора в тонком продукте преобладают частицы размером 0–40 мкм, а после циклона количество продукта снижается, так как часть уносится вместе с воздушным потоком. Это подтверждает наличие ортокинетического эффекта в пылевоздушной среде, при котором крупные частицы увлекают за собой мелкие, уже являющиеся готовым продуктом.

Фракционный состав (3.14), возвращаемый на рециркуляцию, представлен на рисунке 3.30. Данный график отражает поток материала, возвращаемый в

сепаратор после концентратора и циклона. Он показывает, что даже в возврате содержится значительная доля частиц размером менее 30 мкм, что подтверждает наличие ортокинетического эффекта и необходимость его снижения.

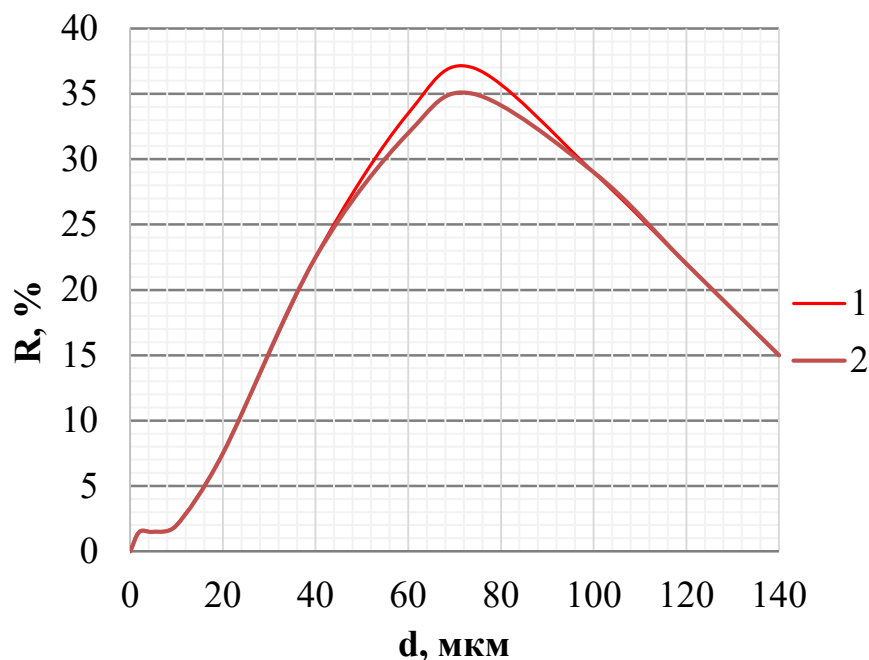


Рисунок 3.29 – Гранулометрический состав продукта из концентратора и циклона: 1 – $R_{32}(d)$ и 2 – $R_{33}(d)$

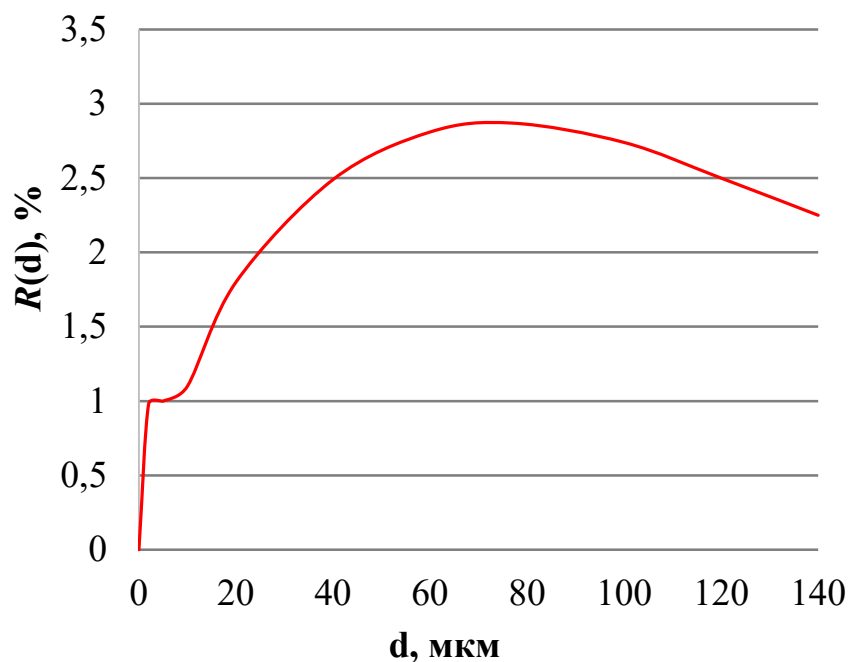


Рисунок 3.30 – Фракционный состав, возвращаемый на рециркуляцию материала в сепаратор

Таким образом, посчитаны функции разделения системы замкнутого цикла и гранулометрические составы грубого и тонкого продуктов для каждого из аппаратов. Анализ функций показывает, что доля крупных частиц в выходном продукте с увеличением кратности рециркуляции снижается. При этом целесообразно увеличение рециркуляции до 3 раз. Дальнейшее увеличение доли рециркуляции приводит к незначительному изменению состава и, следовательно, энергетически нецелесообразно.

Гранулометрический состав тонкого продукта с учетом рециркуляции доли материала (3.15) представлен на рисунке 3.31.

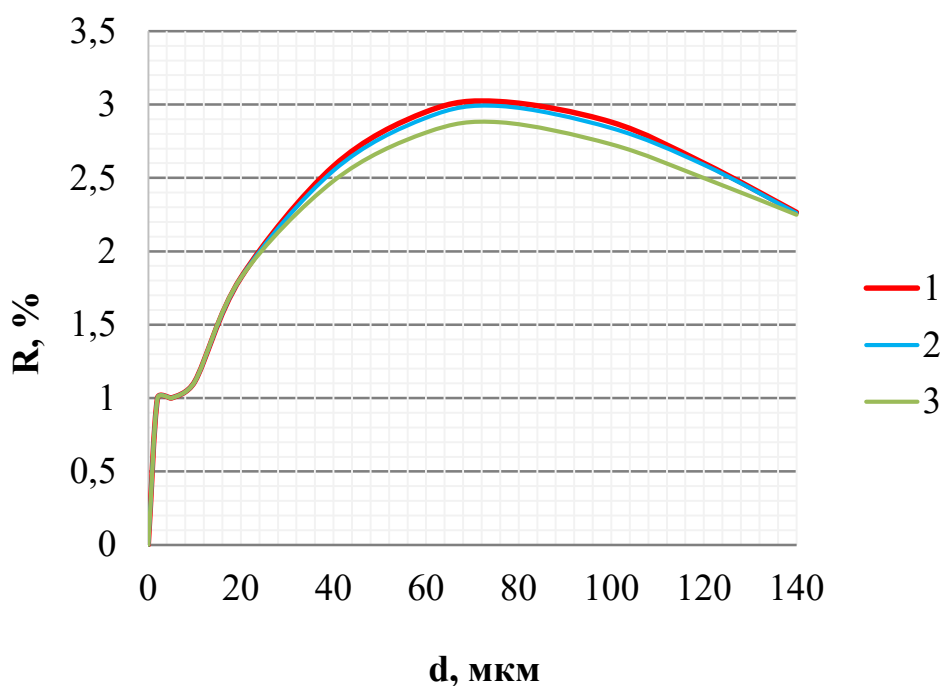


Рисунок 3.31 – Гранулометрический состав тонкого продукта при различной кратности рециркуляции a :
 функция 1 – $a=1$; функция 2 – $a=2$; функция 3 – $a=3$

Расчеты по предложенной модели показали, что увеличение кратности рециркуляции материала положительно сказывается на качестве готового цемента, снижая содержание крупных фракций. Однако установлено, что данный эффект имеет пределы: увеличение рециркуляции более 3-х раз не дает существенного улучшения гранулометрического состава. Это важный практический вывод для технологов, позволяющий оптимизировать работу помольного агрегата, избегая

нерациональных энергозатрат на избыточную циркуляцию без заметной технологической выгоды.

3.5 Моделирование осаждения цемента в аэродинамическом комплексе замкнутого цикла⁴

Процесс классификации является частью сложной аэродинамической системы, включающей несколько аппаратов (сепаратор, концентратор, циклон). В данном разделе разработана детализированная математическая модель, основанная на уравнениях баланса для каждой фракции и каждого узла системы. Это позволяет смоделировать движение материала по всему технологическому контуру и спрогнозировать гранулометрический состав готового продукта на основе характеристик исходного сырья и параметров оборудования [141].

Рассмотрим перемещение i -й узкой фракции материала в процессе его прохождения в элементах и узлах системы. Для этого запишем уравнения баланса этой фракции.

1. Смешивание материала на входе в сепаратор.

На входе в сепаратор происходит смешение исходного материала и крупки от возвратной линии (рисунок 3.32).

Условия баланса всего материала и фракций запишутся следующим образом:

$$Q_c + Q_{kp} = Q_{cen}, \quad (3.19)$$

$$Q_c f_i^c + Q_{kp} f_i^{kp} = Q_{cen} f_i^{cen}. \quad (3.20)$$

где Q – массовый расход материала, кг/ч (индексы: c – исходный материал из мельницы, kp – крупка, cen – питание сепаратора, G – готовый продукт, o – очищенный воздух, $kp2$ – возврат из концентратора); f_i – массовая доля i -й узкой

⁴ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: Теличенко В.И. Моделирование осаждения цемента в технологической системе замкнутого цикла с рециркуляцией / В. И. Теличенко, В. С. Прокопенко, Р. Р. Шаратов, И. П. Бойчук // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 11. С. 5-8. EDN WXQYVX.

фракции в соответствующем потоке;

Из уравнения (3.19) получаем:

$$Q_{kp} = Q_{cen} - Q_c, \quad (3.21)$$

Делим оба равенства (3.19)–(3.20) на Q_{cen} :

$$\frac{Q_c}{Q_{cen}} + \frac{Q_{kp}}{Q_{cen}} = 1, \quad (3.22)$$

$$\frac{Q_c}{Q_{cen}} f_i^c + \frac{Q_{kp}}{Q_{cen}} f_i^{kp} = f_i^{cen}. \quad (3.23)$$

Учитывая, что $k_u = \frac{Q_{cen}}{Q_c}$ – кратность циркуляции, получим:

$$\frac{1}{k_u} f_i^c + \frac{Q_{cen} - Q_c}{Q_{cen}} f_i^{kp} = f_i^{cen}, \quad (3.24)$$

откуда:

$$\frac{1}{k_u} f_i^c + \left(1 - \frac{1}{k_u}\right) f_i^{kp} = f_i^{cen}. \quad (3.25)$$

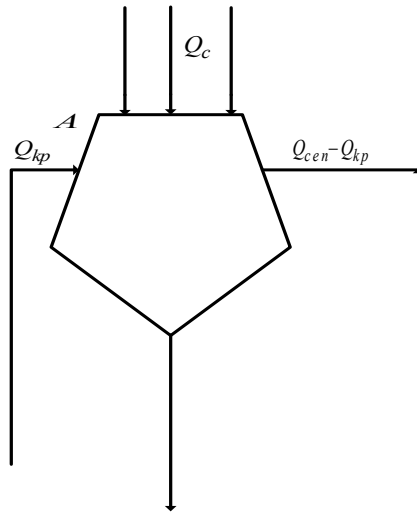


Рисунок 3.32 – Схема материальных и аэродинамических потоков в сепараторе

2. Разделение материала в сепараторе.

Уравнения разделения запишутся в следующем виде:

$$Q_{cen} f_i^{cen} C_{ii} = (Q_{cen} - Q_{kp}) f_i^{cc}, \quad (3.26)$$

$$Q_{cen} f_i^{cen} (1 - C_{ii}) = Q_{kp} f_i^{kp}, \quad (3.27)$$

где f_i^{cc} – фракционный состав, выходящий из сепаратора; C_{ii} – коэффициент прохода i -й фракции в тонкий продукт сепаратора. Просуммировав обе части уравнений по всем фракциям, получим:

$$Q_{cen} \sum_{i=1}^m f_i^{cen} C_{ii} = Q_{cen} - Q_{kp}, \quad (3.28)$$

$$Q_{cen} \sum_{i=1}^m f_i^{cen} (1 - C_{ii}) = Q_{kp}. \quad (3.29)$$

Из этих уравнений получим:

$$f_i^{kp} = \frac{f_i^{cen} (1 - C_{ii})}{\sum_{i=1}^m f_i^{cen} (1 - C_{ii})}, \quad (3.30)$$

$$f_i^{cc} = \frac{f_i^{cen} C_{ii}}{\sum_{i=1}^m f_i^{cen} C_{ii}}. \quad (3.31)$$

3. Разделение материала в концентраторе.

В концентраторе происходит отделение наиболее крупных частиц (рисунок 3.33). Эти частицы, с увлекаемыми мелкими, возвращаются в сепаратор. Остальные уходят в циклон.

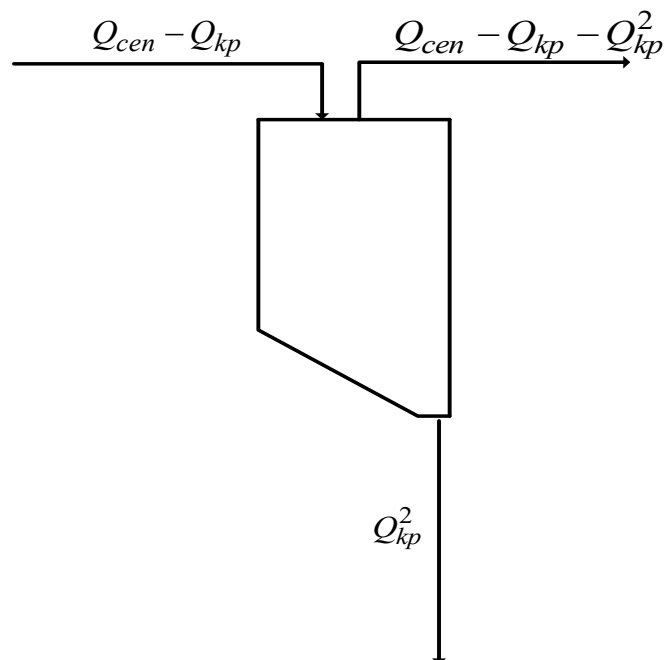


Рисунок 3.33 – Схема материальных и аэродинамических потоков в концентраторе

Уравнения баланса получаем:

$$(Q_{cen} - Q_{kp})f_i^{ck} K_{ii} = (Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2)f_i^{ck}, \quad (3.32)$$

$$(Q_{cen} - Q_{kp})f_i^{cc}(1 - K_{ii}) = Q_{kp}^2 f_i^{kp2}, \quad (3.33)$$

где f_i^{ck} – фракционный состав, выходящий из сепаратора; K_{ii} – коэффициент прохода i -й фракции в тонкий продукт концентратора. Суммирование по всем фракциям дает

$$(Q_{cen} - Q_{kp}) \sum_{i=1}^m f_i^{cc} K_{ii} = Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2, \quad (3.34)$$

$$(Q_{cen} - Q_{kp}) \sum_{i=1}^m f_i^{cc}(1 - K_{ii}) = Q_{kp}^2. \quad (3.35)$$

Отсюда получим:

$$f_i^{kp2} = \frac{f_i^{cc}(1 - K_{ii})}{\sum_{i=1}^m f_i^{cc}(1 - K_{ii})}, \quad (3.36)$$

$$f_i^{ck} = \frac{f_i^{cc} K_{ii}}{\sum_{i=1}^m f_i^{cc} K_{ii}}. \quad (3.37)$$

4. Очистка воздуха в циклоне.

В циклоне происходит осаждение пыли в готовый продукт, который выводится. Очищенный воздух подается в рециркуляционную линию (рисунок 3.34).

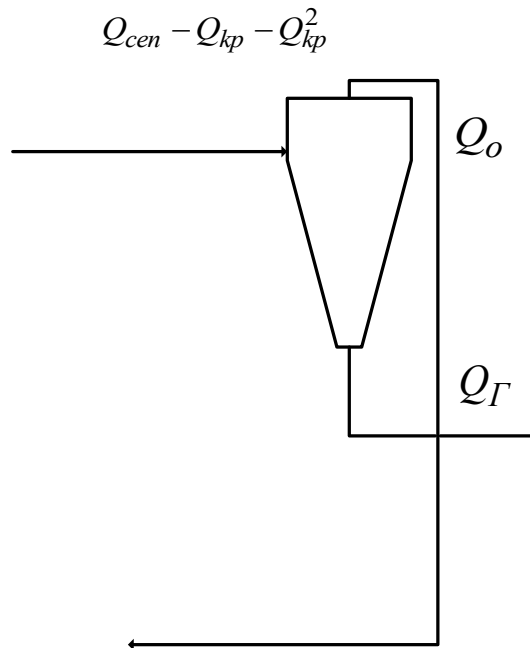


Рисунок 3.34 – Схема материальных и аэродинамических потоков в циклоне

Баланс материала (общий и по фракциям):

$$(Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2) f_i^{ck} \Pi_{ii} = Q_o f_i^0, \quad (3.38)$$

$$(Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2) f_i^{ck} (1 - \Pi_{ii}) = Q_{\Gamma} f_i^{\Gamma}. \quad (3.39)$$

где Π_{ii} – коэффициент осаждения ii -й фракции в циклоне.

Из уравнений (3.38), (3.39) получаем:

$$(Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2) \sum_{i=1}^m f_i^{ck} \Pi_{ii} = Q_o, \quad (3.40)$$

$$(Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2) \sum_{i=1}^m f_i^{ck} (1 - \Pi_{ii}) = Q_{\Gamma}, \quad (3.41)$$

$$f_i^0 = \frac{f_i^{ck} \Pi_{ii}}{\sum_{i=1}^m f_i^{ck} \Pi_{ii}}, \quad (3.42)$$

$$f_i^{\Gamma} = \frac{f_i^{ck} (1 - \Pi_{ii})}{\sum_{i=1}^m f_i^{ck} (1 - \Pi_{ii})}. \quad (3.43)$$

5. Слияние материальных потоков в рециркуляционной линии.

Уравнение баланса после слияния потоков (рисунок 3.35) имеет вид:

$$Q_o f_i^0 + Q_{kp}^2 f_i^{kp2} = Q_{kp} f_i^{kp}. \quad (3.44)$$

Выразим дисперсность готового продукта через дисперсность исходного материала. Для этого из уравнения (3.39) найдем

$$(Q_{cen} - Q_{kp} - Q_{kp}^2) f_i^{ck} = Q_{\Gamma} f_i^{\Gamma} (1 - \Pi_{ii})^{-1}. \quad (3.45)$$

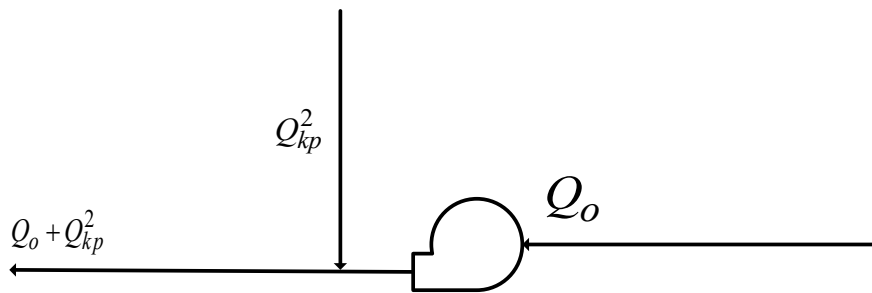


Рисунок 3.35 – Схема материальных и аэродинамических потоков в возвратной линии

Подставим (3.45) в (3.32)

$$(Q_{cen} - Q_{kp}) f_i^{cc} K_{ii} = Q_{\Gamma} f_i^{\Gamma} (1 - \Pi_{ii})^{-1}, \quad (3.46)$$

$$(\mathbf{Q}_{cen} - \mathbf{Q}_{kp})\mathbf{f}_i^{cc} = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1}. \quad (3.47)$$

Далее подставляем (3.46) в (3.26)

$$\mathbf{Q}_{cen} \mathbf{f}_i^{cen} \mathbf{C}_{ii} = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1}, \quad (3.48)$$

$$\mathbf{Q}_{cen} \mathbf{f}_i^{cen} = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{C}_{ii}^{-1}. \quad (3.49)$$

Подставляя (3.45) в (3.38), получаем

$$\mathbf{Q}_o \mathbf{f}_i^0 = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{C}_{ii}, \quad (3.50)$$

Далее подставив (3.47) в (3.33), получим:

$$\mathbf{Q}_{kp}^2 \mathbf{f}_i^{kp2} = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1} (1 - \mathbf{K}_{ii}), \quad (3.51)$$

Из формулы (3.21) имеем:

$$\mathbf{Q}_c \mathbf{f}_i^c = \mathbf{Q}_{cen} \mathbf{f}_i^{cen} - \mathbf{Q}_{kp} \mathbf{f}_i^{kp}. \quad (3.52)$$

Подставляя в (3.52) формулы (3.44), (3.49–3.51), получим:

$$\mathbf{Q}_c \mathbf{f}_i^c = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{C}_{ii}^{-1} - \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{C}_{ii} - \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} \mathbf{K}_{ii}^{-1} (1 - \mathbf{K}_{ii}), \quad (3.53)$$

$$\mathbf{Q}_c \mathbf{f}_i^c = \mathbf{Q}_\Gamma \mathbf{f}_i^\Gamma (1 - \mathbf{C}_{ii})^{-1} [\mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{C}_{ii}^{-1} - \mathbf{C}_{ii} - \mathbf{K}_{ii}^{-1} (1 - \mathbf{K}_{ii})], \quad (3.54)$$

$$\mathbf{f}_i^\Gamma = \frac{\mathbf{Q}_c}{\mathbf{Q}_\Gamma} \mathbf{f}_i^c [\mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{C}_{ii}^{-1} - \mathbf{C}_{ii} - \mathbf{K}_{ii}^{-1} (1 - \mathbf{K}_{ii})]^{-1} (1 - \mathbf{C}_{ii}). \quad (3.55)$$

где \mathbf{f}_i^Γ – массовая доля i -й узкой фракции в готовом продукте, выходящем из циклона и направляемом на складирование или отгрузку, \mathbf{Q}_c – массовый расход исходного материала, поступающего в сепаратор из мельницы, \mathbf{Q}_Γ – массовый расход готового продукта, выделенного циклоном, \mathbf{f}_i^c – массовая доля i -й узкой фракции в исходном материале, подаваемом в сепаратор, $(1 - \mathbf{K}_{ii})$ – доля i -й фракции, которая возвращается из концентратора в сепаратор, $(1 - \mathbf{C}_{ii})$ – доля i -й фракции, которая не осаждается в циклоне и уносится воздушным потоком в рециркуляционную линию.

В результате формула (3.55) позволяет выразить дисперсный состав готового продукта через дисперсный состав исходного.

Разработанная система уравнений представляет собой эффективный

инструмент для моделирования работы всего помольного комплекса в замкнутом цикле. Полученная формула (3.55) описывает прямую взаимосвязь между гранулометрическим составом конечного продукта (цемента), гранулометрическим составом исходного сырья и функциями эффективности классификации, присущими каждому аппарату в технологической цепи. Таким образом, открывает 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.

3.6 Выводы

1. На основе анализа технологических процессов производства цемента предложена обобщённая схема, иллюстрирующая роль *состава* – как интегрального фактора, определяющего качество цемента, рассматриваемого как конечного продукта, являющегося самостоятельным видом (или разновидностью) 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. Показано, что при прочих равных химическом и минеральном составах, наиболее значимые изменения в потребительских свойствах цемента происходят на третьем технологическом этапе стадии помола клинкера с добавками и последующей классификации. На долю помола клинкера с гипсов и, при необходимости, добавок, приходится более 40 % от общего электропотребления в производстве цемента, а также его продолжительность напрямую определяет время получения готового продукта. В связи с этим в рамках настоящей работы рассмотрено совершенствование процессов тонкого измельчения и воздушной классификации цемента, что согласуется с паспортом специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия в части пункта 7 «Развитие,

совершенствование и разработка новых энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов и оборудования для получения строительных материалов и изделий различного назначения».

2. На основании проведенного анализа классической и современной научной литературы в области производства цемента в замкнутом цикле, выявлены имеющиеся научные проблемы и существенные прикладные задачи в области классификации цемента. Это позволило выдвинуть рабочую гипотезу исследования, которая заключается в том, что повышение технологического процесса классификации цемента может быть достигнуто за счёт модернизации традиционной сепарационной системы – состоящей из динамического сепаратора и циклона, путём интеграции в неё аэродинамического концентратора с замкнутой рециркуляцией мелкодисперсной фракции. Предполагается, что такая компоновка 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.

3. Для реализации рабочей гипотезы исследования и предложенного комплекса мер, который может быть выполнен в виде единого технологического решения – путём создания аэродинамического комплекса системы «сепаратора + концентратора + циклона», разработан дизайн эксперимента, включающий как теоретические, так и практические этапы в зависимости от сегмента исследования: работа динамического сепаратора; работа циклона; взаимодействием системы в целом; свойствами материала; технологические и эксплуатационные причины.

4. На основании результатов обработки статистических данных, полученных с шести заводов-партнеров, установлено, что после разделения сепаратором в крупке 56–80 % вещества размером до 80 мкм уходит 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 %. Представленные данные свидетельствуют о переизмельчении материала. Повышение содержания мелких частиц фракции 0–5 мкм в цементе, приводит к повышению водопотребности растворной смеси, может негативно влиять на

плотность упаковки цементных частиц. Одновременно происходит перерасход электроэнергии на повторный помол готового продукта, снижение производительности помольного агрегата и ускоренный износ мелющих тел мельницы. В этой связи, оптимизация работы сепаратора с целью минимизации возврата готовой фракции представляет собой актуальную задачу для повышения технологической, экономической и энергетической эффективности процесса классификации вещества в производстве цемента в замкнутом цикле.

