

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

ПЕРНЕБЕК Бектур Пернебекулы

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ
ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ ГОРНО-
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Скопинцева Ольга Васильевна**

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ И УРОВЕНЬ ПРОФЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ПЫЛЕВОЙ ЭТИОЛОГИИ НА ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И КАЗАХСТАНА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	9
1.1 Краткая характеристика роли горно-металлургической отрасли в современном мире и перспектив ее развития.....	9
1.2 Анализ методик оценки условий труда при воздействии аэрозолей преимущественно фиброгенного действия	25
1.3 Основные способы борьбы с пылью при погрузочно-разгрузочных работах с углем, коксом и угольной шихтой, как источников пылеобразования	38
Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗАПЫЛЕННОСТИ И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТАХ НА КОКСОХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ АО «QARMET»	49
2.1 Характеристика основных технологических процессов на коксохимическом заводе АО «Qarmet»	49
2.2. Определение дисперсного состава пылевого аэрозоля на участках вагоноопрокидывания.....	67
2.3. Анализ факторов, влияющих на запыленность и содержание тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле	76
2.4. Методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий на основе учета дисперсного состава пылевого аэрозоля.....	78
Выводы по второй главе	79
ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СМАЧИВАЕМОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ, ЭЛЕМЕНТНОМУ СОСТАВУ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ, КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАХВАТА ПЫЛИ ЖИДКОСТЬЮ	82
3.1 Исследования эффективности смачиваемости угольной пыли в	

зависимости от размера частиц, концентрации поверхностно-активных веществ и температуры раствора смачивателя	82
3.2 Сканирующая электронная микроскопия угля различных марок, элементный состав образцов угля, поверхности пылевых частиц.....	93
3.3. Исследование процесса седиментации частиц угля в зависимости от концентрации смачивателя и действия гравитационных сил.....	98
3.4. Исследование эффективности захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью при гидрообеспыливания.....	103
Выводы по третьей главе.....	112
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ В ЗДАНИЯХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ	115
4.1 Принцип действия и технические характеристики ваганоопрокидывателей стального департамента коксохимического производства АО «Qarmet»	115
4.2 Рекомендации по снижению тонкодисперсных фракции в воздухе в местах работы ваганоопрокидывателей	123
4.3 Разработка рекомендаций по учету содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле при оценке пылевых нагрузок на работников	131
Выводы по четвертой главе.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Увеличение объемов производства кокса сопровождается интенсификацией работ в углеподготовительных цехах металлургических заводов при выполнении производственных операций по приему, разгрузке, складированию и транспортированию углей, дозированию, дроблению, сепарации и смешению компонентов шихты. Уровни запыленности воздуха в помещениях угольных терминалов могут составлять от 38 до 768 мг/м³ [57]. Рост интенсификации и концентрации углеподготовительных работ сопровождается увеличением запыленности воздуха, в том числе повышением содержания тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле, обуславливающих возникновение заболеваний пылевой этиологии. По статистическим данным за период с 2020 по 2025 годы ежегодно выявлялось от 6 до 8 тысяч новых случаев профессиональных заболеваний.

Запыленность воздуха угольной пылью в производственных цехах металлургической отрасли является важной проблемой, так как она может оказывать негативное влияние на здоровье работников, а также на производственные процессы и окружающую среду. Угольная пыль образуется не только в процессе транспортировки и приема угля, но также в доменном, мартеновском, литейном производствах, в цветной металлургии при использовании угля в металлургических печах.

По данным Роспотребнадзора и ФНЦ гигиены и охраны здоровья (ФНЦГР им. Н.Ф. Измерова), заболевания, вызванные промышленными аэрозолями, включая пневмокониозы, пылевые бронхиты, составляют: около 40–45% всех впервые выявленных профессиональных заболеваний в стране. Эта группа стабильно удерживает 1-е место в профессиональной заболеваемости уже на протяжении многих лет [23].

В металлургической отрасли заболевания пылевой этиологии относятся к числу наиболее распространенных. Преобладающими формами профессиональных заболеваний являются хронический пылевой бронхит,

пневмокониоз (силикоз), хронический обструктивный (астматический) бронхит и др.