5. Проведённые расчеты по предложенной в рамках данной диссертации модели показали, что увеличение кратности рециркуляции материала положительно сказывается на количестве получаемого материала. Однако установлено, что эффект имеет предел: дальнейшее увеличение степени рециркуляции свыше трёхкратного значения не обеспечивает значимого улучшения гранулометрического состава. Это важный практический вывод для технологического процесса, позволяющий оптимизировать работу помольного агрегата, избегая нерациональных энергозатрат на избыточную циркуляцию.

6. На основе комплексного моделирования получена система уравнений, которая представляет собой эффективный инструмент для прогнозирования работы всего помольного комплекса в замкнутом цикле. Полученная итоговая формула (3.55) для расчета гранулометрического состава готового продукта через гранулометрический состав исходного, позволяет напрямую связать гранулометрический состав готового цемента с составом исходного материала и функционалом разделения каждого аппарата. Таким образом, открывается возможность для цифрового проектирования и оптимизации технологических режимов аэродинамического комплекса, без остановки производства, что является мощным инструментом для повышения эффективности и стабильности качества выпускаемого цемента.

4 РАЗРАБОТКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедр «Подъёмно-транспортных и дорожных машин» и «Материаловедения и технологии материалов», а также при использовании оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова; лабораторные испытания аэродинамического комплекса проходили на базе «Опытно-промышленного цеха» ИНО и ОПЦ НКМ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для оптимизации работы аэродинамического комплекса выполнено теоретическое моделирование процесса осаждения цемента с использованием характеристик материала, приведённых в главе 2.3. Моделирование основано на матричном описании фракционного состава и расчёте гидравлического сопротивления каскада аппаратов с применением волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях. Эти подходы позволяют не только оптимизировать текущие режимы работы, но и проектировать новые высокоэффективные аэродинамические комплексы с минимальными энергетическими потерями.

Для выявления оптимальных технологических параметров и режимов функционирования отдельных агрегатов в разработанном аэродинамическом комплексе для классификации цемента после помола сырьевой смеси, проведены исследования влияния ключевых технологических параметров: расхода сепарационного воздуха (Q , м³/ч), частоты вращения ротора сепаратора (n_p , об/мин), угла наклона лопастей (α_l , °) и ширины рабочей зоны концентратора (a , мм) – на производительности воздушного центробежного сепаратора (Q_c , кг/ч), эффективность процесса классификации (E , %) и качество получаемого продукта ($S_{уд}$, м²/кг).

Для количественной оценки результатов использованы методы многофакторного планирования эксперимента, включая центральный композиционный ротатбельный план (ЦКРП 2⁴). Это позволило проводить

оптимизацию (настройку) режимов работы аэродинамического комплекса для классификации цемента при получении продукта различных марок.

4.1 Лабораторная установка аэродинамического комплекса для классификации цемента и средства управления

Для проведения экспериментов по анализу процессов классификации цемента после помола сырьевой смеси (цементного клинкера и гипса) был использован цемент для марки ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н, химический и минеральный состав которого приведены в главе 2.3, с $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$. На основании предложенной модели (см. главу 3.3) была *разработана и смонтирована лабораторная установка аэродинамического комплекса* (рисунок 4.1), на которой проводилась проверка теоретически установленных режимов работы агрегатов и эффективности классификации продукта.



Рисунок 4.1 – Лабораторная установка аэродинамического комплекса:

- 1 – сепаратор; 2 – концентратор; 3 – осадительные циклоны; 4 – зернистый фильтр; 5 – расходомерное устройство; 6 – центробежный вентилятор; 7 – рециркуляционный газоход; 8 – жидкостный дифференциальный манометр; 9 – установка жидкостных дифференциальных манометров

Комплекс включает в себя центробежный сепаратор с турбинной зоной разделения (классификации), концентратор, осадительные циклоны, зернистый фильтр, расходомерное устройство, центробежный вентилятор, а также рециркуляционный газоход, обеспечивающий замкнутую циркуляцию газовой фазы. Для контроля и измерения перепадов давления на различных участках установки используется жидкостной дифференциальный манометр U. Все элементы комплекса соединены между собой с помощью патрубков, что позволяет эффективно управлять аэродинамическими параметрами и обеспечивать стабильные условия проведения эксперимента.

Сепаратор и вентилятор, входящие в аэродинамический комплекс, снабжены регулируемыми электрическими приводами, которые позволяют изменять частоту вращения ротора сепаратора и ротора вентилятора путем изменения частоты тока питающей сети при помощи частотного преобразователя (тип LS600–4005 компании Long Shenq Electronic Co.LTD (Тайвань) мощность 5,5 кВт).

Мощность, потребляемая ротором сепаратора и ротором вентилятора, контролировалась вольтамперметрами М 2015 и М 2017.

Таким образом, разработанная лабораторная установка **аэродинамического комплекса** представляет собой модель, воспроизводящую технологические процессы промышленного сепарационного оборудования. Наличие регулируемых приводов, системы контроля давления и рециркуляционного контура обеспечивает высокую гибкость при проведении экспериментальных исследований и позволяет моделировать широкий спектр рабочих режимов.

4.2 Процессы классификации цемента в аэродинамическом комплексе с рециркуляцией

Отличительной особенностью разработанного аэродинамического комплекса по сравнению со стандартным промышленным оборудованием является наличие концентратора, установленного между сепаратором и циклоном. Конструкция аэродинамического комплекса включает центробежный сепаратор (1) (см. рисунок

4.1), оснащенный в верхней части устройствами для подачи исходного материала. Внутри сепаратора материал разделяется на две фракции: крупка выводится через отдельный патрубок, а промежуточный продукт вместе с сепарационным воздухом – через патрубок уходит в концентратор (2).

Настройка центробежного сепаратора обеспечивает вывод через патрубок промежуточного продукта, состоящего из частиц крупнее целевого (готового). Благодаря этому снижается эффект ортокинетической коагуляции, и основная масса готового продукта выносится воздухом в следующую ступень – концентратор (2). Такая схема работы повышает эффективность первичной сепарации.

В концентрате происходит отделение грубого продукта (крупнее готового), который самотеком возвращается в центробежный сепаратор (1) через циркуляционный газопровод (7) вместе с воздухом. Одновременно выделенный готовый продукт с воздушным потоком направляется по патрубку в осадительные циклон (3) для окончательного осаждения и последующей отправки на склад.

Воздух, очищенный от мелкой фракции в циклоне, отводится по патрубку в зернистый фильтр (4) для дополнительной очистки сепарационного воздуха. Очищенный воздух по патрубку подаётся к внешнему центробежному вентилятору (6) и возвращается в сепаратор по рециркуляционному газопроводу (7).

Процесс классификации материала в сепараторе осложняется явлением ортокинетической коагуляции, описанным в работе Дуда В. [131] и впервые выявленным Р. Зигмонди [133] (см. главу 3.1). В основе данного механизма лежит притяжение мелких частиц к более крупным, которые увлекают их за собой. В результате в крупку попадают и мелкие частицы, соответствующие по размеру готовому продукту. Это приводит к снижению эффективности классификации.

С целью минимизации данного эффекта в потоке сепарационного воздуха между центробежным сепаратором и циклонами установлен концентратор. В нём из пылевоздушного потока выделяется готовый продукт, который вместе с воздухом направляется в осадительные циклоны. Более грубые фракции самотеком

поступают в патрубок возврата сепарационного воздуха, откуда попадают в центробежный сепаратор.

Таким образом, внедрение концентратора в аэродинамический комплекс между центробежным сепаратором и осадительными циклонами позволяет целенаправленно разделить промежуточный поток на грубую фракцию, возвращаемую в сепаратор для повторной обработки, и готовый тонкодисперсный продукт, направляемый на окончательное осаждение в циклон. Это существенно снижает негативное влияние ортокинетического эффекта, повышает точность классификации и общую эффективность классификации, обеспечивая получение конечного продукта с требуемым гранулометрическим составом и снижает энергозатраты на повторный помол продукта.

4.3 Матричное моделирование процесса осаждения цемента в технологической системе аэродинамического комплекса

Для моделирования процесса осаждения цемента в технологической системе аэродинамического комплекса использован матричный подход к описанию трансформации гранулометрического состава материала при прохождении через элементы комплекса. Использование операторных уравнений и матриц фракционных пропусков позволило формализовать и численно промоделировать процессы сепарации, спрогнозировать состав готового продукта и оценить эффективность работы каждого аппарата.

Преобразование гранулометрического состава материала в результате его прохождения через комплексы систем может быть описано операторным уравнением:

$$Lf = f', \quad (4.1)$$

где L – оператор, описывающий функционирование элементов комплекса, f, f' – векторы гранулометрического состава материала на входе и выходе из элемента комплекса:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{pmatrix}, \mathbf{f}' = \begin{pmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ \dots \\ f'_m \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

В формуле (4.2) f_1, f_2, \dots, f_m и f'_1, f'_2, \dots, f'_m являются относительными массовыми долями частиц материала в соответствующие фракции.

Оператор L задается матрицами фракционных пропусков, характеризующих функционирование мельниц, сепараторов, циклонов, аспирационных шахт, рукавных фильтров и т.д. В матричном виде уравнение (4.1) запишется как

$$\mathbf{M}\mathbf{f} = \mathbf{f}', \quad (4.3)$$

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1m} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{m1} & m_{m1} & \dots & m_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ \dots \\ f'_m \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Матрица M будет иметь различный вид для разных элементов. При помощи матриц фракционных пропусков (проскоков) можно охарактеризовать функционирование мельниц, сепараторов, циклонов для осаждения цемента и пылеочистки, аспирационной шахты, рукавных фильтров и т.д. [42, 142].

Таким образом, применение матричного формализма для описания преобразования гранулометрического состава материала в каждом аппарате комплекса позволило создать целостную математическую модель всего технологического процесса. Этот подход обеспечивает возможность количественного прогнозирования фракционного состава продуктов на всех стадиях классификации с учетом рециркуляции.

4.3.1 Определение основных характеристик и матрицы классификации сепаратора¹

¹ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: Прокопенко, В. С. Методика определения основных характеристик и построения матрицы классификации сепаратора / В. С. Прокопенко, Т. Н. Орехова, Р. Р. Шарапов // 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.

Сформулированы ключевые показатели работы сепаратора: производительность, кратность циркуляции, КПД и эффективность разделения [133]. Построена диагональная матрица классификации, отражающая доли выноса отдельных фракций в готовый продукт [143]. Подчёркнуто, что качество сепарации зависит от дисперсности исходного материала и режимов работы.

Сепаратор принято характеризовать обобщенными показателями, к которым относится общая производительность сепаратора (Q), равная массовому потоку исходного материала ($Q_{И}$), и производительности по продуктам разделения – по готовому продукту ($Q_{Г}$) и крупке ($Q_{кр}$). Отношение общей производительности сепаратора к его производительности по готовому продукту называется кратностью циркуляции $k_{Ц}$:

$$k_{Ц} = \frac{Q_{И}}{Q_{Г}}. \quad (4.5)$$

Запишем уравнения баланса всего материала с учетом его мелкой фракции:

$$Q_{И} = Q_{Г} + Q_{кр}, \quad (4.6)$$

$$Q_{И}D_{И} = Q_{Г}D_{Г} + Q_{кр}D_{кр}, \quad (4.8)$$

где $D_{И}$, $D_{Г}$, $D_{кр}$ – относительные проходы исходного, готового материалов и крупки через контрольное сито, т.е. относительные доли мелкого материала в перечисленных продуктах, %. После преобразований получим:

$$k_{Ц} = \frac{D_{Г} - D_{кр}}{D_{И} - D_{кр}}. \quad (4.9)$$

Т.е. кратность циркуляции зависит от дисперсности исходного материала и продуктов разделения.

Коэффициент полезного действия (КПД) сепаратора равен отношению масс мелкой фракции в готовом и исходном продукте:

$$\eta = \frac{Q_{Г}D_{Г}}{Q_{И}D_{И}} = \frac{D_{Г}(D_{Г} - D_{кр})}{D_{И}(D_{И} - D_{кр})}. \quad (4.10)$$

Результаты классификации можно характеризовать различными показателями: эффективностью, извлечением, загрязнением, концентрацией, степенью сокращения, степенью обогащения и т.д. Общей характеристикой качества классификации исходного продукта является **показатель**

эффективности, представляющий собой разность между относительным выходом мелкой и крупной фракций исходного материала в готовый продукт:

$$E_C = \frac{Q_{ГD_{Г}}}{Q_{ИD_{И}}} - \frac{Q_{ГR_{Г}}}{Q_{ИR_{И}}} = \frac{(D_{Г}-D_{И})(D_{И}-D_{кр})}{D_{И}(100-D_{И})(D_{Г}-D_{кр})}. \quad (4.11)$$

На рисунке 4.2 представлен график пофракционной эффективности сепаратора, который показывает, насколько точно сепаратор разделяет частицы определённого размера (d , мкм) на мелкую и крупную фракции.

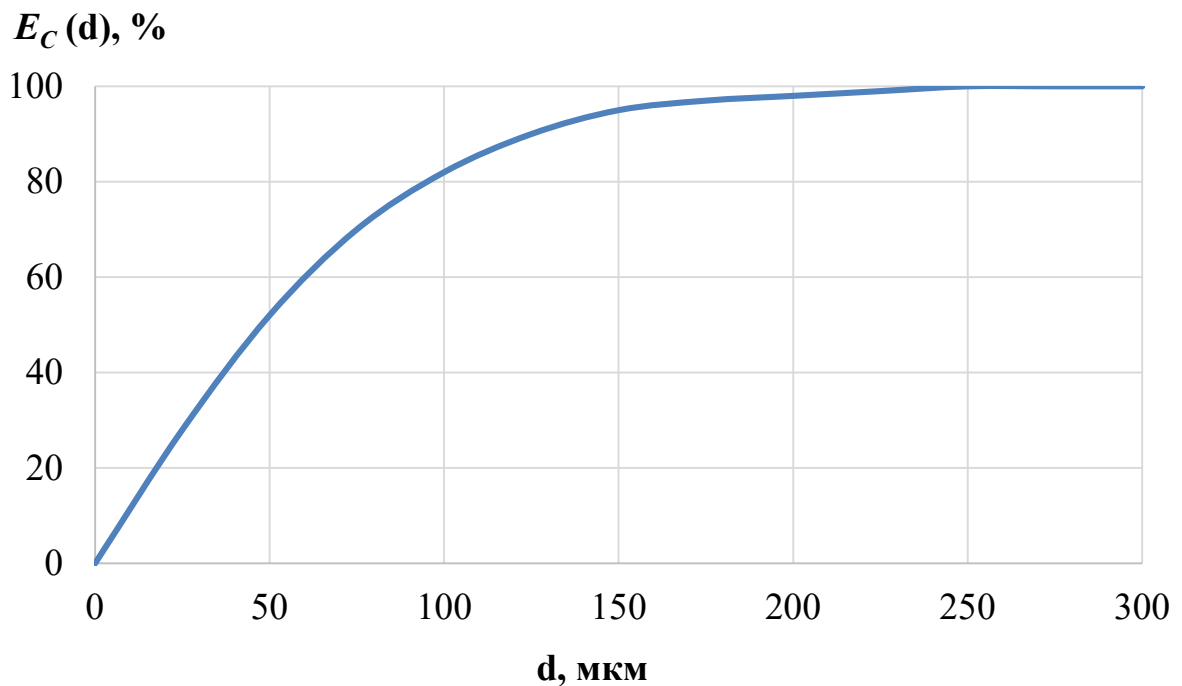


Рисунок 4.2 – График пофракционной эффективности сепаратора (в %)

Также качество классификации можно представить, как отношение некоторых контрольных размеров, например:

$$\chi = \frac{d_{75}}{d_{25}}, \quad (4.12)$$

где d_{25} и d_{75} – размеры ячеек сит, для которых полные остатки готового продукта составляют 25 и 75 % его начальной массы. Показатель χ приближается к единице с увеличением точности разделения.

Процесс классификации тонкодисперсных фракций может быть идентифицирован по опытным данным, которыми являются относительные

выносы (доли) отдельных фракций исходного материала в готовый продукт. Эти доли являются элементами диагональной матрицы классификации C :

$$C_{ii} = \phi(d_i), \quad (4.13)$$

где d – диаметр частицы. Таким образом, формула (4.13) представляет собой дискретный аналог функции разделения. Матрица C , составленная из этих элементов, имеет следующий диагональный вид:

$$C = \begin{pmatrix} \phi(d_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \phi(d_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \phi(d_i) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Таким образом, диагональная матрица классификации, основанная на экспериментально определяемой функции разделения, является эффективным инструментом для описания работы сепаратора. Она позволяет связать дисперсность исходного материала и режимные параметры с фракционным составом выходных продуктов и обобщенными показателями, такими как кратность циркуляции и эффективность классификации.

4.3.2 Определение основных характеристик и матрицы классификации концентратора

Моделирование эффективности концентратора выполнено на основе логарифмического нормального закона распределения частиц и вероятностных зависимостей фракционного улавливания. Получены формулы для расчёта общей и пофракционной эффективности, а также матрица коэффициентов пропуска.

Прогнозирование фракционной эффективности улавливания частиц основывается на предположении, что случайная величина фракционной степени улавливания частиц подчиняется логарифмическому нормальному закону распределения [144]. Тогда для прогнозирования фракционной эффективности $\eta(\delta)$ применяются вероятностные зависимости:

$$\eta(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \Phi(x), \quad (4.15)$$

где

$$x = \frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma_{\eta}}, \quad (4.16)$$

$$\sigma_{\eta} = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}. \quad (4.17)$$

Для прогнозирования общей эффективности E :

$$E = \Phi(x), \quad (4.18)$$

где

$$x = \frac{\lg \delta_{0,5} - \lg \delta_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_r}}. \quad (4.19)$$

В этих зависимостях $\Phi(x)$ – интеграл вероятностей, δ – размер частицы, σ_{η} – среднеквадратичное распределение фракционных коэффициентов очистки, δ_{50} , δ_{16} , δ_{84} – размеры частиц, улавливаемых аппаратом на 50, 16 и 84 %, $\delta_{0,50}$ – медианный размер частиц, который делит массу пыли на две равные части, σ_r – среднеквадратичное отклонение распределения частиц по размерам. Если размеры частиц подчиняются логарифмическому нормальному закону распределения, то:

$$\sigma_r = \frac{\delta_{0,5}}{\delta_{0,16}} = \frac{\delta_{84,1}}{\delta_{15,9}}. \quad (4.20)$$

где $\delta_{0,16}$, $\delta_{0,74}$ – размеры частиц, для которых массовые доли с меньшим размером равны 0,16 и 0,84 соответственно, $\delta_{15,9}$, $\delta_{84,1}$ – размеры частиц, улавливаемых на 15,9 и 84,1 %.

Согласно работам [145, 146], эффективность можно рассчитать с использованием соотношения фракционной эффективности, которая дает зависимость эффективности улавливания от размера частиц. В сочетании с данными о распределении поступающих в пылесадитель частиц по размерам фракционная эффективность позволяет определить общую эффективность улавливания. Для камер с $L/H > 3$ значение парциальных коэффициентов очистки (в %) может быть найдено с достаточной степенью точности на основании расчетов средней концентрации частиц соответствующего размера в выходном сечении пылесадительной камеры по формуле (4.21):

$$\varepsilon_n = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{i} \sum N_i\right), \quad (4.21)$$

где i – число точек, для которых рассчитывается концентрация частиц; N_i – отношение концентрации частиц данного размера в расчетной точке выходного сечения камеры к их концентрации во входном сечении. Распределение частиц по размерам в этом случае подчиняется нормальному закону распределения. Тогда:

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1. \quad (4.22)$$

Параметры очистки x_1 и x_2 (параметры функции парциального распределения $\Phi(x)$) определяются по формулам:

$$x_1 = \frac{H+h-L\frac{v_B}{v}}{\sqrt{2D_t\frac{l}{v}}}, \quad x_2 = \frac{H-h-L\frac{v_B}{v}}{\sqrt{2D_t\frac{l}{v}}}, \quad (4.23)$$

где h – расстояние от потолка камеры; D_t – коэффициент турбулентной диффузии частиц, где H – высота камеры осаждения, м; L – длина камеры, м; v_B – скорость воздушного потока, м/с; v – скорость осаждения частицы, м/с; l – длина пути смешения, м.

Полный коэффициент очистки находится как сумма произведений долей частиц соответствующих фракций на их фракционные коэффициенты очистки:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^k \varepsilon_n \frac{N}{100} \Delta d. \quad (4.24)$$

где Δd – интервал размера фракции, мкм, N – общее число фракций.

На рисунке 4.3 представлен график пофракционной эффективности концентратор, который показывает, насколько точно концентратор разделяет частицы определённого размера на готовый продукт и грубую фракцию.

Диагональная матрица коэффициентов пропуска отдельных фракций концентратором задается выражением:

$$K_{ii} = \eta(d_i), \quad (4.25)$$

при этом все внедиагональные элементы равны нулю. Таким образом, матрица K имеет вид:

$$K = \begin{pmatrix} \eta(d_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \eta(d_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \eta(d_i) \end{pmatrix}. \quad (4.26)$$

Таким образом, моделирование работы концентратора на основе логарифмически-нормального закона распределения частиц и вероятностного подхода к описанию фракционного улавливания позволило получить расчётные зависимости для его эффективности. Построенная матрица коэффициентов пропуска формализует процесс выделения целевой фракции в этом аппарате.

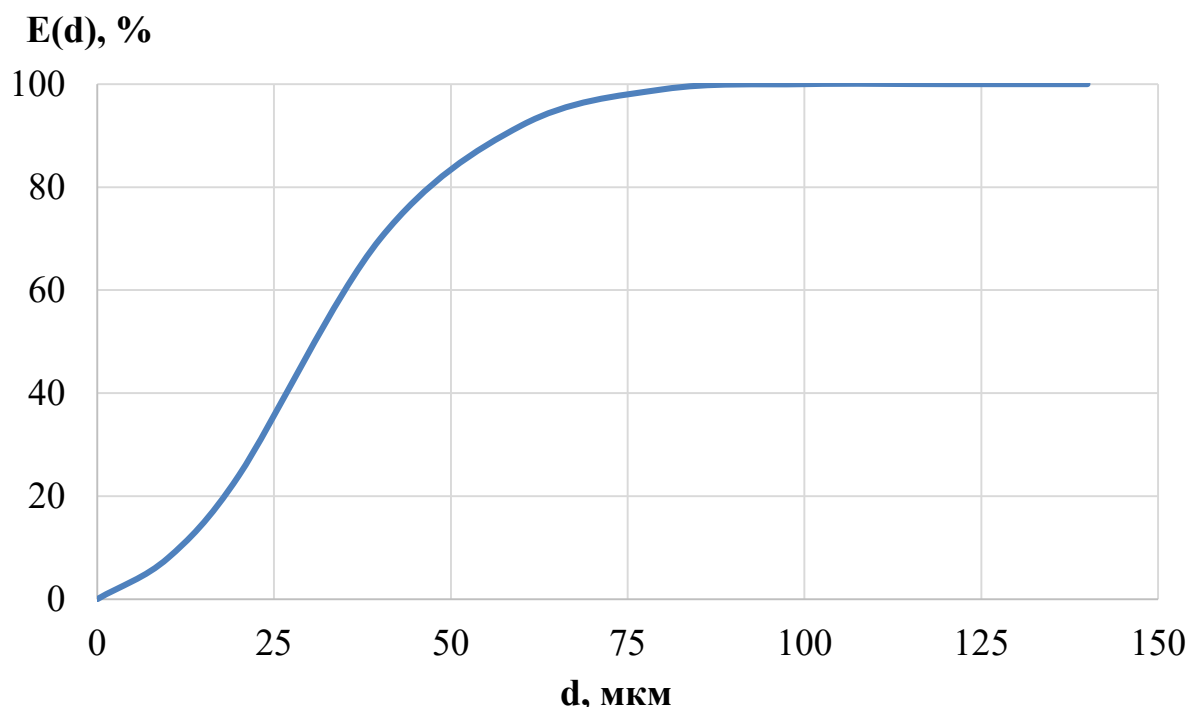


Рисунок 4.3 – Пофракционная эффективность концентратора

4.3.3 Определение матрицы коэффициентов пропуска отдельных фракций пыли циклоном²

² Прокопенко, В. С. Моделирование пропуска отдельных фракций пыли в циклоне и построение матрицы / В. С. Прокопенко, Т. Н. Орехова, Р. Р. Шарапов // 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.

На основе метода Дейча рассчитана фракционная эффективность циклонов и построена соответствующая матрица пропуска [147]. Показано, что при каскадном включении аппаратов общая эффективность значительно возрастает, особенно для частиц крупнее 80 мкм.

Прогнозирование фракционной эффективности циклонов производится по методу Дейча [87]:

$$\eta(d_i) = 1 - \exp\left(\frac{2\pi R_0 V_0(d_i) H_0 \chi(d_i)}{L_0}\right), \quad (4.27)$$

где R_0 – условный радиус осаждения, H_0 – высота поверхности осаждения, L_0 – объемный расход очищаемого газа, V_0 – скорость осаждения (для частиц размером d_i), $\chi(d_i)$ – коэффициент неоднородности распределения концентрации пыли. С учетом этих коэффициентов уравнение (4.27) может быть записано [42]:

$$\eta(d_i) = 1 - \exp\left(-0,064 d_i^2 k(d_i)\right), \quad (4.28)$$

где зависимость $k(d_i) = \frac{\chi(d_i)}{\Phi(d_i)}$ определяется путем обработки экспериментальных данных, $\Phi(d_i)$ – коэффициент формы частицы, а размер частицы задается в микронах.