Цель работы состоит в улучшении условий труда работников углеподготовительных цехов горно-металлургических предприятий по пылевому фактору за счет целенаправленного уменьшения доли тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле.

Идея работы заключается в возможности снижения концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле за счет усиления диффузионного механизма захвата пылевых частиц каплями жидкости с применением раствора смачивателя, усиливающего адгезионное закрепление, уменьшающего поверхностное натяжение жидкости и повышающего смачиваемость угольной пыли.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

1. Повышение эффективности пылеподавления, в том числе тонкодисперсных частиц угольной пыли, обеспечивается использованием раствора смачивателя, рациональная концентрация которого определяется с учетом элементного состава органической массы угля, степени его метаморфизма, зольности, выхода летучих веществ.

2. При седиментационном пылеулавливании частиц угольной пыли в диапазоне от 1 до 250 мкм применение раствора смачивателя с концентрацией 0,1% приводит к снижению времени седиментации респирабельной и торакальной фракций пыли - до 2,4 раз, грубой - до 3,4 раз (по сравнению с концентрацией 0,05%), что повышает эффективность связывания и осаждения тонкодисперсных фракций угольной пыли в зоне работы вагоноопрокидывателя.

3. Захват частиц пыли каплями воды зависит от соотношения размеров частиц пыли и капель жидкости. При фиксированном диаметре капли для тонкодисперсных фракций пыли увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата до 4,2 раз, что объясняется увеличением числа Стокса и усилением инерционного механизма

улавливания. Для частиц пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра частиц пыли к диаметру капель не должно превышать 2, для частиц пыли диаметром 10 мкм - 4÷5 раз. Применение смачивателя увеличивает диапазон эффективности соотношения размеров частиц пыли и капель жидкости до 20 раз.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: значительным объемом теоретических и лабораторных исследований, использованием методов теории вероятностей и математической статистики, применением апробируемых методик и современного оборудования по электронно-сканирующей микроскопии JSM-7600F с системой микроанализа (ЭДС) производства OXFORD и программным обеспечением AZTEC, лазерной микроскопии для получения результатов исследований.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ современного состояния условий труда по пылевому фактору и профессиональной заболеваемости на металлургических предприятиях.

2. Выполнить анализ существующих методов и технических средств пылеподавления, применяемых при перегрузке сыпучих материалов, в том числе угля вагоноопрокидывателями на металлургических предприятиях, с учетом их эффективности в отношении тонкодисперсных фракций.

3. Исследовать дисперсный состав и физико-химические свойства тонкодисперсных фракций угольной пыли, образуемой в процессе работы вагоноопрокидывателей на коксохимических заводах, в зависимости от характеристик угля.

4. Установить влияние размеров частиц пыли и капель жидкости на коэффициент захвата угольной пыли каплями жидкости с учетом применения смачивателя.

5. Обосновать технические мероприятия по уменьшению доли тонкодисперсных фракций пыли в пылевом аэрозоле горно-металлургических

предприятий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– установлена зависимость атомного отношения кислорода к углероду в угле от его влажности, зольности, выхода летучих веществ, марки;

– доказано, что применения 0,1% раствора смачивателя СП-01 позволяет снизить время седиментации респирабельной и торакальной фракций пыли - до 2,4 раз, грубой – до 3,4 раз (по сравнению с концентрацией 0,05%);

– установлена зависимость коэффициента захвата пылевых частиц каплями жидкости от отношения размеров частицы и капли и условий смачивания.

Научное значение работы заключается в обосновании рациональных параметров пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями, обеспечивающих наиболее значительный эффект в области минимальной эффективности улавливания (1-3 мкм), что способствует улучшению условий труда по пылевому фактору.

Практическая значимость исследований состоит в разработке рекомендаций по определению рациональных параметров пылеподавления на угольных и коксохимических предприятиях по снижению PM2.5, а также в разработке методики оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий на основе учета дисперсного состава пылевого аэрозоля с целью улучшения условий труда горнорабочих и снижения риска профессиональных заболеваний.

Реализация работы. Результаты исследований и рекомендации использованы при оценке параметров систем пылеподавления, а также оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий, проводимой Автономной некоммерческой организацией дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности».

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на Межвузовском международном конгрессе «Высшая

школа: научные исследования» (Москва, 4 апреля 2024 г.), на IX Международной научно-практической конференции «Современное право России: проблемы и перспективы» (Москва, 5 декабря 2024 г.), на международной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, 15 января 2025г.), на научных семинарах кафедры «Техносферная безопасность» (НИТУ МИСИС, 2020 – 2025 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей (в том числе 5 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 2 – в рецензируемых изданиях ВАК РФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения; содержит 17 таблиц, 23 рисунка, список литературы из 97 наименований и 2 приложения.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., проф. О.В. Скопинцевой, зав. кафедрой «Техносферная безопасность», д.т.н., проф. Т. И. Овчинниковой, д.т.н., доц. С.В. Баловцеву и всем сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность» за содействие при выполнении работы.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ И УРОВЕНЬ ПРОФЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ПЫЛЕВОЙ ЭТИОЛОГИИ НА ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И КАЗАХСТАНА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Краткая характеристика роли горно-металлургической отрасли в современном мире и перспектив ее развития

В решении вопросов улучшения пылевой обстановки в горно-металлургической отрасли внесли значительный вклад такие учёные как: И.Д. Балон, В.Н. Воронин, В.П. Журавлев, Г.С. Забурдяев, Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, А.В. Корнев, Б.Ф. Кирин, В.В. Кудряшов, А.С. Кобылкин, А. Е. Лапшин, В. И. Ляшенко, Л.Я. Лихачев, М.И. Нецепляев, Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко, В.А. Родионов, Соболев В.В., О.В. Скопинцева, Б.В. Старк, А.В. Трубицын, А.Э. Филин, В. Кортней, Л. Манделл, Р. Сальман, Colinet, J.M. Listak, X. Chen, Hinds W.S., Y. Zhang, Q. Wang и др.

Большой теоретический и практический вклад в повышение безопасности труда и улучшение санитарно-гигиенических условий в горно-металлургической отрасли внесли А.А. Скочинский, А.И. Ксенофонтова, К.З. Ушаков, М.А. Сребный, А.А. Форсюк, С.В. Баловцев, О.В. Виноградова, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин, К.С. Коликов, И.Л. Кравчук, Е.Ю. Куликова, А.М. Меркулова, Т.И. Овчинникова, А.Э. Филин и др.

Роль горно-металлургической отрасли в современном мире в 2020–2024 гг. усилилась по двум причинам. Первая причина связана с фундаментальной инфраструктурной функцией отрасли. Черная металлургия определяет темпы обновления транспортной, энергетической и строительной инфраструктуры, а цветная металлургия и добыча обеспечивают базовые материалы для машиностроения, электротехники и химической промышленности. За последние пять лет глобальная выплавка стали оставалась близкой к плато, что отражает одновременно зрелость спроса в ряде регионов и циклическую нестабильность на фоне пандемии и последующих ценовых и логистических шоков. По данным World Steel Association мировое производство стали

составило 1 883 млн т в 2020 г., 1 963 млн т в 2021 г., 1 889 млн т в 2022 г., 1 904 млн т в 2023 г. и 1 885 млн т в 2024 г. [5, 6].

Вторая причина связана с технологическим переходом мировой энергетики и промышленности, который резко повысил значение ряда металлов и минерального сырья. По оценке IEA рост спроса на критически важные минералы в 2023 г. оставался высоким, при этом спрос на литий вырос на 30%, а на никель, кобальт и графит увеличился примерно на 8–10% [5]. В долгосрочной постановке World Bank указывает, что для реализации сценариев активной климатической политики спрос на отдельные минералы, включая графит, литий и кобальт, может вырасти почти на 500% к 2050 г., а рост доли вторичного сырья и технологические улучшения становятся ключевыми рычагами снижения сырьевых рисков [5, 6, 8]. Это делает горно-металлургический комплекс не только «базовой» отраслью, но и стратегическим элементом промышленной безопасности, внешней торговли и технологического суверенитета.