На рисунке 4.4 изображены кривые, построенные по формуле (4.28), показывающие зависимость эффективности улавливания $\eta(d_i)$ циклона от размера частиц (d , мкм) для шести различных значений безразмерного коэффициента $k(d_i)$: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 5; 6; 10. График наглядно демонстрирует, что эффективность циклона критически зависит от параметра $k(d_i)$, и правильный его подбор позволяет достичь высокой степени очистки для целевого диапазона дисперсности.

По фракционным степеням очистки и заданному составу улавливаемой пыли $\Delta(d_i)$ находится общая эффективность очистки запыленного технологического воздуха:

$$\eta_u = \sum_{i=1}^m \eta(d_i) \Delta D(d_i). \quad (4.29)$$

Матрица коэффициентов пропуска отдельных фракций пыли циклонами для

осаждения тонкого продукта сепарации и очистки сепарационного и аспирационного воздуха задается выражением [81]:

$$\eta_{ii} = \exp(-0,064d_i k(d_i)). \quad (4.30)$$

где d_i – средний диаметр частиц i -й фракции (мкм), $k(d_i)$ – корректирующая функция, зависящая от размера частиц, 0,064 – эмпирический коэффициент, определяемый характеристиками циклона. Матричный форма записи (4.30) имеет вид:

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \eta_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \eta_{nn} \end{pmatrix}, \quad (4.31)$$

где n – количество рассматриваемых фракций пыли.

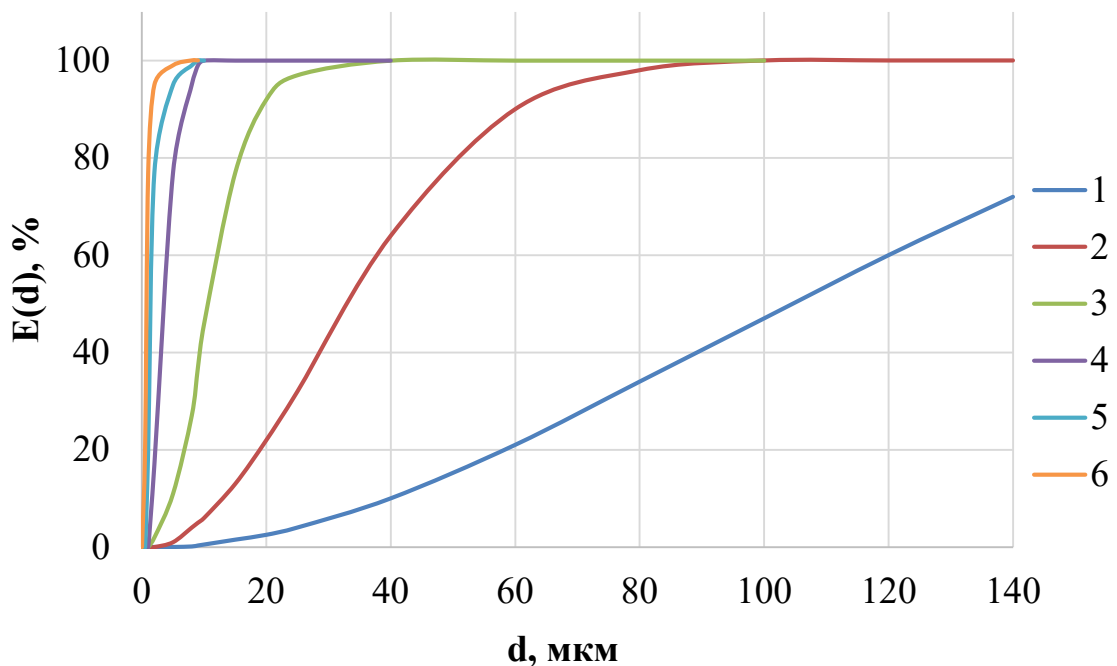


Рисунок 4.4 – Фракционная эффективность циклона при различном коэффициенте $k(d_i)$: 1 – 0,001; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 1; 5 – 5; 6 – 10

Данная модель позволяет учесть фракционный состав пыли при расчётах эффективности очистки воздуха в циклонах.

На рисунке 4.5 представлены кривые, описывающие зависимость коэффициента пропуска циклоном от размера частиц для тех же шести значений

параметра $k(d_i)$), что и на рисунке 4.4: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 5; 10. Коэффициент пропуска, определяемый как доля неуловленных частиц, рассчитывается как величина, дополняющая фракционную эффективность улавливания до единицы: $\Pi(d)=1-\eta(d_i)$. Эти кривые являются основой для построения матрицы коэффициентов пропуска Π_{ii} (см. формулу 4.28), используемой в матричной модели всего комплекса.

При последовательной установке нескольких аппаратов (каскадная, или многоступенчатая очистка), применяемой для более полного очищения, суммарная эффективность очистки определяется по формуле

$$E = (1 - [1 - E_1] \cdot [1 - E_2] \cdot \dots \cdot [1 - E_n]) \cdot 100 \% \quad (4.32)$$

где E_1, E_2, \dots, E_n – эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы).

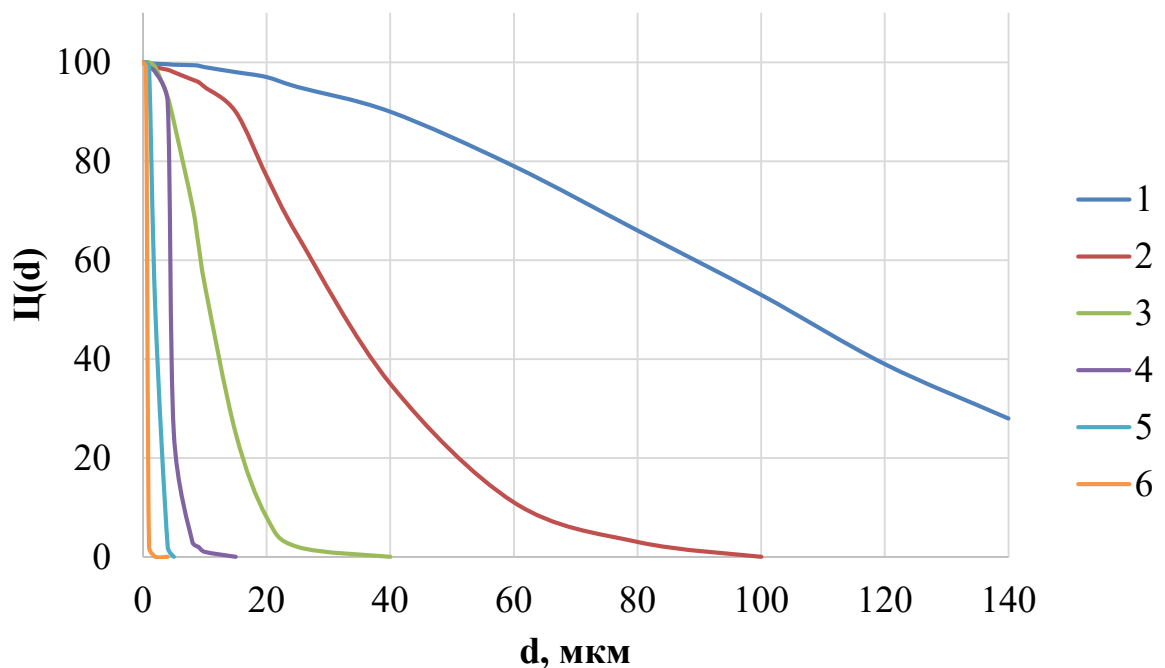


Рисунок 4.5 – Изменение коэффициентов матрицы пропуска циклона

при различном коэффициенте $k(d_i)$:

1 – 0,001, 2 – 0,01, 3 – 0,1, 4 – 1, 5 – 5, 6 – 10

На рисунке 4.6 приведен сводный график зависимости эффективности от размера частицы, позволяющий сравнить фракционную эффективность каждого аппарата в отдельности и суммарную эффективность всего каскада, которая

располагается существенно выше всех отдельных кривых. Для частиц крупнее 80 мкм эффективность каскада «сепаратор + концентратор + циклон» приближается к 99 %, что демонстрирует комбинированный результат от их последовательного включения.

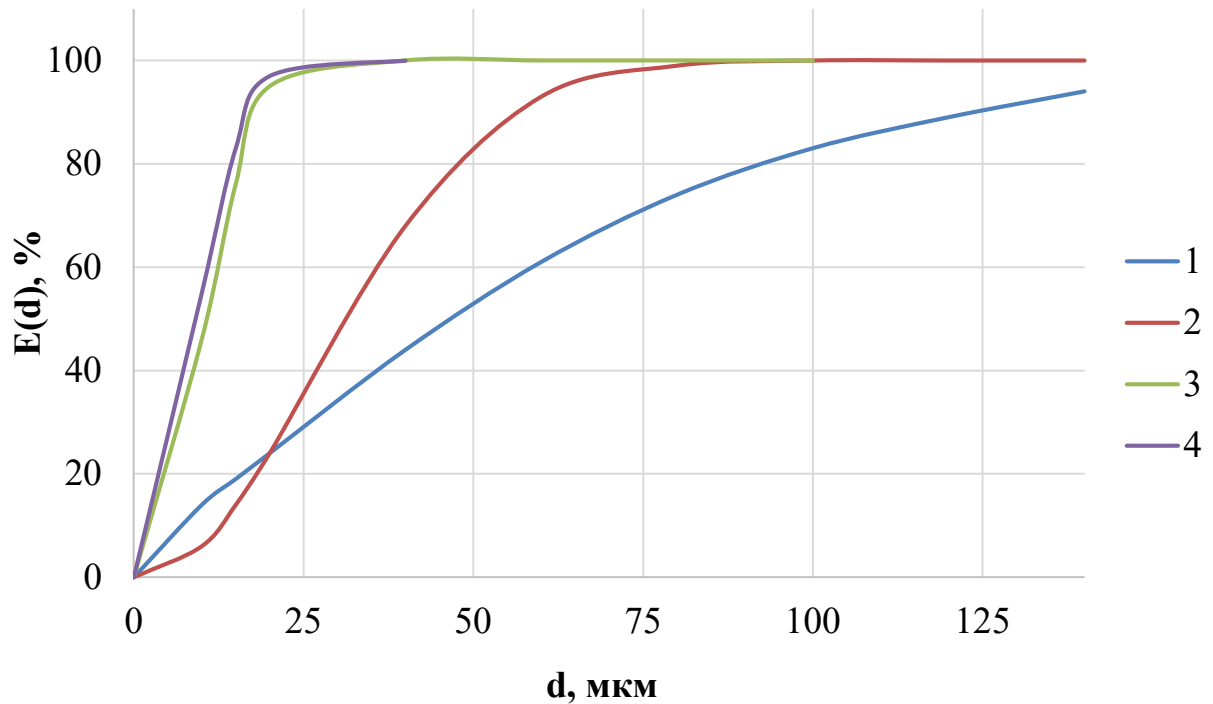


Рисунок 4.6 – Эффективность аппаратов:

1 – сепаратора, 2 – концентратора, 3 – циклона, 4 – суммарная

Зависимость суммарной фракционной эффективности от коэффициента $k(d_i)$ представлена на рисунке 4.7. График, аналогичный рисунку 4.6 (кривая 4), но демонстрирующий, как изменяется суммарная эффективность всего комплекса в зависимости от размера частиц при пяти различных значениях коэффициента $k(d_i)$: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 5; 10. Таким образом, установка концентратора перед циклоном выполняет роль избирательно регулятора потока, позволяя управлять как количеством (за счет возврата грубой фракции и изменения кратности циркуляции), так и качеством (за счет подачи в циклон предварительно обогащенного тонкой фракцией материала) конечного продукта из комплекса.

Использование многоступенчатой очистки приводит к повышению

эффективности. Изменение эффективности при добавлении аппаратов в систему показано на рисунке 4.8. Анализ показывает, что для частиц диаметром больше 80 мкм эффективность очистки сепаратором составляет 73 %, тогда как сепаратором с концентратом – 99 %.

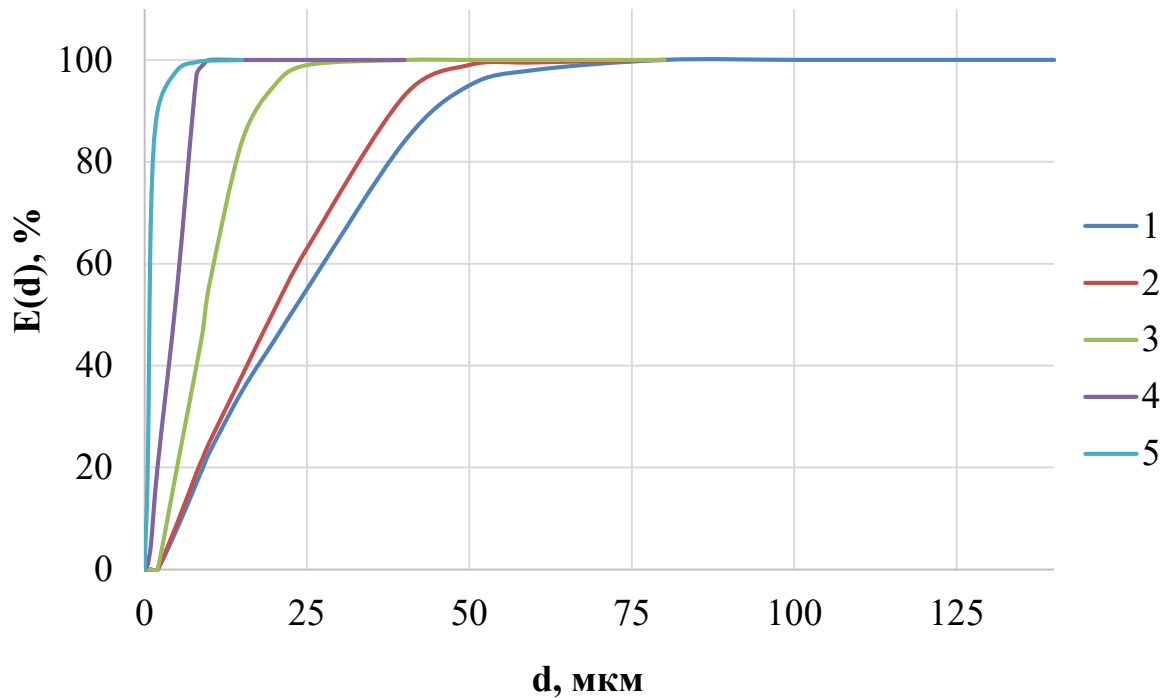


Рисунок 4.7 – Суммарная фракционная эффективность при различном коэффициенте $k(d_i)$: 1 – 0,001; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 1; 5 – 10

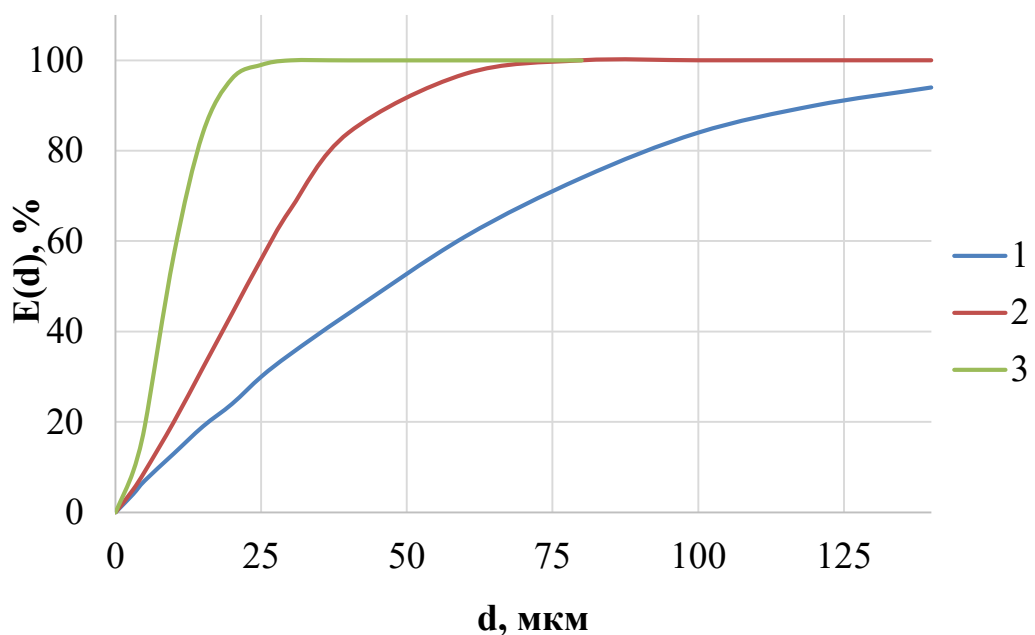


Рисунок 4.8 – Эффективность при последовательной установке нескольких

аппаратов: кривая 1 – сепаратор, 2 – сепаратор и концентратор,
3 – сепаратор, концентратор и циклон

Таким образом, на основе метода Дейча получены аналитические выражения (4.30) для фракционной эффективности циклона, чувствительной к параметру $k(d_i)$, характеризующему его конструкцию и режим работы. Моделирование подтвердило, что каскадное включение аппаратов «сепаратор + концентратор + циклон» приводит к синергетическому эффекту и резкому повышению суммарной эффективности улавливания, особенно для частиц крупнее 80 мкм.

4.3.4 Определение дисперсности готового продукта через дисперсность исходного материала

Для определения дисперсности готового продукта через дисперсность исходного материала представлено матричное выражение (4.33), связывающее гранулометрический состав исходного и конечного продукта с учётом рециркуляции. Моделирование подтвердило снижение доли крупных фракций в выходном материале и позволило оценить влияние кратности циркуляции на фракционный состав.

В случае полидисперсной среды вычисление дисперсности готового продукта через дисперсность исходного материала удобно представить в матричном виде. Записывая для каждого аппарата каскада преобразование дисперсного состава в виде (3.50) (см. главу 3.4), можем рекуррентные соотношения (3.15)–(3.51) (см. главу 3.3, 3.4) представить в матричном виде. Матричная форма удобна для восприятия и машинного вычисления. Тогда дисперсность готового продукта выразится через дисперсность исходного материала следующим выражением:

$$f^{\Gamma} = \frac{1}{k_u} f^c [K^{-1} C^{-1} - \Pi - K^{-1} (I - K)]^{-1} (I - \Pi), \quad (4.33)$$

где $k_u = \frac{Q_f}{Q_c}$ – кратность циркуляции, I – единичная матрица.

На рисунке 4.9 представлен гранулометрический состав материала на входе в аэродинамический комплекс, отображающий массовые доли ($R(d)$, %) частиц исходного цемента в различных фракциях (d , мкм). Отражает неоднородный состав материала после помола.

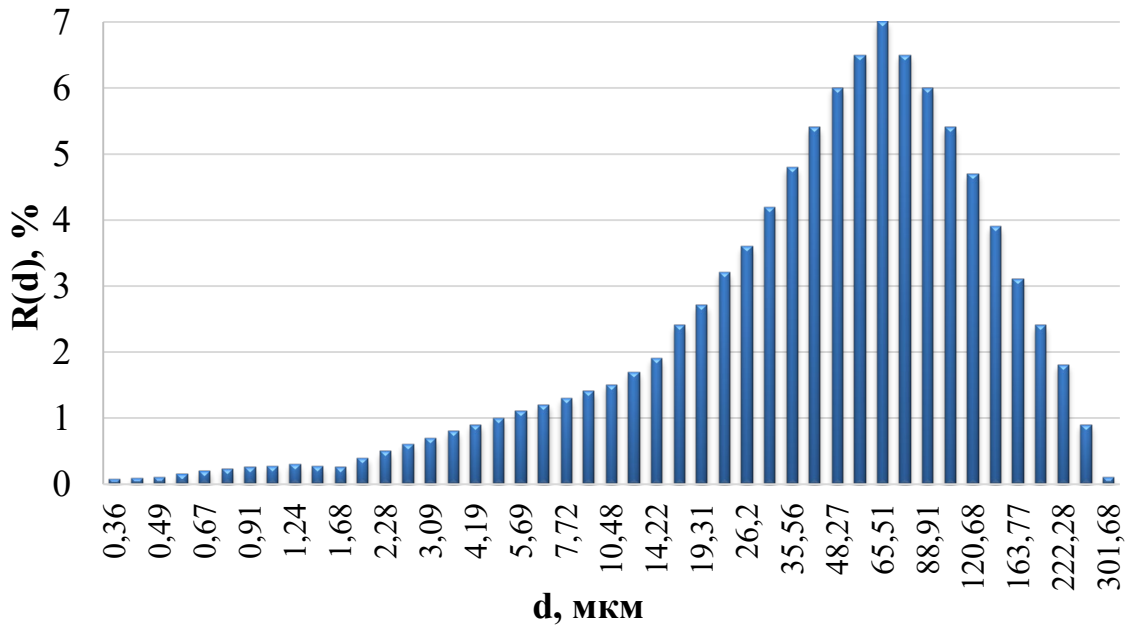


Рисунок 4.9 – Гранулометрический состав материала на входе в сепаратор

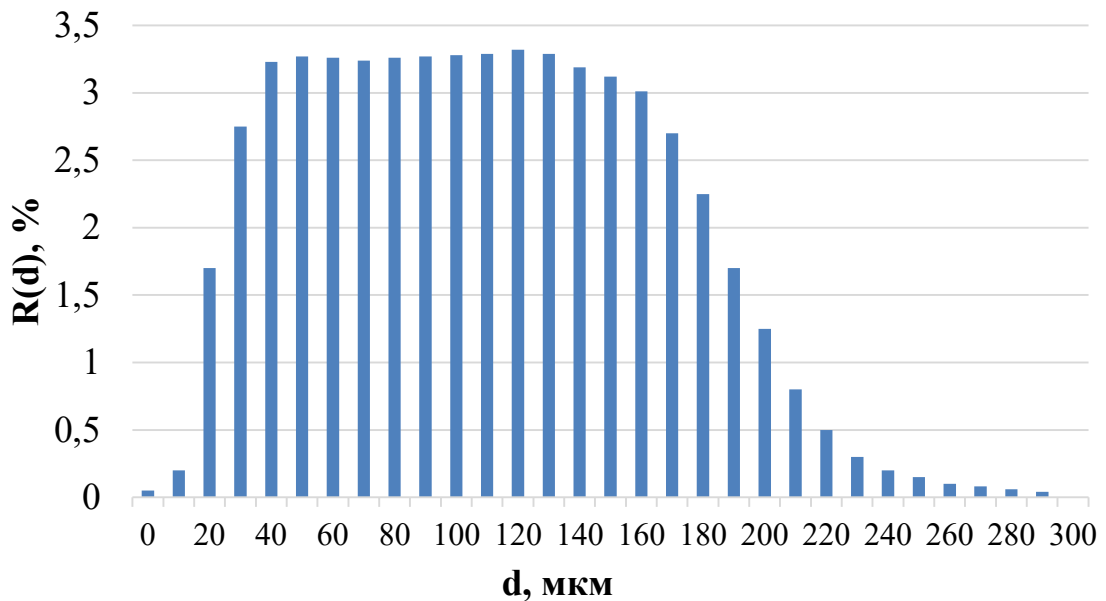


Рисунок 4.10 – Гранулометрический состав материала на выходе из циклона при $k_u=1$

На рисунке 4.10 представлена гистограмма, отображающая расчетный фракционный состав готового продукта после прохождения через весь аэродинамический комплекс с рециркуляцией, т.е. состав готового продукта на выходе из циклона, полученный с использованием матричной модели (формула 4.30). Моделирование выполнено для режима работы с кратностью циркуляции $k_{ци} = 1$.

Гистограмма наглядно демонстрирует, как многоступенчатое разделение и рециркуляция в аэродинамическом комплексе «сепаратор + концентратор + циклон» существенно изменяет состав материала по сравнению с входным (см. рисунок 4.9). В результате значительно снижается массовая доля крупных фракций и формируется распределение, смещенное в область мелких частиц, что соответствует получению тонкодисперсного продукта с заданными свойствами.

Таким образом, полученное матричное выражение, связывающее гранулометрический состав на входе и выходе комплекса с учётом рециркуляции, является основой для расчёта и прогнозирования дисперсности готового продукта. Моделирование по формуле (4.30) наглядно демонстрирует, как рециркуляция и многоступенчатое разделение приводят к значительному снижению доли крупных фракций в конечном продукте.

4.4 Расчет сопротивления каскада аппаратов

Для оценки энергетических потерь и оптимизации гидравлического режима выполнен расчёт гидравлического сопротивления комплекса на основе теории распространения волн в пылевоздушных сетях. Введены понятия *проводимости* и *акустического сопротивления* элементов, что позволило оценить энергетические потери в системе.

Проводимостью – это понимается величина, характеризующая способность пропускать объёмный поток среды при заданном избыточном давлении.

Акустическое сопротивление – это мера противодействия

распространению акустической волны, определяемая как отношение избыточного давления к объёмному расходу.

Современное проектирование аппаратов со сложными формами гидравлических и пылевоздушных сетей не может проводиться достаточно правильно без понимания основных физико-механических процессов, происходящих в сложных элементах сетей. Конфигурации участков сетей, их геометрические параметры, режимы течения столь разнообразны, что в литературе не всегда удастся найти необходимые опытные данные [148]. Тем более это касается случаев, когда разрабатываются новые аппараты и сети со сложной геометрией.

Распространение сплошной среды по разветвленной системе (сети), которой является каскад аппаратов, сопровождается локальными возмущениями, вносимыми в систему различными факторами – неравномерностью работы вентилятора, слиянием рециркуляционного потока и т.д. Аналитическое описание движения сплошной среды основывается на уравнениях Эйлера [149, 150] или Навье-Стокса [151, 152]. Но из-за сложной геометрии и наличия неоднородностей в системе, аналитическое решение данной системы уравнений затруднительно или вообще невозможно. Для решения таких уравнений в отдельных элементах можно применить методы подобия [153], вариационные [154] или методы интегральных соотношений [155, 156]. Одним из методов решения заданных уравнений – это упрощение до уравнений гидравлического приближения [157].

Возмущения, вносимые в поток различными факторами, приводят к тому, что по сплошной среде распространяются волны. Поэтому для исследования течения по разветвленной системе каскадов применим теорию распространения волн в жидкостях [158].

Предположим, что изменение избыточного давления в потоке:

$$p_e = p - p_0 \quad (4.34)$$

где p_e – избыточное давление, Па; p – плотность среды, кг/м³.

В поперечном сечении пренебрежимо мало. В формуле (4.34) p_0 – невозмущенное

гидростатическое давление. Ускорение жидкости вызвано градиентом избыточного давления.

Плотность ρ и площадь поперечного сечения A связаны с избыточным давлением соотношениями:

$$\rho = \rho(p_e, S), \quad (4.35)$$

$$A = A(p_e, x), \quad (4.36)$$

где S – энтропия. Эти формулы рассматривают сжимаемость жидкости при данной энтропии S и растяжимость труб или каналов для данного расстояния x . Заметим, что трубы могут быть жесткими и тогда:

$$A = A(x). \quad (4.37)$$

Поскольку во всех точках поперечного сечения один и тот же градиент p_e , то в этих точках будет одна и та же скорость u , удовлетворяющая уравнению:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p_e}{\partial x}. \quad (4.38)$$

Это уравнение представляет собой утверждение, что плотность, умноженная на ускорение, равна силе, действующей на единицу объема.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A u)}{\partial x} = 0. \quad (4.39)$$

показывает, что скорость изменения массы ρA , приходящейся на единицу длины, равна продольному градиенту массового расхода $\rho A u$, взятому со знаком минус.

Предполагая, что свойства жидкости и свойства трубы [159, 160] (или канала) считаются продольно однородными, получим:

$$\rho = \rho(p_e), \quad A = A(p_e, x). \quad (4.40)$$

В линеаризованном виде уравнения неразрывности и количества движения будут:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p_e}{\partial x}. \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = - \rho_0 A_0 \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (4.42)$$

Исключая отсюда u , получим:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_e}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p_e}{\partial x^2}, \quad (4.43)$$

где скорость волны c определяется как:

$$c^{-2} = A_0^{-1} \left(\frac{d(\rho A)}{dp_e} \right)_{p_e=0}. \quad (4.44)$$

Решением данного уравнения (4.43) будут волны, распространяющиеся в положительном направлении x [158]:

$$p_e = f(t - x/c), \quad (4.45)$$

а скорость жидкости в направлении бегущей волны будет:

$$u = \frac{1}{\rho_0 c} p_e = \frac{1}{\rho_0 c} f(t - x/c). \quad (4.46)$$

В том случае, когда в системе присутствуют сочленения (рисунки 4.11, 4.12), наряду с падающими волнами f появляются и отраженные g . Бегущая волна в трубе 1, имеющая выражение:

$$p_e = f(t - x/c_1), \quad u = \frac{1}{\rho_0 c_1} f(t - x/c_1), \quad (4.47)$$

достигнув сочленения, частично отразится обратно, а частично пройдет в трубу 2.

Общее решение для волнового уравнения в трубе 1 есть:

$$p_e = f(t - x/c_1) + g(t + x/c_1). \quad (4.48)$$

В трубе 2 возникает бегущая волна со скоростью распространения c_2 :

$$p_e = h(t - x/c_2). \quad (4.49)$$

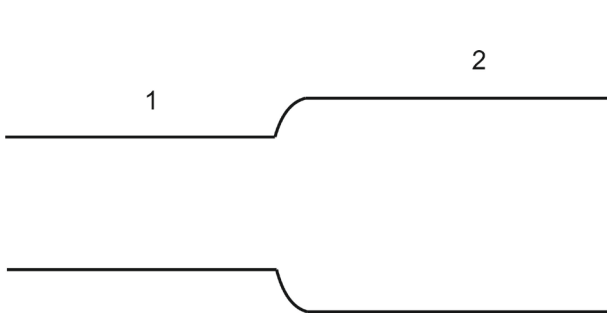


Рисунок 4.11 – Быстрое расширение:

1; 2 – нумерация труб

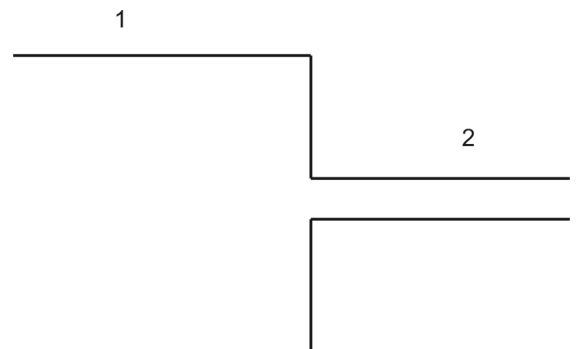


Рисунок 4.12 – Скачкообразное

сужение

В самом общем случае прохождение волны через сочленение будет зависеть от шести параметров A_1, ρ_1, c_1 и A_2, ρ_2, c_2 – площади поперечного сечения, плотности и скорости звука в трубах.

Связь между падающей $f(t)$, отраженной $g(t)$ и проходящей $h(t)$ волной может быть представлена в следующем виде [158]:

$$\frac{g(t)}{f(t)} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2}, \quad (4.50)$$

$$\frac{h(t)}{f(t)} = \frac{2Y_2}{Y_1 + Y_2}, \quad (4.51)$$

где Y называется **проводимостью** ($\text{м}^4 \cdot \text{с} / \text{кг}$) и вычисляется как:

$$Y_i = \frac{A_i}{\rho_i c_i}. \quad (4.52)$$

Из формулы (4.49) следует, что **проводимость** характеризует способность элемента пылевоздушной сети пропускать поток при заданном динамическом давлении и определяется как отношение объёмного расхода к избыточному давлению. Она является обратной величиной к **акустическому сопротивлению Z** :

$$Z = \frac{1}{Y}. \quad (4.53)$$

Из анализа формулы (4.50) можно сделать следующее заключение: если проводимости в точности согласованы, то отраженная волна отсутствует. Согласование проводимостей означает, что, хотя плотности, поперечные сечения и волновые скорости в двух каналах различны, их комбинации (4.52) равны. Согласование проводимостей является эффективным методом передачи из одной среды в другую волновой энергии без нежелательных отражений.

Скорость передачи энергии в направлении распространения есть объёмный расход, умноженный на избыточное давление. Это можно представить, как произведение проводимости на квадрат избыточного давления. В падающей волне скорость передачи энергии есть $Y_1 f^2(t - x/c_1)$, в отраженной – $Y_1 g^2(t + x/c_1)$, в проходящей – $Y_2 h^2(t - x/c_2)$.

Если канал или труба имеют последовательность сочленений ($n = 2 \dots N$), то формулы (4.50) – (4.51) примут вид:

$$\frac{g(t)}{f(t)} = \frac{Y_1 - \sum_{n=2}^N Y_n}{Y_1 + \sum_{n=2}^N Y_n}, \quad (4.54)$$

$$\frac{h(t)}{f(t)} = \frac{2Y_1}{Y_1 + \sum_{n=2}^N Y_n}. \quad (4.55)$$

Представим наш каскад аппаратов схематически как показано на рисунке 4.13.

Посчитаем отношение объемного расхода A_{5u_5} в трубе 5 к избыточному давлению p_e в начале трубы (т.н. эффективная проводимость):

$$Y_5^{eff} = Y_5 \frac{f_5(t + l_5/c_5) - g_5(t - l_5/c_5)}{f_5(t + l_5/c_5) + g_5(t - l_5/c_5)}. \quad (4.56)$$

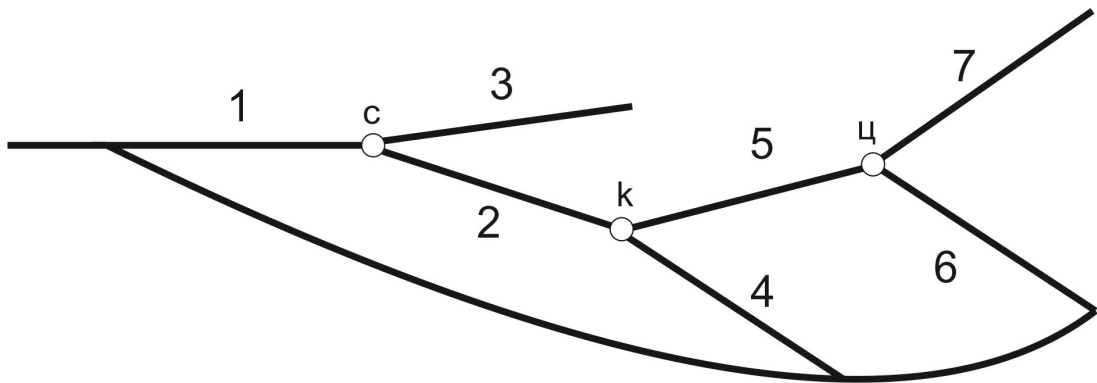


Рисунок 4.13 – Схематическое изображение разветвленной системы:
с – сепаратор; к – концентратор; ц – циклон; 1,2,3,4,5,6,7 – труба провод

Здесь l_5/c_5 – время запаздывания между приходом волн в концентратор (К) и циклон (Ц). Применим для решения уравнения (4.56) Фурье – анализ в классе комплексно–экспоненциальных волновых форм, пропорциональных $e^{i\omega t}$, где $\omega = n \cdot \frac{2\pi}{t_p}$, $n=1,2,\dots, t_p$, – период. Тогда уравнение (4.56) примет вид:

$$Y_5^{eff} = Y_5 \frac{(Y_6 + Y_7) + iY_5 t g(\omega l_5/c_5)}{Y_5 + i(Y_6 + Y_7) t g(\omega l_5/c_5)}. \quad (4.57)$$

Формула (4.57) связывает эффективную проводимость у предыдущего разветвления с проводимостью у последующего разветвления. Применяя эту формулу в обратном порядке многократно, начиная от самого удаленного

разветвления и заканчивая первым, можем охарактеризовать свойства всей системы.

Далее найдем эффективную проводимость трубы 2, используя для вычисления формулу (4.57):

$$Y_2^{eff} = Y_2 \frac{(Y_4 + Y_5^{eff}) + iY_2 \operatorname{tg}(\omega l_2 / c_2)}{Y_2 + i(Y_4 + Y_5^{eff}) \operatorname{tg}(\omega l_2 / c_2)}. \quad (4.58)$$

Эффективная проводимость трубы 1 будет:

$$Y_1^{eff} = Y_1 \frac{(Y_3 + Y_2^{eff}) + iY_1 \operatorname{tg}(\omega l_1 / c_1)}{Y_1 + i(Y_3 + Y_2^{eff}) \operatorname{tg}(\omega l_1 / c_1)}. \quad (4.59)$$

Чтобы использовать формулу (4.59) для вычислений, следует брать вещественную часть $Re(Y_1^{eff})$ от эффективной проводимости. Эта величина связана с усредненной передачей энергии и равна отношению среднего потока энергии к среднему квадрату избыточного давления.

Поскольку сами аппараты (сепаратор, концентратор, циклон) системы представляют собой определенные полости, то они характеризуются емкостями C_i ($\text{м}^5 \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$) и индуктивностями L_i ($\text{кг} / \text{м}^4$) [157], где:

$$C_i = \frac{V_i}{\rho_0 c_i^2}, \quad (4.60)$$

$$L_i \approx \frac{\rho_0 l_i}{A_i}. \quad (4.61)$$

С учетом характеристик аппаратов формулы (4.57)–(4.59) примут вид:

$$Y_5^{eff} = Y_5 \frac{(Y_6 + Y_7 + iC_{II}\omega + (iL_{II}\omega)^{-1}) + iY_5 \operatorname{tg}(\omega l_5 / c_5)}{Y_5 + i(Y_6 + Y_7 + iC_{II}\omega + (iL_{II}\omega)^{-1}) \operatorname{tg}(\omega l_5 / c_5)}, \quad (4.62)$$

$$Y_2^{eff} = Y_2 \frac{(Y_4 + Y_5^{eff} + iC_K\omega + (iL_K\omega)^{-1}) + iY_2 \operatorname{tg}(\omega l_2 / c_2)}{Y_2 + i(Y_4 + Y_5^{eff} + iC_K\omega + (iL_K\omega)^{-1}) \operatorname{tg}(\omega l_2 / c_2)}, \quad (4.63)$$

$$Y_1^{eff} = Y_1 \frac{(Y_3 + Y_2^{eff} + iC_{cen}\omega + (iL_{cen}\omega)^{-1}) + iY_1 \operatorname{tg}(\omega l_1 / c_1)}{Y_1 + i(Y_3 + Y_2^{eff} + iC_{cen}\omega + (iL_{cen}\omega)^{-1}) \operatorname{tg}(\omega l_1 / c_1)} \quad (4.64)$$

ИЛИ

$$Y_5^{eff} = Y_5 \frac{(Y_6 + Y_7 - \frac{1}{L_{II}\omega}) + i(Y_5 \operatorname{tg}(\omega l_5 / c_5) + C_{II}\omega)}{(Y_5 - C_{II}\omega) + i(Y_6 + Y_7 - \frac{1}{L_{II}\omega}) \operatorname{tg}(\omega l_5 / c_5)}, \quad (4.65)$$

$$Y_2^{eff} = Y_2 \frac{\left(Y_4 + Y_5^{eff} - \frac{1}{L_K \omega}\right) + i\left(Y_2 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l_2}{c_2}\right) + C_K \omega\right)}{\left(Y_2 - C_K \omega\right) + i\left(Y_4 + Y_5^{eff} - \frac{1}{L_K \omega}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l_2}{c_2}\right)}, \quad (4.66)$$

$$Y_1^{eff} = Y_1 \frac{\left(Y_3 + Y_2^{eff} - \frac{1}{L_{cen} \omega}\right) + i\left(Y_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l_1}{c_1}\right) + C_{cen} \omega\right)}{\left(Y_1 - C_{cen} \omega\right) + i\left(Y_3 + Y_2^{eff} - \frac{1}{L_{cen} \omega}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l_1}{c_1}\right)}. \quad (4.67)$$

Формулы (4.65)–(4.67) характеризуют отклик любой части системы на воздействие. Рекуррентные соотношения (4.65)–(4.67) позволят определить эффективную проводимость всего каскада. Сопротивление всей разветвленной системы будет:

$$Z = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_1^{eff})}. \quad (4.68)$$

Для данной системы аппаратов на основании формул (4.65)–(4.68) было рассчитано сопротивление, которое составило $\Delta p = 14492,05$ Па при следующих начальных условиях:

l_i – длина участка = 1 м, $i=1,2,3,4,5,7$; $l_4=4$; $l_6=5$ м; A_i – площадь поперечного сечения канала = 0,00785 м²; $\rho_i=1,2$ кг/м³; c_i – скорость волны = 340 м/с; V – объём аппарата, $V_{Ц} = 0,05$ м³, $V_K = 0,036$ м³, $V_{cen} = 0,07$ м³; A – площадь поперечного сечения канала, $A_{Ц} = 0,098$ м², $A_K = 0,024$ м², $A_{cen} = 0,098$ м²; ω – угловая частота возмущения = 0,63 с⁻¹.

Данный подход позволит спроектировать каскад аппаратов таким образом, чтобы по максимуму сократить потери энергии при волновой передаче.

Таким образом, применение волновой теории распространения возмущений в пылевоздушных сетях для расчёта гидравлического сопротивления комплекса является инновационным подходом. Впервые в контексте моделирования сепарационных систем 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. На основе предложенной методики рассчитано полное сопротивление

аэродинамического комплекса, составившее $\Delta p = 14492,05$ Па. Данная методика позволяет оптимизировать соединительные участки пылевоздушных каналов с целью минимизации аэродинамических потерь при разделении цемента.

4.5 План и результаты многофакторного эксперимента работы аэродинамического комплекса при разделении цемента

В качестве основного плана эксперимента нами выбирается центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП 2^4) полного факторного эксперимента (ПФЭ) [161, 162]. Основой для выбора данного плана являются его свойства, на их основе можно получить одинаковую дисперсию значений функции отклика во всех точках, равноудаленных от центра плана эксперимента. Используя ПФЭ, можно меньшим количеством опытов и с высокой точностью получить нелинейную модель разработанного нами аэродинамического комплекса.

Матрица планирования для ПФЭ ЦКРП 2^4 , на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Матрица планирования ПФЭ ЦКРП 2^4

№ опыта	Уровни факторов				Значения выходных параметров		
	X_1	X_2	X_3	X_4	Q_c , кг/ч	E , %	S_{y0} , м ² /кг
1	-1	-1	-1	-1	2275,98	53,73	415,2
2	+1	-1	-1	-1	2356,9	64,03	323,6
3	-1	+1	-1	-1	2243,08	67,73	389,8
4	+1	+1	-1	-1	2283,31	74,83	404,1
5	-1	-1	+1	-1	2245,35	58,37	507,9
6	+1	-1	+1	-1	2342,99	66,59	371,4
7	-1	+1	+1	-1	2245,57	72,37	389,1
8	+1	+1	+1	-1	2299,69	77,39	358,9
9	-1	-1	-1	+1	2287,29	56,13	340,5

№ опыта	Уровни факторов				Значения выходных параметров		
	X_1	X_2	X_3	X_4	Q_c , кг/ч	E , %	$S_{уд}$, м ² /кг
10	+1	-1	-1	+1	2345,52	66,43	320,3
11	-1	+1	-1	+1	2231,7	70,13	416,8
12	+1	+1	-1	+1	2249,23	77,23	502,5
13	-1	-1	+1	+1	2282,18	60,77	384,5
14	+1	-1	+1	+1	2354,3	68,99	319,8
15	-1	+1	+1	+1	2256,88	74,77	367,7
16	+1	+1	+1	+1	2288,31	79,79	408,8
17	-A	0	0	0	2211,5	52,54	441
18	+A	0	0	0	2323,85	67,84	390,5
19	0	-A	0	0	2358,88	58,92	373,4
20	0	+A	0	0	2259,99	83,72	437,1
21	0	0	-A	0	2267,6	63	369,4
22	0	0	+A	0	2278,87	70,2	368,2
23	0	0	0	-A	2297,47	71,8	377,7
24	0	0	0	+A	2297,4	76,8	353
25	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
26	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
27	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
28	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
29	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
30	0	0	0	0	2299,11	77,8	377
31	0	0	0	0	2299,11	77,8	377

Факторы, подвергающиеся исследованию, и уровни их варьирования представлены в таблице 4.2. в качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов при выделении крупного продукта в аэродинамическом комплексе были приняты (табл. 2): частота вращения ротора сепаратора n_p об/мин; угол

наклона лопастей концентратора $\alpha_{л}$ °; ширина камеры рабочей зоны концентратора a м; расход сепарационного воздуха Q м³/ч.

Необходимое количество повторных опытов при классификации составляет не менее трех. После обработки результатов экспериментов по ЦКРП – 2^н были получены уравнения регрессии в кодированной форме для: производительности воздушного центробежного сепаратора – Q_c , кг/ч, эффективности классификации – E , % и удельной поверхности продукта – $S_{уд}$, м²/кг.

$$Q_c = 2298 + 28,2x_1 - 24,6x_2 + 2,7x_3 - 10,3x_1x_2 + 3,6x_1x_3 - 5,8x_1x_4 + 7,5x_2x_3 - 5,8x_2x_4 + 5,8x_3x_4 - 7,92x_1^2 + 2,52x_2^2 - 6,53x_3^2 + 0,48x_4^2. \quad (4.69)$$

На основании уравнения (4.69) установлена зависимость (рисунок 4.14) влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на эффективность производительности воздушного центробежного сепаратора (Q_c) при различных значениях объёмов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_{л} = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36$ м, что соответствует центральному уровню плана эксперимента (кодированные значения $x_3 = 0$, $x_4 = 0$).

Таблица 4.2 – 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, n_p	x_2	200	400	600	800	1000	1200
Наклон лопастей, град $\alpha_{л}$, °	x_3	5	30	35	40	45	50

Ширина камеры рабочей зоны, a , м	x_4	0,02	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4
-------------------------------------	-------	------	------	------	------	------	-----

Анализ полученных данных показывает, что во всём исследуемом диапазоне $n_p = 400\text{--}1200$ об/мин наблюдается монотонное снижение эффективности сепаратора Q_c с ростом частоты вращения ротора при любом фиксированном значении расхода воздуха. Наибольшие значения Q_c достигаются при минимальной частоте вращения $n_p = 400$ об/мин, что может быть обусловлено оптимальным соотношением между временем пребывания частиц в рабочей зоне и интенсивностью центробежного поля. При увеличении n_p до 1200 об/мин эффективность снижается на 7–8 % в зависимости от расхода.

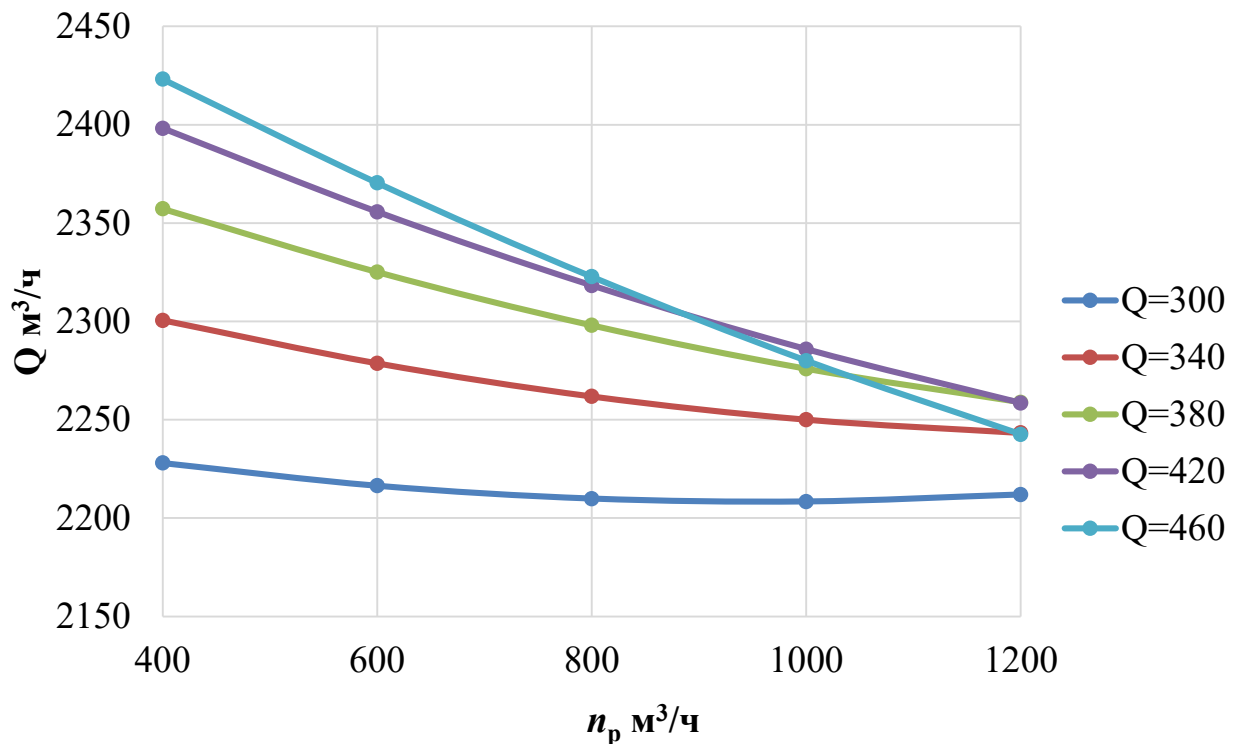


Рисунок 4.14 – Зависимость влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на эффективность производительности воздушного центробежного сепаратора (Q_c) при различных значениях объемов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_{л} = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36$ м

Одновременно установлено, что увеличение расхода сепарационного воздуха от 300 до 460 м³/ч приводит к систематическому росту эффективности сепаратора Q_c при фиксированной частоте вращения. Так, при $n_p = 400$ об/мин значение Q_c возрастает с 2228,0 до 2423,2 условных единиц, что составляет прирост более чем на 8,7 %. Это свидетельствует о положительном влиянии объёмного расхода воздуха на аэродинамическое воздействие на разделяемые частицы и, как следствие, на степень их селективного выноса из рабочей зоны.

Кривые на графике не пересекаются и располагаются в порядке возрастания Q , что подтверждает устойчивость взаимного влияния факторов. Отсутствие экстремумов в пределах диапазона эксперимента указывает на то, что оптимальные режимы работы сепаратора лежат на границе области варьирования – при минимальных значениях n_p и максимальных значениях Q .

Таким образом, с точки зрения повышения эффективности сепарации, наиболее предпочтительным режимом является сочетание $Q = 460$ м³/ч и $n_p = 400$ об/мин.

$$E = 77,8 + 3,83x_1 + 6,2x_2 + 1,8x_3 + 1,2x_4 - 0,8x_1x_2 - 0,52x_1x_3 - 4,4x_1^2 - 1,62x_2^2 - 2,8x_3^2 - 0,9x_4^2. \quad (4.70)$$

На основании уравнения (4.70) установлена зависимость (рисунок 4.15) влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на эффективность классификации E при различных значениях объёмов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_n = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36$ м, что соответствует центральному уровню плана эксперимента (кодированные значения $x_3 = 0$, $x_4 = 0$).