В Казахстане горно-металлургический комплекс является системообразующим по трем направлениям: формирование валовой добавленной стоимости, экспортная выручка и поддержание инвестиционного спроса в инфраструктуре, энергетике и транспорте. По уточненным данным Бюро национальной статистики объем ВВП Казахстана за 2024 г. составил 136 693 318,3 млн тенге (21 094 647,8 млн рублей), реальный рост к предыдущему году составил 5% [5, 38, 46]. В отраслевой структуре за 2024 г. промышленность формировала 26,1% ВВП, а горнодобывающая промышленность в составе сырьевого сектора обеспечила 16 430 049,2 млн тенге (2 535 501,4 млн рублей) валовой добавленной стоимости при доле 12,0% в ВВП. Этот масштаб закрепляет роль добычи и первичной переработки как одного из основных источников макроэкономической динамики и устойчивости платежного баланса.

Пятилетний период 2020–2024 гг. для Казахстана характеризуется типичной для ресурсной экономики фазностью. В 2020 г. зафиксировано

снижение экономической активности на фоне пандемии и ограничительных мер, с падением реального ВВП на 2,5%, затем наблюдалось восстановление, которое в официальных материалах связывается с постепенным ростом начиная со второго квартала 2021 г. Для горно-металлургического комплекса это означало ускорение инвестиционных циклов в периоды благоприятной ценовой конъюнктуры и повышенную чувствительность к внешним ограничениям по логистике, оборудованию и реагентам [5, 8, 38].

Перспективы развития Казахстана в горизонте до 2030–2040 гг. логично связывать с тремя векторами. Первый вектор - это углубление передела и рост доли продукции более высокой добавленной стоимости, включая расширение мощностей по металлургической переработке, выпуску сплавов и материалов для машиностроения и энергетики, а также развитие топливного передела в урановой отрасли [5, 8, 38]. Второй вектор — это модернизация и снижение углеродоемкости, включая энергоэффективность, цифровизацию производства, контроль выбросов и развитие замкнутых циклов воды и отходов, поскольку требования покупателей и финансовых институтов к ESG усилились именно после 2020 г [5, 33]. Третий вектор — это диверсификация экспортных маршрутов и снижение транспортных рисков для продукции ГМК, что прямо влияет на реализуемость проектов в условиях высокой доли внешней торговли.

В России горно-металлургический комплекс является одним из крупнейших сегментов национальной экономики и одновременно ключевым поставщиком сырья и металлов на мировые рынки. В наиболее детализированном международном статистическом представлении USGS фиксирует, что в 2022 г. валовая добавленная стоимость в добыче полезных ископаемых и разработке карьеров составила 12,7% ВВП России и достигла 279 млрд долл., при этом наибольшая часть выпуска приходилась на добычу нефти и газа, далее следовали уголь и металлические руды [32, 33, 45]. Эта структура объясняет высокую роль отрасли в формировании экспортных потоков и бюджетно-финансовой устойчивости, а также чувствительность к

изменениям внешнего спроса, цен и ограничений на доступ к технологиям и оборудованию.

В металлургической части показательна динамика выплавки стали как индикатора загрузки базовых производств и внутреннего инвестиционного спроса. По данным World Steel Statistical Yearbook [5, 33] выплавка стали в России составила 71,621 млн т в 2020 г., 77,020 млн т в 2021 г., 71,746 млн т в 2022 г. и 76,029 млн т в 2023 г. Для Казахстана соответствующие значения составили 3,892 млн т, 4,499 млн т, 4,150 млн т и 3,923 млн т в 2020–2023 гг., что отражает существенно меньший масштаб сталеплавильного сегмента при высокой роли добычи и цветной металлургии. На интервале 2020–2024 гг. на российскую отрасль дополнительно повлияли структурные факторы, включая переориентацию торговых потоков, рост роли азиатских рынков и усложнение технологического импорта [5, 33]. Это усилило интерес к импортозамещению в горном оборудовании и металлургических агрегатах, к локализации расходных материалов и к расширению ремонтных и инжиниринговых компетенций.