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что эффективность разделения существенно зависит как от частоты вращения ротора, так и от расхода сепарационного воздуха. Во всём исследуемом диапазоне $n_p = 400$ –1200 об/мин наблюдается монотонное возрастание E с ростом n_p для всех значений Q . При этом темп прироста эффективности снижается при высоких оборотах ($n_p > 1000$ об/мин), что указывает на насыщение процесса и приближение к пределу теоретически

достижимой эффективности.

Максимальное значение эффективности классификации $E_{max} = 83,72 \%$ достигается при $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p = 1200 \text{ об/мин}$. При дальнейшем увеличении расхода воздуха до 420 и 460 $\text{м}^3/\text{ч}$ при тех же оборотах наблюдается снижение эффективности до 81,55 % и 70,58 % соответственно. Аналогичная тенденция отмечается и при $n_p = 800$ и 1000 об/мин. Это позволяет сделать вывод о существовании оптимального значения расхода сепарационного воздуха, при котором достигается наилучшее соотношение между аэродинамическим воздействием на частицы и стабильностью потока в рабочей зоне сепаратора. В рамках проведённого эксперимента таким оптимальным значением является $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$.

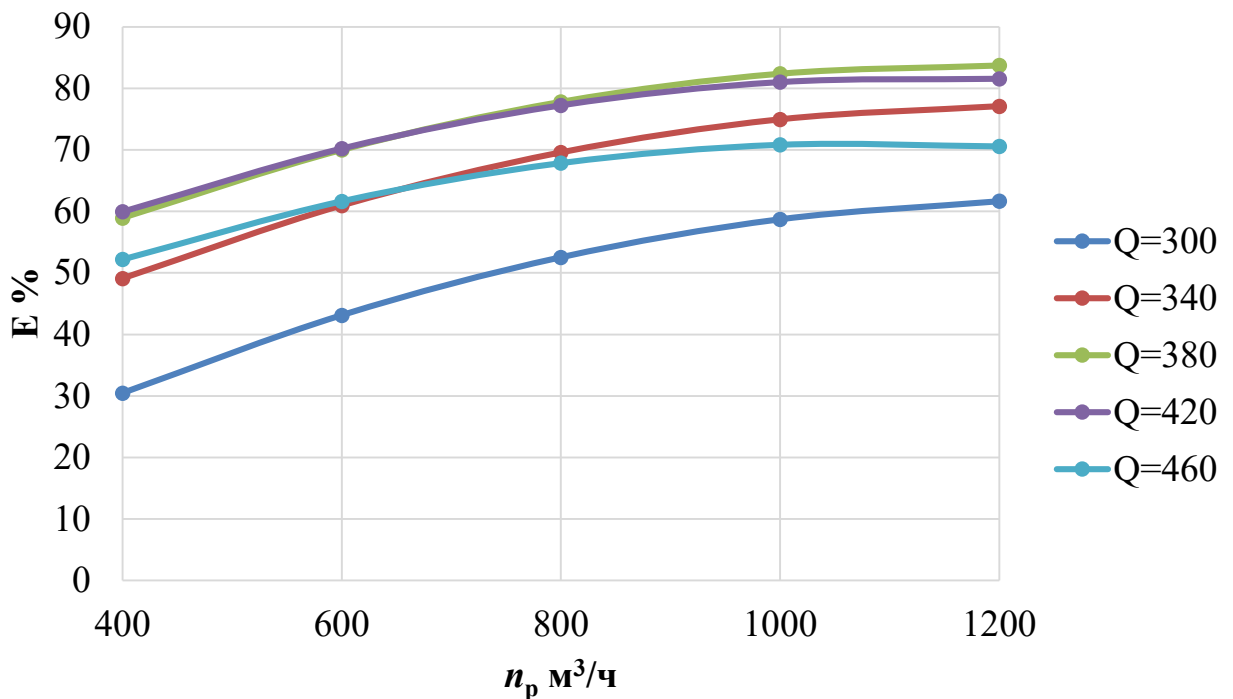


Рисунок 4.15 – Зависимость влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на эффективность классификации E при различных значениях объёмов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_{л} = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36 \text{ м}$

При низких частотах вращения сепаратора $n_p = 400 \text{ об/мин}$ эффективность

классификации минимальна для всех значений Q , однако даже в этом режиме наблюдается положительная зависимость $E(Q)$: при увеличении расхода от 300 до 460 м³/ч эффективность возрастает с 30,46 % до 52,18 %. Это подтверждает, что объёмный расход воздуха оказывает значимое влияние на транспортировку и классификацию материала, особенно в условиях слабого центробежного поля.

Таким образом, наиболее эффективный режим работы сепаратора с точки зрения качества разделения достигается при сочетании расхода сепарационного воздуха $Q = 380$ м³/ч и частоты вращения ротора сепаратора $n_p = 1200$ об/мин.

$$S_{y\partial} = 377 - 126,33x_1 + 159x_2 - 2,88x_3 + 61,8x_4 - 111,54x_1x_3 + 264,9x_1x_2 + 178,68x_1x_4 - 232,8x_2x_3 + 254,27x_2x_4 - 121,2x_3x_4 + 97,02x_1^2 + 70,68x_2^2 - 20,5x_3^2 - 29,2x_4^2 \quad (4.71)$$

На основании уравнения (4.71) установлена зависимость (рисунок 4.16) влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на качества конечного продукта ($S_{y\partial}$) при различных значениях объёмов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_{л} = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36$ м, что соответствует центральному уровню плана эксперимента (кодированные значения $x_3 = 0$, $x_4 = 0$).

Анализ полученных результатов показывает, что характер зависимости $S_{y\partial}(n_p)$ существенно изменяется в зависимости от расхода воздуха. При низких значениях Q (300–340 м³/ч) наблюдается монотонное снижение удельной поверхности с ростом частоты вращения: при $Q = 300$ м³/ч значение $S_{y\partial}$ уменьшается с 544,5 до 395,2 м²/кг при увеличении n_p от 400 до 1200 об/мин. Это может свидетельствовать о том, что при недостаточном объёме воздуха высокая скорость вращения способствует выносу более крупных фракций, обладающих меньшей удельной поверхностью, в то время как мелкие частицы, имеющие высокое значение $S_{y\partial}$, остаются в камере или не успевают эффективно классифицироваться. В то же время при высоких значениях расхода 420–460 м³/ч зависимость имеет противоположный характер – удельная поверхность резко

возрастает с увеличением оборотов. Так, при $Q = 460 \text{ м}^3/\text{ч}$ значение S_{y0} увеличивается более чем вдвое – с 281, до 556,5 $\text{м}^2/\text{кг}$. Это указывает на то, что при достаточном объёме воздуха и высокой скорости вращения обеспечивается эффективное выделение тонкодисперсных фракций, которые характеризуются максимальной удельной поверхностью.

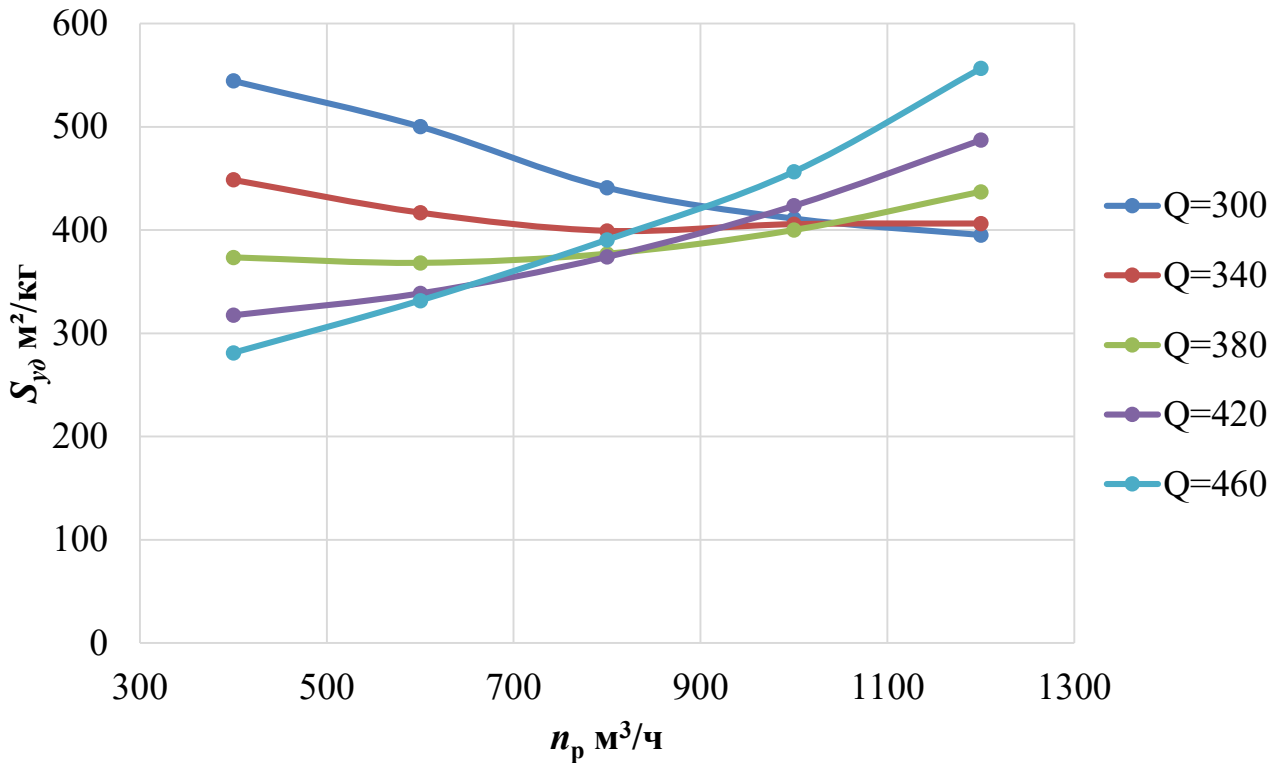


Рисунок 4.16 – Зависимость влияния частоты вращения ротора сепаратора (n_p) на качества конечного продукта (S_{y0}) при различных значениях объёмов расхода сепарационного воздуха (Q), постоянном угле наклона лопаток концентратора ($\alpha_{л} = 40^\circ$) и ширине камеры рабочей зоны концентратора $a = 0,36 \text{ м}$

При среднем расходе воздуха $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ функция $S_{y0}(n_p)$ имеет выраженный минимум при $n_p = 600$ об/мин, после чего удельная поверхность последовательно возрастает, достигая максимума при 1200 об/мин. Это может быть связано с оптимальным соотношением между инерционными силами и аэродинамическим потоком, обеспечивающим селективное выделение мелкой фракции без её переизмельчения.

Максимальное значение $S_{y,d} = 556,5 \text{ м}^2/\text{кг}$ достигается в режиме совместного максимума факторов: $Q = 460 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p = 1200 \text{ об/мин}$. Однако следует учитывать, что данный режим не обеспечивает наивысшего качества классификации по крупности: согласно эффективности классификации (E) в этих условиях лишь 70,58 %, тогда как её максимум (83,72 %) достигается при $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, при выборе рабочего режима необходимо учитывать компромисс между получением материала с высокой удельной поверхностью и качеством классификации. Для технологий, где важна максимальная дисперсность конечного продукта – в частности, в производстве высококачественных марок цемента, – целесообразно использовать режим с максимальными значениями расхода сепарационного воздуха $Q = 460 \text{ м}^3/\text{ч}$ и частоты вращения ротора сепаратора $n_p = 1200 \text{ об/мин}$. В этих условиях достигается наибольшая удельная поверхность цемента $S_{y,d} = 556,5 \text{ м}^2/\text{кг}$, что напрямую влияет на скорость гидратации и конечную прочность цементного камня. В то же время, когда при производстве цемента критически важна чёткость фракционного состава – например, для обеспечения стабильных реологических свойств и минимизации содержания крупных частиц – предпочтение следует отдавать режиму с $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p = 1200 \text{ об/мин}$, который обеспечивает высокое качество классификации $E = 83,72 \%$ при одновременно достаточной удельной поверхности $S_{y,d} = 437 \text{ м}^2/\text{кг}$, соответствующей требованиям к цементам общего назначения.

Таким образом, проведённые исследования, объединяющие теоретическое матричное моделирование (глава 4.3) и многофакторный физический эксперимент (глава 4.5), демонстрируют высокую степень согласованности и образуют замкнутый научно-инженерный цикл «прогноз – верификация – оптимизация».

Результаты главы 4.3 представляют фундаментальную теоретическую основу, а разработанный аппарат матриц фракционных пропусков для сепаратора, концентратора и циклона позволил формализовать процесс преобразования гранулометрического состава цемента на каждом этапе. Ключевым достижением модели стало количественное обоснование взаимодействия от введения концентратора в аэродинамический комплекс. Модель предсказала, что каскадная

схема «сепаратор + концентратор + циклон» способна повысить эффективность улавливания целевых фракций (например, для частиц 80 мкм) с теоретических ~73% до ~99%, а также существенно снизить долю крупных фракций в конечном продукте.

Данные, полученные в ходе строго спланированного эксперимента по ЦКРП 2⁴, выступили в роли объективного эмпирического подтверждения. Эксперимент не только подтвердил качественные прогнозы теории, но и дал точные количественные зависимости. Максимально достигнутая интегральная эффективность классификации $E = 83,72\%$ и удельная поверхность продукта $S_{уд} = 556,5 \text{ м}^2/\text{кг}$ на практике доказали возможность глубокой классификации. Полученные уравнения регрессии (4.70, 4.71) математически описали влияние факторов, напрямую соответствующих параметрам матричных моделей: рост эффективности на 6,2% при увеличении частоты вращения на 200 об/мин полностью соответствует теоретической предпосылке о ведущей роли центробежного поля.

Наиболее важным итогом является подтверждение сходимости результатов. Экспериментальная величина 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.

Таким образом, проведенный по ротатбельному плану ЦКРП 2⁴ многофакторный эксперимент позволил установить количественное влияние ключевых технологических параметров на производительность, эффективность классификации и качество продукта. Полученные уравнения регрессии и анализ поверхностей отклика выявили как общие тенденции (рост эффективности с увеличением частоты вращения ротора), так и наличие оптимальных зон (например, для расхода воздуха). Это даёт чёткое основание для выбора режимов работы в зависимости от целевых свойств готового цемента.

4.6 Выводы

1. Для сопоставления теоретических и экспериментальных результатов сконструирована лабораторная установка аэродинамического комплекса, включающая центробежный сепаратор, концентратор, осадительные циклоны, зернистый фильтр, центробежный вентилятор и рециркуляционный газоход. Установка обеспечивает многоступенчатое разделение цемента с возможностью регулирования ключевых режимных параметров (частоты вращения роторов сепаратора и вентилятора) с помощью частотного преобразователя. В состав комплекса был добавлен концентратор для снижения негативного влияния ортокинетической коагуляции – явления, при котором мелкие частицы увлекаются крупными и попадают в крупку, снижая качество классификации. Реализованная схема позволяет направлять готовый тонкодисперсный продукт в циклоны, в то время как более грубые фракции возвращаются в сепаратор. Такой подход повышает эффективность классификации и улучшает фракционный состав конечного продукта. Теоретически обоснован и экспериментально подтверждён принцип работы лабораторной установки аэродинамического комплекса с рециркуляцией, являющийся адекватным инструментом для моделирования и оптимизации процессов классификации тонкодисперсных материалов, в частности цемента.

2. Для описания трансформации гранулометрического состава материала при прохождении через элементы комплекса адаптирован матричный подход. Для каждого аппарата (сепаратор, концентратор, циклон) построены матрицы фракционных пропусков на основе экспериментальных и теоретических 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.

3. Предложен расчёт гидравлического сопротивления аэродинамического комплекса на основе теории распространения волн в пылевоздушных сетях. Введены понятия проводимости и акустического сопротивления для отдельных элементов аэродинамического комплекса, что позволило учесть динамику потоков и локальные возмущения. Расчётное значение сопротивления аэродинамического комплекса составило $\Delta p = 14492,05$ Па при заданных геометрических и режимных параметрах. Полученная модель может быть использована при проектировании энергоэффективных аэродинамических комплексов с минимизацией потерь давления, что приведет к уменьшению энергозатрат и увеличению производительности цемента или тонкодисперсных материалов.

4. Разработан и проведён центральный композиционный ротатабельный план эксперимента (ЦКРП 2⁴) для оценки влияния четырёх факторов: расхода сепарационного воздуха вентилятора, частоты вращения ротора сепаратора, угла наклона лопастей концентратора и ширины рабочей зоны концентратора – на три выходных параметра: производительность сепаратора, эффективность классификации и удельную поверхность продукта. Максимальная эффективность классификации $E = 83,72$ % при одновременно достаточной удельной поверхности $S_{y\partial} = 437$ м²/кг (соответствующей требованиям к быстротвердеющим цементам) достигается при расходе воздуха $Q = 380$ м³/ч и частоте вращения $n_p = 1200$ об/мин. Наименьшая удельная поверхность продукта – 280–399 м²/кг наблюдается при $Q = 460$ м³/ч и $n = 400$ –800 об/мин, но при этом снижается эффективность $E = 52$ –68 %. Таким образом, полученные результаты демонстрируют чёткую взаимосвязь между удельной поверхностью продукта и эффективностью классификации, что определяет выбор режима работы аэродинамического комплекса в зависимости от целей производства. Результаты эксперимента подтверждают высокую чувствительность процесса классификации к комбинации технологических параметров и позволяют проводить оптимизацию (настройку) режимов работы агрегатов в составе аэродинамического комплекса для классификации цемента при получении продукта различных марок.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТА В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В условиях снижения внутреннего спроса на цемент в РФ (на 9 % в 2025 г. до 60,6 млн т) и прогнозируемого дальнейшего падения на 8–9 % в 2026 г. [15], ключевым фактором конкурентоспособности цементных предприятий становится повышение энергоэффективности и качества продукции при минимальных капитальных затратах. Предложенный в работе аэродинамический комплекс «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией представляет собой технологическое решение, позволяющее достичь указанных целей без полной замены существующего оборудования. Настоящая глава посвящена технико-экономической оценке эффективности внедрения разработанного комплекса в технологическую линию производства цемента.

5.1 Модернизация технологической линии по производству цемента

Современная технологическая линия цементного завода, работающая по замкнутому циклу помола, включает шаровую мельницу, динамический сепаратор второго-третьего поколения и систему аспирации с циклонами. Анализ промышленных данных (см. главу 3.3) показал, что в существующих схемах 56–75 % материала размером до 80 мкм в составе крупки направляется на повторный помол, хотя данные фракции соответствуют требованиям к готовому продукту. Это обусловлено проявлением ортокинетического эффекта, при котором мелкие частицы увлекаются крупными в зону возврата.

Предлагаемая схема модернизации линии рисунок 5.1 предусматривает установку инерционного концентратора (см. рисунок 2.8) между выходным патрубком сепаратора и входом в циклон.

Преимуществом предложенного решения является его совместимость с оборудованием любых производителей, у которых отдельно расположен циклон и вынесен вентилятор подачи воздуха в динамический сепаратор.

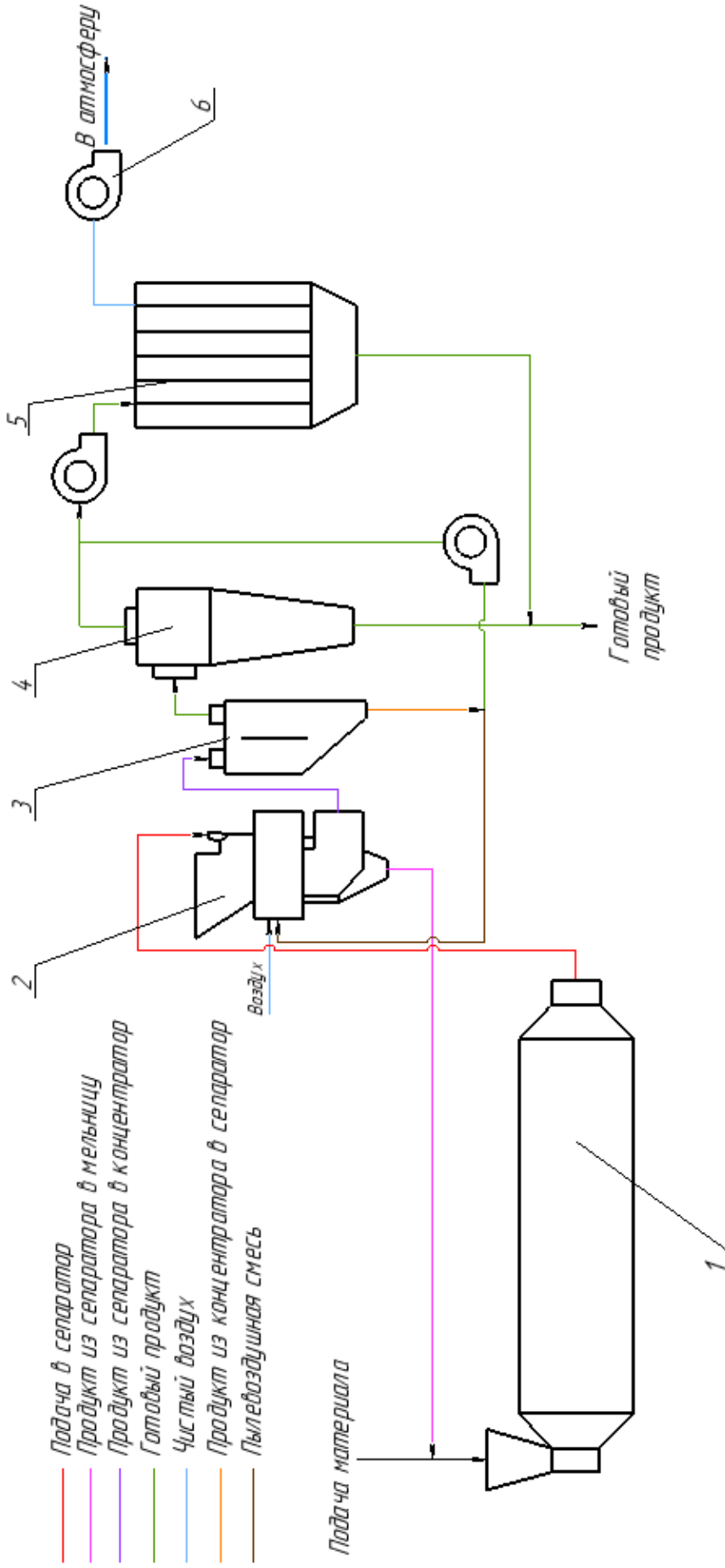


Рисунок 5.1 — Схема модернизированной технологической линии цементного производства с внедрением аэродинамического комплекса:

1 — шаровая мельница; 2 — динамический сепаратор; 3 — концентратор; 4 — циклон; 5 — фильтр; 6 — вентилятор

Расчеты гидравлического сопротивления (см. глава 4.4) показали, что дополнительное аэродинамическое сопротивление комплекса составляет $\Delta p = 14492$ Па, что может компенсироваться существующими вентиляторами без их замены при условии оптимизации режимов работы.

Модернизация позволяет перейти от одноступенчатой классификации к двухступенчатой:

- первая ступень (сепаратор): грубое разделение с выделением крупки >80 мкм для возврата в мельницу;
- вторая ступень (концентратор): тонкая классификация промежуточного продукта с выделением готового продукта $0-45$ мкм и возвратом промежуточного продукта размером >45 мкм в сепаратор.

Конструктивное решение концентратора обеспечивает разделение агломератов частиц следующим образом. Пылевоздушная смесь поступает в корпус инерционного концентратора по патрубку подвода и затем поступает в зону установки системы жалюзийных элементов. Воздушный поток с частицами сталкивается с жалюзийными элементами и происходит отделение крупного продукта или разбивание агломератов, за счет разряжения, создаваемого внешним вентилятором, воздушный поток поворачивает на 180° и выносит частицы < 40 мкм в патрубок вывода из концентратора.

Такая организация процесса позволит снизить циркуляционную нагрузку на мельницу на $20-30$ %, что приведет к уменьшению энергопотребления на процесс помола и минимизирует переизмельчение готового продукта.

5.2 Оценка эффективности классификации цемента в аэродинамическом комплексе

Предложенная схема аэродинамического комплекса, состоящего из «сепаратор + концентратор + циклон», теоретическое обоснование принципов его работы, математическое описание процессов классификации, протекающих в нем, а также лабораторные испытания показали эффективность комплекса при

разделении цемента за счет снижения энергозатрат на стадии помола.

Важным преимуществом разработанной схемы является использование концентратора, который не потребляет электроэнергию. Конструкция концентратора не содержит движущихся частей и не требует дополнительного привода, следовательно, его внедрение не увеличивает потребление электроэнергии технологической линией. При этом концентратор выполняет функцию тонкой доочистки потока материала от грубых фракций и возвращает их в сепаратор.

После проведения экспериментов в аэродинамическом комплексе для того, чтобы подтвердить увеличение выхода готовой продукции из готового материала были проведены эксперименты на конструкции «Сепаратор + циклон» представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ эффективности выхода продукта по фракциям при работе «сепаратор + циклон» и «сепаратор + концентратор + циклон»

Аппарат	Размер фракции, мкм	Материал, подаваемый в сепаратор, %	Готовый продукт, %	Крупка, %
СЦ*	0–30	51,63	79,0	18,67
	0–80	86,14	99,92	66,23
АК*	0–30	51,63	87,5	6,27
	0–80	86,14	99,98	20,68
Разница значений	0–30	0	8,5	12,4
	0–80	0	0,06	45
Математический расчет	0–30	44,23	97,6	14,06
	0–80	83,74	99,9	24,32

СЦ* – Сепаратор+циклон

АК* – Аэродинамической комплекс

На основании сравнительного анализа данных, представленных в таблице, можно сделать следующие выводы, что математическая модель адекватно описывает процесс разделения и может использоваться для прогнозирования гранулометрического состава без проведения натуральных испытаний. Незначительные расхождения (5–10%) между расчетом и экспериментом объясняются разным гранулометрическим составом материала для эксперимента и математических расчетов.

Свойства цемента при прохождении через АК не меняется, поскольку при прочих равных условиях, т.е. одинаковом составе клинкера, одинаковом продукте после по дисперсности после помола, процесс классификации не влияет на изменение химического, минерального. Гранулометрический состав согласно ГОСТ 310.2-76 на заводах контролируется по остатку на сите и с помощью лазерного анализатора, не взирая на то, каким образом происходит классификация цемента, итоговый гранулометрический состав готового продукта является идентичным.

Для подтверждения данного утверждения, был использован цемент ЦЕМ II/V-Ш 42,5Н, полученный с завода, и цемент полученный после мельницы с того же завода той же партии (до прохождения процесса разделения), и прошедший через аэродинамический комплекс. Измеряемыми параметрами являлись остаток на сите 80 мкм, удельная поверхность, гранулометрический состав, определенный с использованием лазерного анализатора размеров частиц, и активность цемента.

Анализ гранулометрического состава материала на ключевых этапах процесса (рисунок 5.2), т.е. исходного материала, подаваемого в сепаратор; готового продукта после заводской классификации (Контрольная проба); и готового продукта после прохождения через АК показал, что при классификации с помощью АК гранулометрический состав готового продукта идентичен составу, полученному в заводских условиях.

На рисунке 5.3 представлен гранулометрический состав материала в крупке который приводится в % от массы исходного продукта, подаваемого в сепаратор

на классификацию, т.е. материала, который не стал готовым продуктом, а был возвращён на домол.

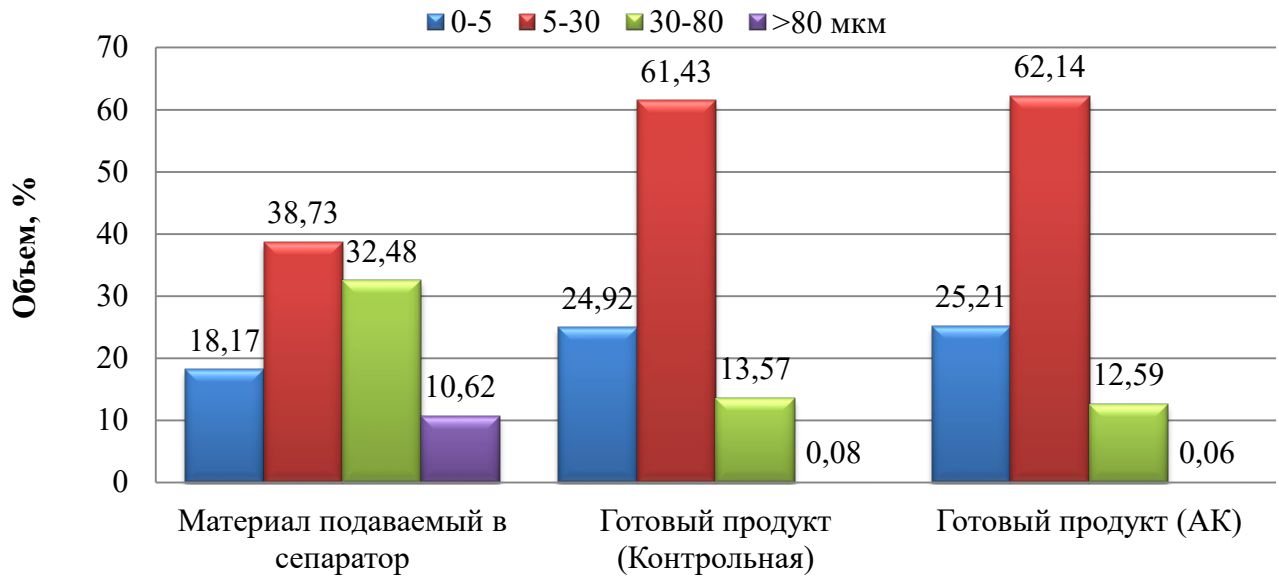


Рисунок 5.2 – Гранулометрический состав материала, подаваемого в сепаратор, и готового продукта (представлен в 100 % от массы соответствующей пробы)

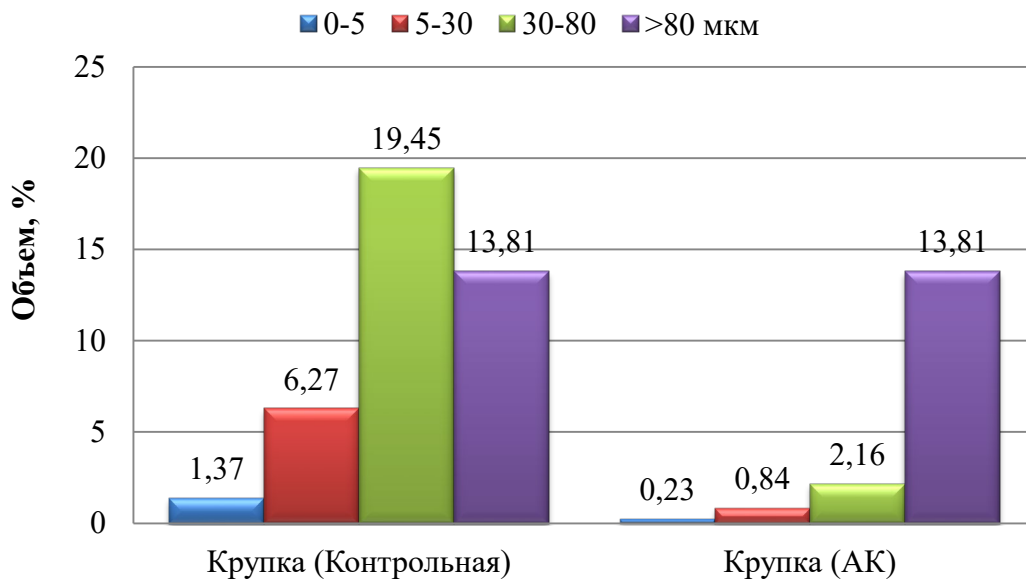


Рисунок 5.3 – Гранулометрический состав материала в крупке (приведено в % от массы исходного продукта, подаваемого в сепаратор)

Важно отметить: в контрольной пробе крупка содержит значительное количество мелких частиц (порядка 27 % фракции менее 80 мкм), которые уже являются готовым продуктом, но за счет ортокинетического эффекта вернулись на

повторный помол. В случае с АК эта доля резко падает – до порядка 3 %. То есть АК позволяет более эффективно отделить готовый продукт, уменьшая нагрузку на мельницу и экономя энергию.

Результаты оценки физико-механических свойств цемента показали, как и предполагалось, отсутствие изменений в значениях анализируемых параметров по размеру частиц (таблица 5.2, рисунок 5.4), а также активности вяжущего.

Таблица 5.2 – Сравнительный анализ проб цемента, полученных в результате заводской классификации и классификации, выполненной с помощью разработанного аэродинамического комплекса (АК)

Вид пробы	Остаток на сите 80 мкм, %	$S_{уд}$, м ² /кг	Прочность при сжатии 28 суток, МПа
Контрольная	0,7	424,5	50,2
АК	0,6	425,1	50,4

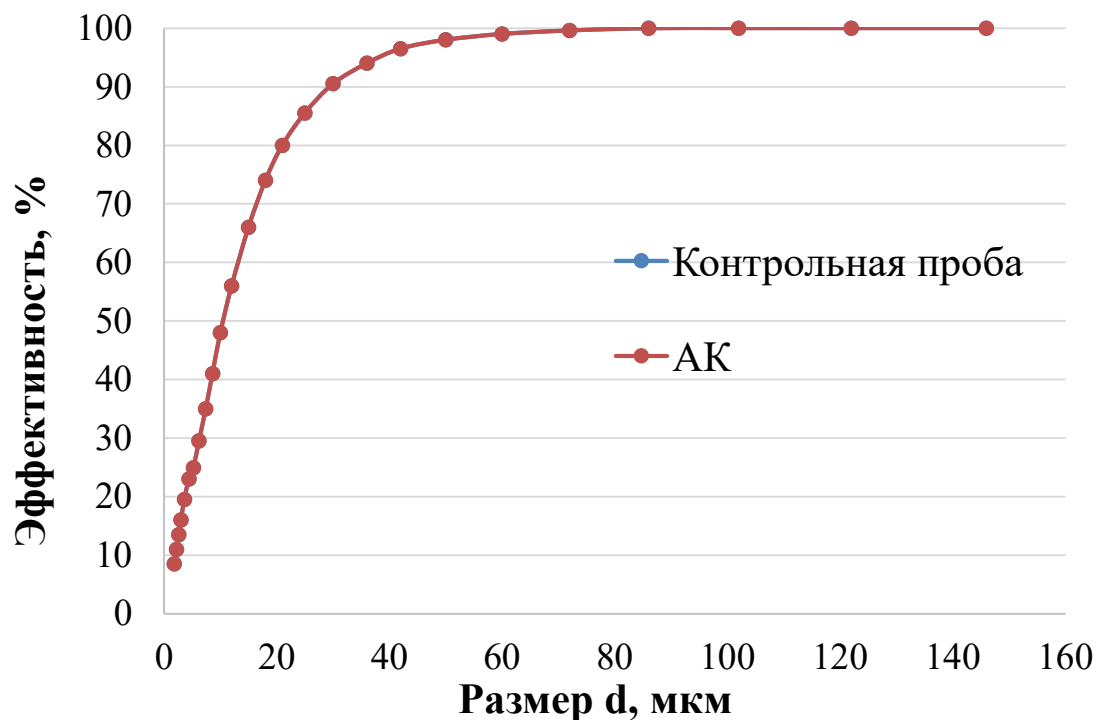


Рисунок 5.4 – Результаты гранулометрического анализа проб цемента на лазерном анализаторе

Таким образом, данные, представленные в таблице 5.1 и на рисунке 5.3, подтверждают, что внедрение аэродинамического комплекса позволяет повысить эффективность процесса разделения, т.е. количества выхода готового продукта, с сохранением его качества, что подтверждает *рабочую гипотезу* предложенного технического решения.

Данные количественно подтверждают преимущество разработанного аэродинамического комплекса: снижение доли готового продукта в возвратном потоке на 47 % в зависимости от контролируемого диапазона дисперсности. Практическое значение данного результата заключается в возможности снижения циркуляционной нагрузки на мельницу на 20–30%, что обеспечивает:

- *Снижение энергопотребления.* Уменьшение массы материала, проходящего через мельницу, сокращает удельный расход электроэнергии на помол;

- *Снижение затрат на техническое обслуживание (ТО) и ремонт.* Уменьшение циркуляционной нагрузки и, как следствие, сокращение времени работы оборудования снижает интенсивность абразивного износа его рабочих органов (мельющих тел, бронефутеровки, трубопроводов, затворов). Это позволяет увеличить межремонтные периоды и сократить ежегодные затраты на обслуживание.

Таким образом, внедрение аэродинамического комплекса обеспечивает комплексный ресурсосберегающий эффект за счёт взаимодействия технологических и эксплуатационных факторов, что соответствует актуальным направлениям стратегии развития промышленности и энергосбережения.

5.3 Экономическое обоснование эффективности технологических процессов, протекающих в разработанном аэродинамическом комплексе

Экономический эффект от внедрения разработанного аэродинамического комплекса формируется за счёт трёх основных составляющих:

1. Экономия электроэнергии на помол за счёт исключения переизмельчения

готового продукта.

2. Снижение удельных эксплуатационных затрат на мелющие тела.

3. Увеличение производительности помольной установки без роста потребляемой мощности.

Согласно данным главы 3.3, снижение кратности циркуляции до 2-3 раз позволяет уменьшить удельное энергопотребление на помол на 5–7 кВт·ч/т. Принимая среднее значение в 5,5 кВт·ч/т, годовая экономия электроэнергии составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 1000000 \text{ т} \cdot 5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т} = 5500000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (5.1)$$

Годовая экономия денежных средств, согласно тарифам на 1 январь 2026 г. [163] стоимость 1 кВт·ч составляет 6,7 руб:

$$\mathcal{E}_{\text{ден}} = 5500000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 6,7 \text{ руб.}/\text{кВт}\cdot\text{ч} = 36850000 \text{ руб}. \quad (5.1)$$

Также уменьшение циркуляционной нагрузки приводит к снижению износа на 25 % мелющих тел и футеровки мельницы. Расчётный ресурс мелющих тел увеличивается на 18 %, что позволяет сократить затраты на их замену:

- Годовые затраты на мелющие тела до модернизации: 8,4 млн руб. на январе 2026 г.;
- После модернизации: 6,9 млн руб. на январе 2026 г.;
- Экономия: 1,5 млн руб./год.

Суммарный годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = \mathcal{E}_{\text{ден}} + \mathcal{E}_{\text{рем}} = 36,85 + 1,5 = 38,35 \text{ млн. руб.}/\text{год}. \quad (5.1)$$

Единовременные капитальные затраты (стоимость концентратора и монтаж):

$$K = 8,2 \text{ млн руб}. \quad (5.1)$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{сум}}} = \frac{8,2}{38,35} = 0,21 \text{ года} \approx 2,5 \text{ месяц}. \quad (5.1)$$

Таким образом, внедрение аэродинамического комплекса обеспечивает не только экономический, но и экологический эффект: снижение энергопотребления на 5,5 кВт·ч/т при производстве 1 млн. т. цемента позволяет уменьшить выбросы CO₂ при сжигании топлива на электростанциях [164].

5.4 Апробация результатов диссертационного исследований

На способ разделения тонкодисперсных порошков с помощью аэродинамического комплекса системы «сепаратор + концентратор + циклон» получен патент Российской Федерации [120]. Также автор диссертации является соавтором патента, полученного на концентратор [121]. Однако конструктивное решение концентратора не является предметом исследования данного диссертационной работы.

Лабораторные испытания аэродинамического комплекса проходили на базе «Опытно-промышленного цеха» ИНО и ОПЦ НКМ БГТУ им. В.Г. Шухова при участии представителей Испытательного центра «БГТУ-сервис» (Приложение Б).

Для апробации и внедрения результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-093-2025 «Сепарация цемента с применением аэродинамического комплекса. Технологический процесс» (приложение В).

На основании проведенных испытаний подписаны протоколы о намерениях по внедрению разработанного технологического решения при условии необходимого финансирования с ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»» (г. Сланец) (приложение Г).

Актуальность, научная состоятельность и фундаментальность работы подтверждается ее выполнением при финансовой поддержке в рамках следующих финансируемых фундаментальных НИР.

1. Государственного задания Минобрнауки России проект № FZWN-2023-0006 «Научно-технологические основы создания самоочищающихся структурно-сопряженных покрытий методами объемного и поверхностного модифицирования композиционных материалов» 2023–2025 гг.

2. Государственного задания Минобрнауки России проект № FZWN-2026-0006 «Научно-технологические принципы создания защитных покрытий различного функционального назначения для строительных композиционных материалов» 2026–2028 гг.

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы,

используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 – «Строительство» образовательная программа «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование» образовательная программа «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов» образовательная программа «Материаловедение и технологии конструкционных и специальных материалов», 18.03.01 – «Химическая технология» образовательная программа «Химическая технология вяжущих и композиционных материалов»; магистров направления 08.04.01 – «Строительство» образовательная программа «Производство строительных материалов, изделий и конструкций: наносистемы в строительном материаловедении», 22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов» образовательная программа «Материаловедение и технологии композиционных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» образовательная программа «Разработка технологического оборудования и комплексов предприятий строительной индустрии». (приложение Д).

5.5 Выводы

1. Разработана схема модернизации технологической линии цементного производства, предусматривающая внедрение аэродинамического комплекса «сепаратор + концентратор + циклон» с замкнутой рециркуляцией. Модернизация не требует полной замены оборудования, совместима с существующими системами и может быть реализована в короткие сроки.

2. Экспериментальная оценка эффективности классификации подтвердила преимущества предложенного комплекса. Максимальная достигнутая эффективность классификации составила **83,72 %**. Анализ промышленных данных шести заводов-партнёров выявил, что в традиционных схемах доля готового продукта (фракция ≤ 80 мкм) в составе крупки составляет 56–75 %. После внедрения аэродинамического комплекса данная доля снижается до 18–25 %, что

соответствует снижению негативного влияния ортокинетического эффекта на 45–60 %.

3. Матричное моделирование процесса классификации подтвердило синергетический эффект каскадного включения аппаратов: суммарная эффективность улавливания частиц размером >80 мкм в комплексе достигает ~99 % против ~73 % для одиночного сепаратора. Оптимальная кратность рециркуляции составляет 2–3, при этом дальнейшее увеличение не даёт существенного улучшения гранулометрического состава.

4. Технико-экономический анализ подтвердил высокую эффективность предложенного решения. Снижение циркуляционной нагрузки на мельницу на 20–30 % за счёт исключения переизмельчения готового продукта позволяет сократить удельное энергопотребление на помол на 5–7 кВт·ч/т. Капитальные затраты на внедрение комплекса составляют 8,2 млн руб. Срок окупаемости проекта не превышает 2,5 месяца за счёт экономии электроэнергии и снижения затрат на ремонт оборудования.

5. Экономический и экологический эффект от внедрения аэродинамического комплекса обусловлен снижением энергопотребления при производстве цемента на 5–7 кВт·ч/т, что составляет до 15 % от общих энергозатрат на этапе помола. Это напрямую уменьшает потребность в генерации электроэнергии и, соответственно, сокращает объём сжигаемого топлива на электростанциях, что приводит к снижению выбросов CO₂.

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 сепараторе.

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%.

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, при котором 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 ~18 % превышает существующее решение «сепаратор + циклон».

Предложены настройки аэродинамического комплекса, обеспечивающие эффективность его работы при получении цемента с заданной удельной поверхностью. Для $S_{y\delta} \sim 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$: 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 $S_{y\delta} \sim 400\text{--}450 \text{ м}^2/\text{кг}$ при прочих равных условиях $Q=380 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $n_p=1200 \text{ об/мин}$; для $S_{y\delta} \sim 550 \text{ м}^2/\text{кг}$ – при $Q=460 \text{ м}^3/\text{ч}$ $n_p=1200 \text{ об/мин}$.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть *рекомендованы* для внедрения на 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург, Д. Б. Технология цемента / Д. Б. Гинзбург, В. И. Савин. – Москва: Стройиздат, 1983. – 384 с.
2. Alsop, P. A. The Cement Plant Operations Handbook / P. A. Alsop. – 6th ed. – Dorking: International Cement Review, 2019. – 410 p.
3. Богданов, В. С. Энергоэффективные технологии помола и классификации в производстве цемента / В. С. Богданов, Р. Р. Шарапов, С. И. Ханин. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. – 248 с.
4. Глухарев, Н. Ф. Интенсификация замкнутых систем помола / Н. Ф. Глухарев // Цемент и его применение. – 2005. – № 1. – С. 42-46.
5. Еремин, Н. Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов / Н. Ф. Еремин. – Москва: Высш. шк., 1986. – 279 с.
6. Шарапов, Р. Р. Совершенствование процесса разделения в воздушном центробежном сепараторе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Шарапов Ринат Ринатович. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. – 22 с.
7. Международный справочник по цементной технологии / под редакцией Р. К. Mehta, Р. J. M. Monteiro. – 4-е изд. – New York: McGraw-Hill, 2014. – 816 с.
8. Жидков, В. В. Совершенствование процесса разделения тонкодисперсных порошков в классификаторе центробежного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Жидков Вадим Владимирович. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2012. – 22 с.
9. Асламова, В. С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Асламова Вера Сергеевна. – Томск: ТПУ, 2009. – 40 с.
10. Пономарев, В. Б. Расчет и проектирование оборудования для воздушной сепарации сыпучих материалов: учебное пособие / В. Б. Пономарев. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 180 с.
11. Таймасов, Б. Т. Технология производства портландцемента: учебное пособие / Б. Т. Таймасов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 220 с.

12. Трофимченко, В. Н. Совершенствование процесса дезагрегации частиц материала в динамическом сепараторе с устройством в виде многозаходных лент: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Трофимченко Валерия Николаевна. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. – 22 с.

13. Хайме Хосе Родригес Ривас. Исследование и разработка регулируемого электропривода центробежного сепаратора линии по производству цемента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Хайме Хосе Родригес Ривас. – Москва: МЭИ, 1991. – 18 с.

14. НИИцемент. Технологические схемы и оборудование для производства цемента: [сайт]. – Москва: НИИцемент, 2023. – URL: <https://extxe.com/4810/tehnologicheskie-shemy-i-oborudovanie-dlja-proizvodstva-sementa/> (дата обращения: 11.02.2026).

15. 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.

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

17. Союз производителей цемента «СОЮЗЦЕМЕНТ»: официальный сайт. – Москва, 2026. – URL: <https://soyuzcem.ru> (дата обращения: 12.02.2026).

18. Правительство Российской Федерации: официальный сайт. – Москва, 2026. – URL: <http://government.ru/info/35560/> (дата обращения: 12.02.2026).

19. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 2 апреля 2019 г. № 210. – Текст: электронный // Официальный

интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 12.02.2026).

20. Работа в ЦЕМРОСе. – Текст: электронный // Московский комсомолец: [сайт]. – 2026. – URL: <https://www.mk.ru/projects/rabotavcemrose/> (дата обращения: 12.02.2026).

21. Татарченков, А. А. Монтаж и ремонт оборудования цементных предприятий / А. А. Татарченков // Цемент и его применение. – 2020. – № 6. – С. 78-79. – EDN TTHOUV.

22. Афанасин, В. А. Техническое переоснащение Красноярского цементного завода / В. А. Афанасин // Цемент и его применение. – 2021. – № 3. – С. 48-51. – EDN DJEIVB.

23. Глызин, Э. В. Пуск завода «АТОМ Цемент» / Э. В. Глызин // Цемент и его применение. – 2020. – № 6. – С. 38-41. – EDN NIGFEE.

24. Шарапов, К. В. Строительство новой технологической линии сухого способа на цементном заводе во Франции / К. В. Шарапов // Цемент и его применение. – 2022. – № 2. – С. 36-39. – EDN IHGMRW.

25. Завод Hangzhou Shanya South Cement / Ш. Чжэньмин, П. Синхуа, Ч. Цзянь [и др.] // Цемент и его применение. – 2024. – № 2. – С. 40-41. – EDN NHXWWJW.

26. Сибпромаш: оборудование для цементной промышленности: официальный сайт. – Новосибирск, 2026. – URL: <https://sibprm.ru/> (дата обращения: 12.02.2026).

27. АО «ТЯЖМАШ»: официальный сайт. – Самара, 2026. – URL: <https://www.tyazhmash.com/> (дата обращения: 12.02.2026).

28. Уралмаш Картэкс: официальный сайт. – Екатеринбург, 2026. – URL: <https://uralmash-kartex.ru/> (дата обращения: 12.02.2026).

29. Ламель: производство динамических сепараторов: официальный сайт. – Минск, 2026. – URL: <https://lamel777.by/> (дата обращения: 12.02.2026).

30. НПО «УралОмега»: официальный сайт. – Магнитогорск, 2026. – URL: <https://uralomega.ru/> (дата обращения: 12.02.2026).26.

31. 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. № 7. С. 44-49. DOI 10.31659/0585-430X-2025-837-7-44-49. EDN FOAVFX.

Мелихов, С. В. Разработка центробежного сепаратора с турбинной зоной разделения : специальность 05.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мелихов Сергей Викторович. – Белгород, 2004. – 28 с.

32. Биленко, Л. Ф. Изучение закономерностей и интенсификация процессов совместного измельчения разнопрочных минеральных компонентов (на примере шихты глиноземного производства) : специальность 05.15.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Биленко Леонид Федорович. – Санкт-Петербург, 1996. – 77 с. – EDN ZJDNQX.

33. Смирнов, Н. М. Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Смирнов Николай Михайлович. – Иваново, 1997. – 32 с. – EDN ZJXLBP.

34. Жуков, В.П. Измельчение-классификация как процесс с распределенными параметрами: моделирование, расчет и оптимизация : специальность 05.17.08. "Процессы и аппараты химической технологии" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Жуков Владимир Павлович. – Москва, 1993. - 32 с.

35. Анахин, В. Д. Разделение сыпучих материалов на неперфорированной поверхности вибрационных сепараторов. Теория и методы расчета : специальность 05.04.09 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Анахин Владимир Дмитриевич. – Москва, 1996. – 57 с. – EDN ZJUQNL.

36. Сансызбаев, К. К. Интенсификация процессов обработки дисперсных материалов за счет использования аппаратов с активными гидродинамическими

режимами : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сансызбаев Казыбек Кошенович. – Москва, 1996. – 19 с. – EDN ZJERFJ.

37. Брендаков, В. Н. Численное моделирование закрученных турбулентных течений применительно к процессам разделения порошкообразных сред : специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Брендаков Владимир Николаевич. – Томск, 1993. – 22 с. – EDN ZKCKMP.

38. Хайме, Х. Р. Р. Исследование и разработка регулируемого электропривода центробежного сепаратора линии по производству цемента : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хайме Хосе Родригес Ривас. – Москва, 1991. – 18 с. – EDN ZLJQYT.

39. Песнохорова О.А. Моделирование и оптимизация процессов валкового измельчения : специальность 05.17.08. "Процессы и аппараты химической технологии" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Песнохорова Ольга Александровна. – Иваново, 1989. - 16 с.

40. Николаев, Е. В. Закономерности и интенсификация процесса сухого измельчения цементного сырья в барабанных шаровых мельницах : специальность 05.17.11 "Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Николаев Евгений Васильевич. – Москва, 1993. – 20 с. – EDN ZJCSXL.

41. Степанова, И. Б. Строительно-технические свойства тонкомолотых многокомпонентных цементов и бетона на их основе : специальность 05.17.11 "Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Степанова Ирина Борисовна. – Москва, 1994. – 16 с. – EDN ZJYAQZ.

42. Сперанская, О. Б. Воздушная классификация золошлаковых отходов тепловых электростанций для производства строительных материалов :

специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сперанская Ольга Борисовна. – Иваново, 1995. – 17 с. – EDN ZIVHCV.

43. Кирсанов, В. А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кирсанов Виктор Александрович. – Тамбов, 2005. – 34 с. – EDN NIDFKP.

44. Шарапов, Р. Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шарапов Рашид Ризаевич. – Белгород, 2009. – 429 с. – EDN QEPUDV.

45. Смирнов, С. Ф. Разработка научных основ процессов формирования фракционных массопотоков в технологических системах измельчения : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)", 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Смирнов Станислав Федорович. – Иваново, 2009. – 34 с. – EDN NLAPBJ.

46. Дмитриенко, В. Г. Центробежный сепаратор с тангенциальным поддувом дополнительного воздуха : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дмитриенко Виктор Григорьевич. – Белгород, 2000. – 23 с. – EDN ZKMLID.

47. Овчинников, И. А. Сепаратор с дополнительной зоной разделения для струйного противоточного помольного комплекса : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Овчинников Игорь Анатольевич. – Белгород, 2004. – 22 с. – EDN ZNPHXV.

48. Александрова, Е. Б. Центробежный сепаратор с переменным полем скоростей в зоне классификации : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Александрова Елена Борисовна. – Белгород, 2005. – 22 с. – EDN NJTTKT.

49. Анненко, Д. М. Исследование процессов формирования зернового состава цемента в шаровых мельницах замкнутого цикла : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анненко Дмитрий Михайлович. – Белгород, 2009. – 16 с. – EDN NKQUBT.

50. Уваров, А. А. Исследование технологических процессов в трубных шаровых мельницах замкнутого цикла измельчения : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Уваров Александр Анатольевич. – Белгород, 2009. – 18 с. – EDN NKQUBJ.

51. Ханина, О. С. Совершенствование конструкции и процесса классификации материала в трубной мельнице : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ханина Ольга Сергеевна. – Белгород, 2008. – 19 с. – EDN NKOGLZ.

52. Шевчук, С. В. Классификация тонкодисперсных материалов в аппарате с вращающейся зоной разделения : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шевчук Святослав Валерьевич. – Санкт-Петербург, 2007. – 20 с. – EDN NIOTWN.

53. Калинин, С. М. Разработка методов расчета разделительной способности аэродинамических классификаторов порошков : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калинин Сергей Михайлович. – Иваново, 2008. – 16 с. – EDN NJERFB.

54. Бирюков, Д. В. Метод расчёта процесса классификации сыпучих продуктов в аппаратах полочного типа с использованием энтропийно-информационного подхода : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бирюков Дмитрий Валерьевич. – Москва, 2000. – 16 с. – EDN ZKSMJF.

55. Егоров, О. А. Классификация сыпучих материалов в аппаратах с пересыпными полками и моделирование процесса : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Егоров Олег Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2000. – 20 с. – EDN NJONZF.

56. Иванова, В. Г. Развитие аэродинамических и технологических способов сухого пылеулавливания (производство огнеупоров и технической керамики) : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванова Вера Григорьевна. – Воронеж, 2006. – 16 с. – EDN ZNSJOP.

57. Маньков, А. А. Процесс энергосберегающего сухого пылеулавливания зернистыми фильтровальными слоями : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Маньков Александр Александрович. – Воронеж, 2009. – 19 с. – EDN NLCWAL.

58. Абушкевич, А. А. Энергосберегающий помольный комплекс для цементного клинкера на основе роторно-цепного предизмельчителя и трубной мельницы : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абушкевич Александр Анатольевич. – Белгород, 2000. – 19 с. – EDN ZKSMGX.

59. Красильников, А. Г. Закономерности формирования фракционного состава материала при измельчении в трубных мельницах замкнутого цикла : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" :

автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Красильников Александр Геннадьевич. – Иваново, 2008. – 17 с. – EDN NKKSOT.

60. Газалеева, Г. И. Научное обоснование и разработка технологии обогащения асбестовых руд с получением готовой продукции высокого качества : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Газалеева Галина Ивановна. – Екатеринбург, 2008. – 32 с. – EDN NJJFIP.

61. Лебедев, И. Ф. Исследование процессов разделения минералов различной плотности в воздушно-песчаном потоке и разработка новых аппаратов пневмосепарации : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедев Иван Феликсович. – Москва, 2008. – 20 с. – EDN NKIVPR.

62. Заярный, А. А. Повышение эффективности обогащения труднообогатимых тантал-ниобиевых руд на основе центробежной сепарации (на рудах месторождения "Липовый Лог") : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Заярный Андрей Анатольевич. – Чита, 2004. – 17 с. – EDN ZMUUMZ.

63. Чепель, А. Г. Моделирование турбулентного закрученного течения и процессов разделения тонкодисперсных порошков в пневматических центробежных аппаратах : специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Чепель Антон Геннадьевич. – Томск, 2009. – 23 с. – EDN NLGEXH.

64. Зыков, Е. Г. Совершенствование процесса обеспыливания газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами : специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика", 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук / Зыков Евгений Геннадьевич. – Томск, 2005. – 21 с. – EDN NINIИJ.

65. Кряжев, Н. М. Определение рациональных параметров центробежной мельницы для тонкого измельчения карбонатных отходов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кряжев Николай Михайлович. – Москва, 2004. – 20 с. – EDN NHZEEL.

66. Гузаиров, А. Р. Движение пылевоздушного потока в осесимметричном дозвуковом воздухозаборнике с роторным воздухоочистителем : специальность 05.07.05 "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гузаиров Альберт Ринатович. – Уфа, 2000. – 16 с. – EDN ZKTZLT.

67. Есеев, Е. А. Разработка процессов пневмосепарации с классификацией дисперсных материалов в динамическом кольцевом пространстве применительно к мукомольно-крупяному производству : специальность 05.18.12 "Процессы и аппараты пищевых производств" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Есеев Евгений Александрович. – Москва, 2008. – 33 с. – EDN NKIOMR.

68. Ханин, С. И. Разработка научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ханин Сергей Иванович. – Белгород, 2016. – 22 с. – EDN ZQIGV.

69. Логачев, И. Н. Определение аэродинамического сопротивления патрубка рецикла воздуха экспериментальной установки дезинтегратора / И. Н. Логачев, И. А. Семикопенко, Д. В. Смирнов, Д. А. Беляев, С. И. Ханин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 10. – С. 132-137. – DOI 10.12737/article_5bd95a7b37fd98.85598287. – EDN VLFXHQ.

70. Вайтехович, П. Е. Процессы эффективного измельчения в агрегатах с инерционным воздействием на разрушаемый материал : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вайтехович Петр Евгеньевич. – Москва, 2011. – 37 с. – EDN QHNDNR.

71. Козловский, В. И. Определение границы разделения материала в динамическом сепараторе горизонтальной бисерной мельницы / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 99-106. – EDN VPEHSC.

72. Уваров, В. А. Повышение эффективности центробежных сепараторов / В. А. Уваров, Е. В. Харламов, Ринат Р. Шарапов, И. В. Богатырев // Механизация строительства. – 2015. – № 8. – С. 34-36. – EDN UDOSVX.

73. Смирнов Д.В. Совершенствование конструкции и процесса помола в дезинтеграторе с рециклом измельчаемого материала : специальность 05.02.13. "Машины, агрегаты и процессы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смирнов Дмитрий Владимирович. – Белгород, 2019. - 21 с.

74. Трофимченко, В. Н. Совершенствование процесса дезагрегации частиц материала в динамическом сепараторе с устройством в виде многозаходных лент : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трофимченко Владимир Николаевич. – Белгород, 2017. – 22 с. – EDN ZQDHOJ.

75. Трофимченко, В. Н. Исследование агрегатов частиц грубомолотого мергеля и процесса их дезагрегации в сепараторе с устройством в виде многозаходных лент / В. Н. Трофимченко, О. С. Мордовская, С. И. Ханин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 114-120. – DOI 10.12737/22712. – EDN XBFAHN.

76. Садретдинов, Ш. Р. Моделирование гидродинамики и процессов разделения порошковых материалов в пневматических центробежных аппаратах :

специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Садретдинов Шамиль Рахибович. – Томск, 2011. – 24 с. – EDN QHQFPP.

77. Хайруллина, В. Ю. Численное исследование нестационарного турбулентного закрученного течения в воздушно-центробежном классификаторе: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Хайруллина Виктория Юрьевна. – Томск: ТГУ, 2012. – 26 с.

78. Исаева, М. Р. Автоматизация технологического процесса измельчения золошлаковой смеси в шаровой мельнице замкнутого цикла для получения органоминеральной добавки в сухие строительные смеси и мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Исаева Мадина Ризвановна. – Грозный, 2012. – 30 с. – EDN QIISQX.

79. Браун-Аквей, В. Л. Моделирование и управления контуром измельчения цемента на основе применения импульсных прогнозирующих моделей : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Браун-Аквей Виллиам Лесли. – Тамбов, 2015. – 22 с. – EDN ZPVTZJ.

80. Фалей, Е. А. Исследование закономерностей и разработка технических решений турбулизационной центробежной сепарации минерального сырья : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фалей Екатерина Александровна. – Екатеринбург, 2014. – 20 с. – EDN ZPMGVP.

81. Кускова, Я. В. Повышение эффективности обогащения тонких фракций руд и материалов с использованием гравитационно-центробежной сепарации : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кускова Яна Вадимовна. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с. – EDN QIFNON.

82. Анохин, П.М. Обоснование параметров аэродинамически активных фрикционных сепараторов для разделения асбестосодержащих руд : специальность 05.05.06. "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анохин Петр Михайлович. – Омск, 2018. – 18 с.

83. Мелихов, С. В. Разработка центробежного сепаратора с турбинной зоной разделения : специальность 05.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мелихов Сергей Викторович. – Белгород, 2004. – 28 с.

84. Боровский, Д. Н. Тонкое измельчение материалов малотоннажных производств в быстроходных центробежно-шаровых мельницах : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Боровский Денис Николаевич. – Минск, 2015. – 23 с. – EDN XJGXCO.

85. Козловский, В. И. Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. И. Козловский. – Минск, 2017. – 24 с. – EDN TIEGDJ.

86. Аршинский, М.И. Процесс сепарации, поля скоростей и давлений в прямоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения : специальность 05.17.08. "Процессы и аппараты химической технологии" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.И. Аршинский – Томск, 2013. - 21 с.

87. Евсеев, Н. С. Исследование гидродинамики и процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах : специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Евсеев Николай Сергеевич. – Томск, 2016. – 22 с. – EDN ZQGICH.

88. Хазбулатов, А. И. Выбор оптимальных параметров прямоточноцентробежного сепаратора для очистки газа от механических примесей : специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хазбулатов Артур Ильдарович. – Казань, 2013. – 20 с. – EDN ZPCIOР.

89. Чистяков Я.В. Исследование и разработка пылеуловителей, обеспечивающих повышение эффективности очистки воздуха аспирационных систем дробильно-сортировочных комплексов карьеров : специальность 25.00.36. "Геоэкология (защита окружающей среды от пыли/загрязнений)" автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чистяков Ярослав Владимирович. – Тула, 2012. – 19 с.

90. Михеев, П. Г. Получение угрубленной пыли в пылесистемах с шаровыми барабанными мельницами : специальность 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михеев Павел Геннадьевич. – Иваново, 2010. – 23 с. – EDN QGWSEX.

91. Ибрагимов, Р. А. Особенности измельчения в аппарате вихревого слоя / Р. А. Ибрагимов // Цемент и его применение. – 2024. – № 2. – С. 42-46. – EDN YRPLEA.

92. Агарков, А. М. Стендовая установка пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами / А. М. Агарков // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 10. – С. 25-29. – EDN KUTONH.

93. Кузенков, А. Н. Моделирование функционирования системы помола цемента с использованием процедуры регрессионной идентификации / А. Н. Кузенков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 12. – С. 119-121. – EDN TBNUEV.

94. Казаринов, Л. С. Выбор решений при оперативном нейроуправлении процессом помола шихты в цементном производстве / Л. С. Казаринов, Дж. Р. Хасанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление,

радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 128-138. – DOI 10.14529/ctcr190211. – EDN QPFCMN.

95. Ожерельев, Д. А. Выбор оптимальной конструкции сепаратора методом анализа иерархий / Д. А. Ожерельев, В. В. Шалай // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 75-81. – DOI 10.25206/2588-0373-2020-4-4-75-81. – EDN OGUUGG.

96. Морозов, Ю. П. Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией / Ю. П. Морозов, П. М. Пеньков, В. Т. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 4. – С. 62-69. – DOI 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69. – EDN XNUING.

97. Турубаев, Р. Р. Моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере / Р. Р. Турубаев, А. В. Шваб // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 5. – С. 1248-1256. – EDN OXZCOA.

98. Земан, Д. А. Экспериментальное определение относительной скорости частиц в условиях пневмотранспорта / Д. А. Земан, С. Ф. Шишкин, А. С. Шишкин, Д. С. Бараковских // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 6. – С. 110-114. – DOI 10.12737/article_5926a0598b7e58.27665013. – EDN YQPJOL.

99. Бараковских, Д. С. Повышение эффективности измельчения в эжекторной струйной мельнице / Д. С. Бараковских, С. Ф. Шишкин // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2022. – № 1(69). – С. 54-60. – DOI 10.6060/snt.20226901.0007. – EDN TFSMNT. Гальперин, В. И. Воздушная классификация сыпучих материалов. Часть 1. Основные определения и технологические показатели / В. И. Гальперин // Химическая промышленность сегодня. – 2005. – № 8. – С. 4-13. – EDN MURBEF.

100. Данильчук, В. С. Классификатор дисперсных материалов для размольно-классифицирующего технологического комплекса / В. С. Данильчук //

Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2022. – № 12. – С. 42-44. – DOI 10.26160/2309-8864-2022-12-42-44. – EDN CMTKDW.

101. Абиев, Р. Ш. Исследования гидродинамики аппарата с вихревыми контактными устройствами / Р. Ш. Абиев, А. А. Артамонов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2025. – № 74. – С. 50-60. – DOI 10.36807/1998-9849-2025-74-100-50-60. – EDN TRAXAX.

102. Мехатронный технологический комплекс как объект проектирования / А. Н. Веригин, А. Г. Иштугин, М. В. Коробчук, А. С. Мазур // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2023. – № 64(90). – С. 104-112. – DOI 10.36807/1998-9849-2023-64-90-104-112. – EDN MDQYBT.

103. Анализ поля скорости газа в прямоточном циклоне / В. С. Топталов, О. М. Флисюк, Н. А. Марцулевич, Е. И. Борисова // Фундаментальные основы механики. – 2024. – № 14. – С. 103-105. – DOI 10.26160/2542-0127-2024-14-103-105. – EDN ZXLTPIX.

104. Оценка эффективности разделения пылегазовых потоков в прямоточных циклонах / В. С. Топталов, Ю. Г. Чесноков, В. П. Мешалкин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2023. – Т. 57, № 4. – С. 363-370. – DOI 10.31857/S0040357123040139. – EDN ZBTOOQ.

105. Дик, И. Г. Влияние функции распределения частиц по размерам в полидисперсной суспензии на сепарационный процесс в классификационном аппарате / И. Г. Дик, Л. Л. Миньков, Е. В. Пикущак // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2007. – № 1(1). – С. 63-71. – EDN KNOGGB.

106. Бараковских, Д. С. Аномалия степени фракционного разделения в центробежных классификаторах / Д. С. Бараковских, А. С. Шишкин, С. Ф. Шишкин // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2025. – № 1(81). – С. 62-68. – DOI 10.6060/snt.20258101.0007. – EDN YYOJHG.

107. Соломаха, А. Е. Моделирование аэродинамики закрученного турбулентного потока в расширяющемся канале воздушно-центробежного классификатора / А. Е. Соломаха, А. В. Шваб // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2025. – № 96. – С. 145–159. – DOI 10.17223/19988621/96/12. – EDN RSOPHA.
108. 108 Ким, Б. Г. Механическое оборудование производства неметаллических строительных изделий и конструкций / Б. Г. Ким [и др.]. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 220 с.
109. Алиев, Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справочное издание / Г. М.-А. Алиев. – М. : Metallurgia, 1986. – 544 с.
110. Коузов, П. А. Указания по расчету циклонов. Методические материалы для проектирования / П. А. Коузов. – М. : ВНИИОТ ВЦСПС, 1971. – 53 с.
111. Марешаль, Ж. Ф. Новый высокоэффективный сепаратор / Ж. Ф. Марешаль // Цемент и его применение. – 2017. – № 4. – С. 100–101.
112. Биннер, И. Технология измельчения и классификации шлака / И. Биннер, Р. Ассмус, Е. В. Щеголяев // Цемент и его применение. – 2006. – № 5. – С. 31–37.
113. Бауман, В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. – М. : Машиностроение, 1981. – 324 с.
114. Kershow, M. Analysis of O-SEPA separators new at Blue Circle, Australia / M. Kershow, I. Yardi // World Cement. – 1989. – Vol. 20, No. 11. – Pp. 400–405.
115. Потье, Л. Оптимизация помола с использованием сепаратора TSV / Л. Потье, Ф. Ньель // Цемент и его применение. – 2009. – № 3. – С. 46–48.
116. Классен, П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
117. Харламов, Е. В. Методика расчета аппарата для разделения железосодержащего минерального сырья / Е. В. Харламов, Р. Р. Шаратов, М. А. Степанов // Механизация строительства. – 2014. – № 3. – С. 28–35.

118. Классен, П. В. Сепараторы с кипящим слоем / П. В. Классен, Н. А. Шахова, А. А. Абдулин и др. // Химическая промышленность. – 1972. – № 11. – С. 863–866.

119. Агарков, А. М. Повышение эффективности процесса очистки запыленного воздуха пылеосадителем инерционного типа с регулируемыми параметрами : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / А. М. Агарков. – 2022. – 170 с.

120. Пат. 2625841 Российская Федерация, МПК В01D 45/04. Способ разделения тонкодисперсных порошков / Прокопенко В. С., Шарапов Р. Р., Агарков А. М.; заявитель и патентообладатель [и др.]. – № 2015148844/05 ; заявл. 23.12.2015 ; опубл. 19.07.2017, Бюл. № 20.

121. Пат. на полез. модель 157341 Российская Федерация, МПК В01D 45/04. Инерционный пылеконцентратор : № 2014152565/05 : заявл. 24.12.2014 : опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33 / Шарапов Р. Р., Овсянников Ю. Г., Бойчук И. П., Прокопенко В. С.

122. Оптимизация состава самоуплотняющихся бетонных смесей, стойких к сегрегации, и бетонов на их основе / М. Н. Водолад, Е. В. Егорова, С. В. Лахтарина [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 117-125. – EDN DSKQTS.

123. Барский, М. Д. Фракционирование порошков / М. Д. Барский. – М. : Недра, 1980. – 327 с.

124. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – М. : Химия, 1989. – 160 с.

125. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – Введ. 2021-03-01. – М. : Стандартиформ, 2020. – 30 с.

126. ГОСТ 310.2-76. Цементы. Методы определения тонкости помола. – Введ. 1978-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 8 с.

127. Ибрагимов, Р. А. Модель определения количества активированного вещества при механомагнитной активации / Р. А. Ибрагимов, Е. В. Королев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – № 1(71). – С. 67-76.

128. Пироцкий, В. П. Современные системы измельчения для портландцементного клинкера и добавок: Схемы. Эффективность. Оптимизация / В. П. Пироцкий. – СПб. : Изд-во ЦПО «Информатизация образования», 2000. – 71 с.
129. Овчинников, Д. А. Моделирование процесса сепарации цемента / Д. А. Овчинников, В. А. Уваров, Е. О. Шеремет // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78, № 12. – С. 34-37. – EDN YLFKTR.
130. Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH: официальный сайт. – Beckum, 2026. – URL: <https://www.christianpfeiffer.com/en/> (дата обращения: 12.02.2026).
131. Дуда В. Цемент / Пер. с нем. Е. Ш. Фельдмана: Под ред. Б. Э. Юдовича. – М.: Стройиздат, 1981. 228 с.
132. 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 WNAХMF.
133. Зигмонди Р. Коллоидная химия. Под ред. и с предисл. И. А. Кухаренко. Харьков: НКСнаба УССР, 1933. 478 с.
134. 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.
135. 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.
136. Трёмбовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева// М.: Энергия, 1977. – 296 с. (вродебы лиценне проверить)
137. 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 SAYXUH

138. Шарапов, Р.Р. Моделирование процесса разделения тонкодисперсных материалов в динамических сепараторах / Р.Р. Шарапов, В.С. Прокопенко, А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 84-89. – EDN TOUWYP.

139. Уваров, В. А. Обоснование кривой разделения воздушного сепаратора / В. А. Уваров, Р. Р. Шарапов, Е. В. Харламов // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77, № 9. – С. 13-15. – EDN WJECEX.

140. Шарапов, Р. Р. Моделирование процесса сепарации цемента в аппаратах 3-го поколения / Р.Р. Шарапов, 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

141. 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.

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

143. 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
144. Чалов В. А. Противоточный циклон с направляющим устройством выходного патрубка : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13. – Белгород, 2012. – 185 с.
145. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
146. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков [и др.]; под общ. ред. А. А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
147. Прокопенко, В. С. Моделирование пропуска отдельных фракций пыли в циклоне и построение матрицы / В.С. Прокопенко, Т.Н. Орехова, Р.Р. Шарапов // *Энергоресурсосберегающие 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
148. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
149. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
150. Седов Л. И. Механика сплошной среды : в 2 т. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 488 с.; Т. 2. – 568 с.
151. Drazin P. G., Riley N. *The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 195 p.
152. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика : в 2 ч. – М.: Физматгиз, 1963. – Ч. 1. – 584 с.
153. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

154. Cassel K. W. Variational Methods with Applications in Science and Engineering. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 413 p.

155. Бойчук И. П., Тарапов И. Е. Применение метода интегральных соотношений для изучения движения вязкой жидкости по деформируемым трубам // Вестник Харьковского ун-та. Сер. Математика, прикладная математика и механика. – 2002. – № 542. – С. 13–18.

156. Бойчук И. П. Перистальтический транспорт вязкой жидкости в цилиндрических трубах // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2005. – № 29. – С. 142–143.

157. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции : учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

158. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. – М.: Мир, 1981. – 598 с.

159. Абиев, Р. Ш. Исследования гидродинамики аппарата с вихревыми контактными устройствами / Р. Ш. Абиев, А. А. Артамонов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2025. – № 74. – С. 50-60. – DOI 10.36807/1998-9849-2025-74-100-50-60. – EDN TRAXAX.

160. Нелинейная теория распространения волн / под ред. Г. И. Баренблата. – М.: Мир, 1979. – 231 с.

161. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений. – М.: Недра, 1993. – 223 с.

162. Бондарь А. Т., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. – Киев: Вища школа, 1976. – 181 с.

163. АО «Петербургская сбытовая компания» официальный сайт. – Санкт-Петербург, 2026. – URL: <https://pesc.ru> (дата обращения: 10.02.2026).

164. Лахтарина, Н. Н. Цементы с минеральной добавкой на основе золошлаковых отходов ТЭС / Н. Н. Лахтарина, Н. М. Зайченко, С. В. Лахтарина // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 163-169. – DOI 10.71536/spgs.2024.v20n3.5. – EDN IYZRFR.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Анализ развития отечественных научных направлений в области разработки оборудования для разделения дисперсных материалов по ретроспективе диссертационных исследований¹

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
05.02.13. Машины, агрегаты и процессы					
1.	2022	Повышение эффективности процесса очистки запыленного воздуха пылеосадителем инерционного типа с регулируемыми параметрами	Агарков А.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Агарков Александр Михайлович. – Иваново, 2022. - 19 с.	К
2.	2019	Совершенствование конструкции и процесса помола в дезинтеграторе с рециклом измельчаемого материала	Смирнов Д.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смирнов Дмитрий Владимирович. – Белгород, 2019. - 21 с.	К
3.	2017	Совершенствование процесса дезагрегации частиц материала в динамическом сепараторе с устройством в виде многозаходных лент	Трофимченко В.Н.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трофимченко Владимир Николаевич. – Белгород, 2017. – 22 с. – EDN ZQDHOJ.	К
4.	2017	Разработка научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами	Ханин С.И.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ханин Сергей Иванович. – Белгород, 2016. – 22 с. – EDN ZQIGV.	Д
5.	2016	Совершенствование процесса разделения в воздушном центробежном сепараторе	Шарапов Р.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шарапов Ринат Рашидович. – Белгород, 2016. – 22 с. – EDN ZQIMGR.	К
6.	2015	Тонкое измельчение материалов малотоннажных производств в быстроходных центробежно-шаровых мельницах	Боровский Д.Н.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Боровский Денис Николаевич. – Минск, 2015. – 23 с. – EDN XJGXCO.	К
7.	2012	Совершенствование процесса разделения тонкодисперсных порошков в классификаторе центробежного типа	Жидков В.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жидков Владимир Валентинович. – Белгород, 2012. – 22 с. – EDN QIATUL.	К
8.	2011	Процессы эффективного измельчения в агрегатах с инерционным воздействием на разрушаемый материал	Вайтехович П.Е.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вайтехович Петр Евгеньевич. – Москва, 2011. – 37 с. – EDN QHNDNR.	Д

¹ Данные, представленные в подразделе, отражены в работе: 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. № 7. С. 44-49. DOI 10.31659/0585-430X-2026-843-1-2-90-104.EDN UYUFFT.

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
9.	2009	Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла	Шарапов Р.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шарапов Рашид Ризаевич. – Белгород, 2009. – 37 с. – EDN NKQBTF.	Д
10.	2009	Разработка научных основ процессов формирования фракционных массопотоков в технологических системах измельчения	Смирнов С. Ф.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Смирнов Станислав Федорович. – Иваново, 2009. – 34 с. – EDN NLAPBJ.	Д
11.	2009	Исследование процессов формирования зернового состава цемента в шаровых мельницах замкнутого цикла	Анненко Д.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анненко Дмитрий Михайлович. – Белгород, 2009. – 16 с. – EDN NKQUBT.	К
12.	2009	Исследование технологических процессов в трубных шаровых мельницах замкнутого цикла измельчения	Уваров А.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Уваров Александр Анатольевич. – Белгород, 2009. – 18 с. – EDN NKQUBJ.	К
13.	2008	Совершенствование конструкции и процесса классификации материала в трубной мельнице	Ханина О.С.	Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ханина Ольга Сергеевна. – Белгород, 2008. – 19 с. – EDN NKOGLZ.	К
14.	2005	Центробежный сепаратор с переменным полем скоростей в зоне классификации	Александрова Е.Б.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Александрова Елена Борисовна. – Белгород, 2005. – 22 с. – EDN NJTTKT.	К
15.	2004	Сепаратор с дополнительной зоной разделения для струйного противоточного помольного комплекса	Овчинников И.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Овчинников Игорь Анатольевич. – Белгород, 2004. – 22 с. – EDN ZNPHXV.	К
16.	2000	Центробежный сепаратор с тангенциальным поддувом дополнительного воздуха	Дмитриенко В.Г.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дмитриенко Виктор Григорьевич. – Белгород, 2000. – 23 с. – EDN ZKMLID.	К
17.	2000	Энергосберегающий помольный комплекс для цементного клинкера на основе роторно-цепного предизмельчителя и трубной мельницы	Абушкевич А.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абушкевич Александр Анатольевич. – Белгород, 2000. – 19 с. – EDN ZKSMGX.	К
05.17.08. (2.6.13.) Процессы и аппараты химической технологии**					
18.	2017	Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой	Козловский В.И.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. И. Козловский. – Минск, 2017. – 24 с. – EDN TIEGDJ.	К

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
19.	2013	Процесс сепарации, поля скоростей и давлений в прямоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения	Аршинский М.И.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.И. Аршинский – Томск, 2013. - 21 с.	К
20.	2009	Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета	Асламова В.С.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Асламова Вера Сергеевна. – Томск, 2009. – 40 с. – EDN NKTFLB.	Д
21.	2009	Процесс энергосберегающего сухого пылеулавливания зернистыми фильтровальными слоями	Маньков А.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Маньков Александр Александрович. – Воронеж, 2009. – 19 с. – EDN NLCWAL.	К
22.	2008	Разработка методов расчета разделительной способности аэродинамических классификаторов порошков	Калинин С.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калинин Сергей Михайлович. – Иваново, 2008. – 16 с. – EDN NJERFB.	К
23.	2008	Закономерности формирования фракционного состава материала при измельчении в трубных мельницах замкнутого цикла	Красильников А.Г.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Красильников Александр Геннадьевич. – Иваново, 2008. – 17 с. – EDN NKKSOT.	К
24.	2007	Классификация тонкодисперсных материалов в аппарате с вращающейся зоной разделения	Шевчук С.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шевчук Святослав Валерьевич. – Санкт-Петербург, 2007. – 20 с. – EDN NIOTWN.	К
25.	2006	Развитие аэродинамических и технологических способов сухого пылеулавливания: производство огнеупоров и технической керамики	Иванова В.Г.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванова Вера Григорьевна. – Воронеж, 2006. - 16 с.	К
26.	2005	Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов	Кирсанов В.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кирсанов Виктор Александрович. – Тамбов, 2005. – 34 с. – EDN NIDFKP.	Д
27.	2000	Метод расчёта процесса классификации сыпучих продуктов в аппаратах полочного типа с использованием энтропийно-информационного подхода	Бирюков Д.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бирюков Дмитрий Валерьевич. – Москва, 2000. – 16 с. – EDN ZKSMJF.	К
28.	2000	Классификация сыпучих материалов в аппаратах с пересыпными полками и моделирование процесса	Егоров О.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Егоров Олег Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2000. – 20 с. – EDN NJONZF.	К

№ п/п	Год за- шиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
29.	1997	Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности	Смирнов Н.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Смирнов Николай Михайлович. – Иваново, 1997. – 32 с. – EDN ZJXLBP.	Д
30.	1996	Интенсификация процессов обработки дисперсных материалов за счет использования аппаратов с активными гидродинамическими режимами	Сансызбаев К.К.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сансызбаев Казыбек Коченович. – Москва, 1996. – 19 с. – EDN ZJERFJ.	К
31.	1995	Воздушная классификация золошлаковых отходов тепловых электростанций для производства строительных материалов	Сперанская О.Б.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сперанская Ольга Борисовна. – Иваново, 1995. – 17 с. – EDN ZIVHCV.	К
32.	1993	Измельчение-классификация как процесс с распределенными параметрами: моделирование, расчет и оптимизация	Жуков В.П.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Жуков Владимир Павлович. – Москва, 1993. - 32 с.	Д
33.	1989	Моделирование и оптимизация процессов валкового измельчения	Песнохорова О.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Песнохорова Ольга Александровна. – Иваново, 1989. - 16 с.	К
05.15.08, 25.00.13 (2.8.9.) Обогащение полезных ископаемых					
34.	2024	Повышение эффективности процесса центробежной сепарации на основе воздушной турбулизации пристеночного слоя и циркуляционно-накопительной технологии	Пеньков П.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пеньков Павел Михайлович – Екатеринбург, 2024. – 19 с.	К
35.	2014	Исследование закономерностей и разработка технических решений турбулизационной центробежной сепарации минерального сырья	Фалей Е.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фалей Екатерина Александровна. – Екатеринбург, 2014. – 20 с. – EDN ZPMGVP.	К
36.	2012	Повышение эффективности обогащения тонких фракций руд и материалов с использованием гравитационно-центробежной сепарации	Кускова Я.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кускова Яна Вадимовна. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с. – EDN QIFNON.	К
37.	2008	Научное обоснование и разработка технологии обогащения асбестовых руд с получением готовой продукции высокого качества	Газалеева Г.И.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Газалеева Галина Ивановна. – Екатеринбург, 2008. – 32 с. – EDN NJJFIP.	Д

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
38.	2008	Исследование процессов разделения минералов различной плотности в воздушно-песчаном потоке и разработка новых аппаратов пневмосепарации	Лебедев И.Ф.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедев Иван Феликсович. – Москва, 2008. – 20 с.	К
39.	2004	Повышение эффективности обогащения труднообогатимых тантал-ниобиевых руд на основе центробежной сепарации (на рудах месторождения "Липовый Лог")	Заярный А.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Заярный Андрей Анатольевич. – Чита, 2004. – 17 с. – EDN ZMUUMZ.	К
40.	1996	Изучение закономерностей и интенсификация процессов совместного измельчения разнопрочных минеральных компонентов	Биленко Л.Ф.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Биленко Леонид Федорович. – Санкт-Петербург, 1996. – 77 с. – EDN ZJDNQX.	Д
01.02.05 (1.1.9.) Механика жидкости, газа и плазмы					
41.	2022	Моделирование двухфазного турбулентного закрученного течения в вихревой камере пневматического центробежного аппарата	Турубаев Р.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Турубаев Роман Ринатович – Томск, 2022. – 20 с.	К
42.	2016	Исследование гидродинамики и процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах	Евсеев Н.С.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Евсеев Николай Сергеевич. – Томск, 2016. – 22 с. – EDN ZQGICH.	К
43.	2013	Выбор оптимальных параметров прямоточно-центробежного сепаратора для очистки газа от механических примесей	Хазбулатов А.И.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хазбулатов Артур Ильдарович. – Казань, 2013. – 20 с. – EDN ZPCIOP.	К
44.	2012	Численное исследование нестационарного турбулентного закрученного течения в воздушно-центробежном классификаторе	Хайруллина В.Ю.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Хайруллина Виктория Юрьевна. – Томск, 2012. – 26 с. – EDN QIBQZ.	К
45.	2011	Моделирование гидродинамики и процессов разделения порошковых материалов в пневматических центробежных аппаратах	Садретдинов Ш.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Садретдинов Шамиль Рахибович. – Томск, 2011. – 24 с. – EDN QHQFPP.	К
46.	2009	Моделирование турбулентного закрученного течения и процессов разделения тонкодисперсных порошков в пневматических центробежных аппаратах	Чепель А.Г.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Чепель Антон Геннадьевич. – Томск, 2009. – 23 с. – EDN NLGEXH.	К

№ п/п	Год за- щиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
47.	2005	Совершенствование процесса обеспыливания газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами	Зыков Е.Г.	диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зыков Евгений Геннадьевич. – Томск, 2005. – 175 с. – EDN NNWBEB.	К
48.	1993	Численное моделирование закрученных турбулентных течений применительно к процессам разделения порошкообразных сред	Брендаков В.Н.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Брендаков Владимир Николаевич. – Томск, 1993. – 22 с. – EDN ZKCKMP.	К
05.13.06. Автоматизация и управление технологическими процессами					
49.	2021	Эффективное управление мельницей цементного производства в противоречивых условиях	Хасанов Д.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хасанов Джасурджон Рустамджонович. – Челябинск, 2021. – 22 с.	К
50.	2020	Автоматизированная подсистема управления качеством помола цемента с прогнозированием параметров статистическими методами на основе контрольных карт	Кузенков А.Н.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузенков Антон Николаевич. – Пенза, 2020. – 23 с.	К
51.	2015	Моделирование и управления контуром измельчения цемента на основе применения импульсных прогнозирующих моделей	Браун-Аквей Виллиам Лесли.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Браун-Аквей Виллиам Лесли. – Тамбов, 2015. – 22 с. – EDN ZPVTZJ.	К
52.	2012	Автоматизация технологического процесса измельчения золошлаковой смеси в шаровой мельнице замкнутого цикла для получения органоминеральной добавки в сухие строительные смеси и мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны	Исаева М.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Исаева Мадина Ризвановна. – Грозный, 2012. – 30 с. – EDN QIISQX.	К
05.17.11. Технология силикатов					
53.	1994	Строительно-технические свойства тонкомолотых многокомпонентных цементов и бетона на их основе	Степанова И.Б.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Степанова Ирина Борисовна. – Москва, 1994. – 16 с. – EDN ZJYAQZ.	К
54.	1993	Закономерности и интенсификация процесса сухого измельчения цементного сырья в барабанных шаровых мельницах	Николаев Е.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Николаев Евгений Васильевич. – Москва, 1993. – 20 с. – EDN ZJCXJL.	К
05.05.06. Горные машины					

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
55.	2018	Обоснование параметров аэродинамически активных фрикционных сепараторов для разделения асбестосодержащих руд	Анохин П.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анохин Петр Михайлович. – Омск, 2018. – 18 с.	К
56.	2004	Определение рациональных параметров центробежной мельницы для тонкого измельчения карбонатных отходов	Кряжев Н.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кряжев Николай Михайлович. – Москва, 2004. – 20 с. – EDN NHZEEL.	К
25.00.36. Геоэкология (защита окружающей среды от пыли/загрязнений)					
57.	2021	Исследование и разработка технических средств для очистки газопылевых мелкодисперсных выбросов предприятий горно-перерабатывающих комплексов	Муратова К.М.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Муратова Ксения Михайловна. – Тула, 2021. – 18 с.	К
58.	2012	Исследование и разработка пылеуловителей, обеспечивающих повышение эффективности очистки воздуха аспирационных систем дробильно-сортировочных комплексов карьеров	Чистяков Я.В.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чистяков Ярослав Владимирович. – Тула, 2012. – 19 с.	К
05.04.09. Вакуумная, компрессорная техника					
59.	1996	Разделение сыпучих материалов на неперфорированной поверхности вибрационных сепараторов	Анахин В.Д.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Анахин Владимир Дмитриевич. – Москва, 1996. – 57 с. – EDN ZJUQNL.	Д
05.04.13. Машины и аппараты нефтегазового дела					
60.	2022	Повышение эффективности работы сепарационного оборудования для подготовки газа в промышленных условиях	Ожерельев Д.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ожерельев Дмитрий Александрович. – Омск, 2022. – 24 с.	К
05.07.05. Авиационные установки и компрессоры					
61.	2000	Движение пылевоздушного потока в осесимметричном дозвуковом воздухозаборнике с роторным воздухоочистителем	Гузаиров А.Р.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гузаиров Альберт Ринатович. – Уфа, 2000. – 16 с. – EDN ZKTZLT.	К
05.09.03. Электротехнические комплексы					
62.	1991	Исследование и разработка регулируемого электропривода центробежного сепаратора линии по производству цемента	Хайме Хосе Родригес Ривас.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хайме Хосе Родригес Ривас. – Москва, 1991. – 18 с.	К
05.14.14. Тепловые электрические станции					

№ п/п	Год защиты	Тема	Автор	Выходные данные	Тип дис.*
63.	2010	Получение угрубленной пыли в пылесистемах с шаровыми барабанными мельницами	Михеев П.Г.	автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михеев Павел Геннадьевич. – Иваново, 2010. – 23 с. – EDN QGWSEX.	К
05.18.12. Технология пищевых концентратов					
64.	2008	Разработка процессов пневмосепарации с классификацией дисперсных материалов в динамическом кольцевом пространстве применительно к мукомольно-крупяному производству	Есеев Е.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Есеев Евгений Александрович. – Москва, 2008. – 33 с. – EDN NKIOMR.	Д
2.1.5. Строительные материалы и изделия					
65.	2025	Научные основы и технология получения энергоэффективных строительных материалов из механомагнитно активированных композиционных минеральных вяжущих	Ибрагимов Р.А.	автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ибрагимов Руслан Абдирашитович. – Казань, 2025. – 40 с.	Д

* Д – диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, К – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

** В скобках указаны шифры специальностей после изменений согласно Приказу Минобрнауки России от 24.02.2021 № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093» (зарегистрирован Минюстом России 6 апреля 2021 г., регистрационный № 62998).

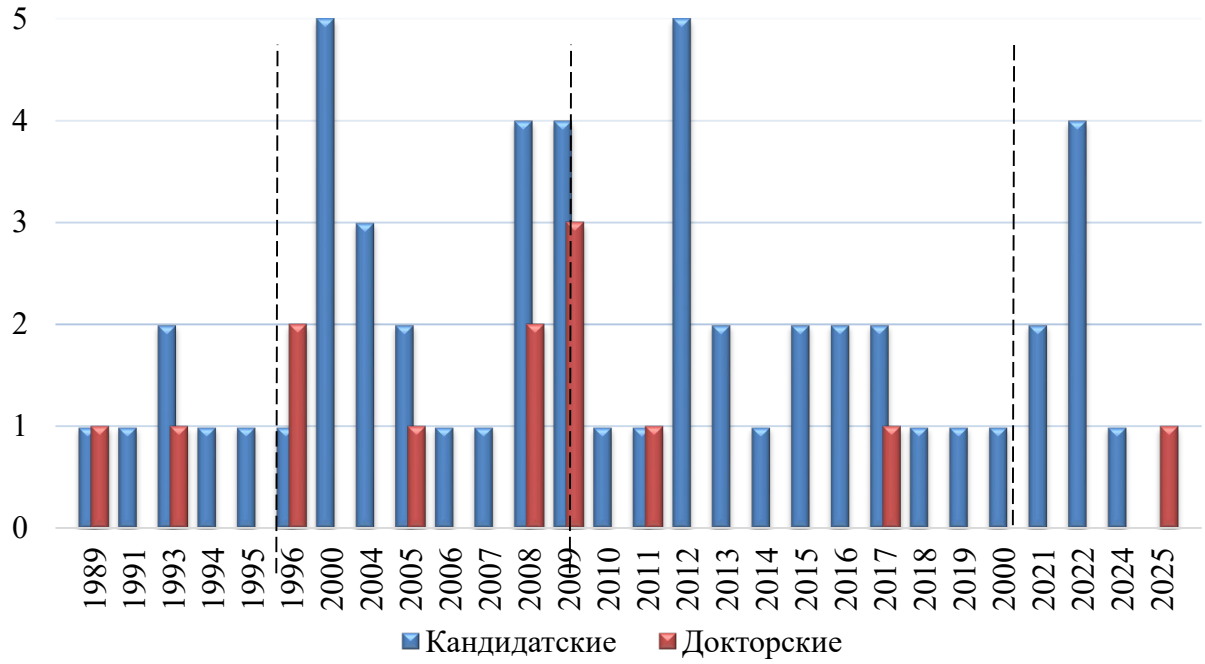


Рисунок 1 – Распределение диссертационных работ по типу (1989–2025 гг.)

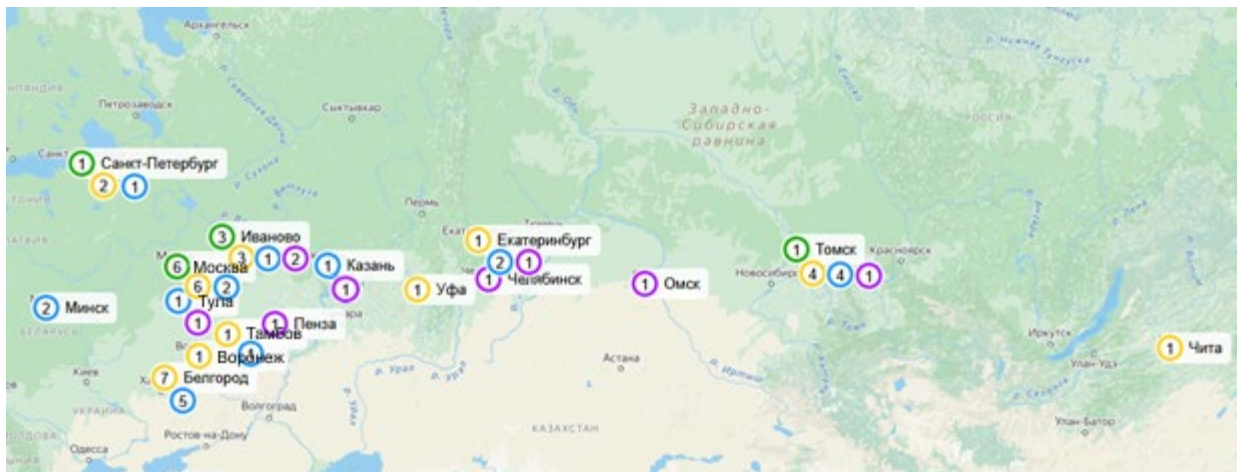


Рисунок 2 – География подготовки кадров высшей квалификации в период:

○ – 1989–1999 гг.; ○ – 2000–2009 гг.; ○ – 2010–2019 гг.; ○ – 2020–2025 гг.

Протокол лабораторных испытаний



ТВЕРЖДАЮ

Первый проректор, д.т.н. проф.
ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова»
Евтушенко Е.И.
_____ 2025 г.

ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ № 120-10
разработанного аэродинамического комплекса для разделения цемента
от «12» сентября 2025 г.

Заказчик испытаний:

Кафедра «Материаловедения и технологии материалов» ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова».

Исполнитель испытаний:

Испытательный центр «БГТУ-сервис» при участии сотрудников кафедры «Подъемно-транспортные и дорожные машины».

Место проведения испытаний:

Лабораторные испытания аэродинамического комплекса проходили на базе «Опытно-промышленного цеха» ИНО и ОПЦ НКМ БГТУ им. В.Г. Шухова при участии представителей Испытательного центра "БГТУ-сервис".

Объект испытаний:

Лабораторная установка аэродинамического комплекса для классификации цемент.

Материалы и методы:

- **Исследуемый материал:** материал получен из мельницы после помола при получении цемента ЦЕМ П/В-Ш 42,5Н (производство ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»»);
- **Контролируемые параметры:** Гранулометрический состав, удельная поверхность;
- **Нормативная база:** ГОСТ 310.2-76.

Результаты испытаний

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение (оптимальный режим)
1	Расход сепарационного воздуха (Q)	м ³ /ч	380
2	Частота вращения ротора сепаратора (n_p)	об/мин	1200
3	Угол наклона лопастей концентратора (α_n)	град	40
4	Ширина рабочей зоны концентратора (a)	м	0,36
	Рециркуляция продукта (a)		2
5	Эффективность классификации (E), среднее	%	83,72
6	Удельная поверхность продукта ($S_{уд}$), среднее	м ² /кг	437
7	Гранулометрический состав в готовом продукте из АК, среднее		
	0-30	%	87,5
	0-80		99,98
8	Содержание готового продукта в крупке из АК, среднее		
	0-30	%	6,27
	0-80		18,96
9	Гранулометрический состав в готовом продукте из «сепаратор+циклон», среднее		
	0-30	%	79
	0-80		99,92
10	Содержание готового продукта в крупке из «сепаратор+циклон», среднее		
	0-30	%	17,42
	0-80		66,23

Заключение:

- Разработанный аэродинамический комплекс «сепаратор + концентратор + циклон» обеспечивает высокую эффективность классификации цемента до 83,72 % (при отсутствии концентратора $E = 64,52$ %);
- Оптимальные режимные параметры обеспечивают получение цемента с удельной поверхностью до 437 м²/кг.

От Заказчика:

Зав. кафедрой «МиТМ» д.т.н., профессор

В. В. Строкова

От Исполнителя (ИЦ «БГТУ-сервис»):

Директор ИЦ «БГТУ-сервис»

С. И. Лещев

Ответственный исполнитель:

доцент, кафедрой «ПТиДМ»

В. С. Прокопенко



(Handwritten signature in blue ink)

(Handwritten signature in blue ink)

(Handwritten signature in blue ink)

Титульный лист стандарта организации «Сепарация цемента с применением
аэродинамического комплекса. Технологический процесс»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Первый проректор

д-р техн. наук, профессор

Е. И. Евтушенко

«08» октября 2025 г.

УТВЕРЖДЕНО:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,

д-р экон. наук, профессор

С. Н. Глаголев

«08» октября 2025 г.



**СЕПАРАЦИЯ ЦЕМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Технологический процесс

СТО 02066339-093-2025

РАЗРАБОТАН:

Заведующий кафедры:

д-р техн. наук, проф.

В.В. Строкова

«07» октября 2025 г.

Исполнитель:

соискатель

В.С. Прокопенко

«07» октября 2025 г.

Белгород 2025 г.

Протокол о намерениях

ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

г. Белгород, г. Сланцы

«23» марта 2026 г.

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия Прокопенко Владислава Станиславовича на тему: «Совершенствование технологического процесса классификации цемента с применением аэродинамического комплекса» (научный руководитель – доктор технических наук, профессор Строкова Валерия Валерьевна) разработан аэродинамический комплекс, обеспечивающий повышение эффективности классификации цемента, предложена математическая модель процесса классификации, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав готового продукта, выявлены оптимальные параметры работы аэродинамического комплекса, обеспечивающие максимальную эффективность классификации при заданной удельной поверхности цемента.

В связи с вышеизложенным, мы, нижеподписавшиеся Начальник цементного производства ОАО Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА» Крылов Д.С. и представители ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» первый проректор, доктор технических наук, профессор Е.И. Евтушенко составили настоящий протокол о том, что полученные результаты будут использованы при проведении плановой модернизации технологической линии по производству цемента при условии необходимого финансирования на приобретение концентратора, как базового элемента аэродинамического комплекса, и проведение соответствующих пуско-наладочных работ и опытно-промышленных испытаний.

**Начальник цементного
производства ОАО**

**Сланцевский цементный
завод «ЦЕСЛА»**

Крылов Д.С.



ОАО «ЦЕСЛА»
Начальник
«Цем. Производства»
Крылов Д.С.

Представители БГТУ им. В.Г. Шухова

первый проректор, д.т.н. проф.

Евтушенко Е.И.



«23» марта 2026 г.

Справка о внедрении результатов в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по цифровой
трансформации и образовательной
деятельности БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р тех. наук, проф.

И.А. Новиков

«27» ЯНВАРЯ 2026 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения, результаты математического моделирования и экспериментальные исследования, полученные при выполнении диссертационной работы В.С. Прокопенко «Совершенствование технологического процесса классификации цемента с применением аэродинамического комплекса», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 – «Строительство» образовательная программа «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование» образовательная программа «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов» образовательная программа «Материаловедение и технологии конструкционных и специальных материалов», 18.03.01 – «Химическая технология» образовательная программа «Химическая технология вяжущих и композиционных материалов»; магистров направления 08.04.01 – «Строительство» образовательная программа «Производство строительных материалов, изделий и конструкций: наносистемы в строительном материаловедении», 22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов» образовательная программа «Материаловедение и технологии композиционных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» образовательная программа «Разработка технологического оборудования и комплексов предприятий строительной индустрии».

Зав. кафедрой строительного материаловедения,
изделий и конструкций,
д-р техн. наук, профессор

В.С. Лесовик

Зав. кафедрой механического оборудования,
канд. техн. наук, доцент

С.И. Анциферов

Д.В. Карнаев

Зам. зав. кафедрой материаловедения
и технологии материалов,
канд. техн. наук, доцент

Л.Н. Бозман

Зав. кафедрой технологии цемента
и композиционных материалов,
канд. техн. наук, доцент

Д.А. Мишин