Перспективы развития горно-металлургического комплекса России до 2030–2040 годов определяются четырьмя группами факторов. Первая группа — это глобальный спрос на металлы для энергетического перехода и инфраструктуры. Ускорение спроса на критические минералы уже наблюдалось в 2023 г. по данным ИЕА, что поддерживает инвестиционную привлекательность ряда проектов при условии управляемости санкционных и логистических рисков [33]. Вторая группа — это декарбонизация металлургии, где ключевыми решениями остаются рост доли электросталеплавильного производства, повышение качества и оборота лома, внедрение низкоуглеродных источников энергии и развитие технологий прямого восстановления железа. Третья группа — это технологические ограничения и стоимость капитала, которые влияют на сроки ввода новых мощностей и на глубину модернизации действующих переделов. Четвертая группа — это кадровая и научно-технологическая база, поскольку сложные

проекты в добыче и металлургии требуют устойчивой связки отраслевых НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы), приборной базы контроля качества и подготовки инженерных кадров.

За последние пять лет роль горно-металлургической отрасли в обеих странах усилилась как функция внешнего спроса и глобального технологического перехода, но структура возможностей различается. Казахстан имеет выраженное конкурентное преимущество в уране и ряде видов сырья и логично заинтересован в расширении цепочек добавленной стоимости и в повышении устойчивости логистики, при сохраняющейся высокой доле добычи в ВВП, которая в 2024 г. составила 12,0% [6, 8]. Россия сочетает крупный масштаб добычи и металлургии с высокой долей добывающего сектора в экономике, которая по оценке USGS в 2022 г. составляла 12,7% ВВП, и располагает значительным потенциалом для технологического углубления переделов при ограничениях по доступу к отдельным технологиям и рынкам капитала [5]. В обоих случаях ключевыми условиями устойчивого роста до 2030–2040 гг. являются рост эффективности, снижение экологических рисков, расширение переработки и повышение надежности цепочек поставок в условиях ускоряющегося спроса на критические минералы [33].

Горно-металлургическая промышленность, являясь одной из базовых отраслей экономики как Российской Федерации (РФ), так и Республики Казахстан (РК), традиционно характеризуется наличием комплекса вредных и опасных производственных факторов. Среди них ведущее место занимает пылевой фактор, оказывающий многогранное негативное воздействие на здоровье работников. Несмотря на технологический прогресс и внедрение мероприятий по охране труда, проблема запыленности воздуха рабочей зоны на многих горно-металлургических предприятиях сохраняет свою остроту, что напрямую коррелирует с высоким уровнем профессиональной заболеваемости органов дыхания [2, 24, 25, 37, 39, 48, 79-82].

Особую значимость в структуре пылевого фактора на горно-

металлургических предприятиях имеет угольная пыль. Она образуется на различных этапах технологического цикла, начиная с разгрузочно-погрузочных работ, и далее в процессах подготовки угольной шихты для коксования, непосредственно в коксохимическом производстве (КХП), при использовании кокса в доменном производстве, а также при внедрении технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи. Угольная пыль, равно как и коксовая пыль, обладает выраженным фиброгенным действием, приводя к развитию антракоза, антракосиликоза и хронических заболеваний бронхолегочной системы. Угольная пыль оказывает раздражающее и фиброгенное воздействие на органы дыхания, что способствует развитию хронических профессиональных заболеваний. Актуальность исследования условий труда по пылевому фактору и связанных с ним рисков заболеваемости остаётся высокой как в Российской Федерации, так и в Республике Казахстан [5, 6, 33, 46].

По данным Министерства труда и Роспотребнадзора РФ, в 2024 году на предприятиях горно-металлургической промышленности отмечался высокий уровень запылённости воздуха рабочей зоны. В частности, в Кемеровской области (Кузбасс), где сосредоточено значительное количество предприятий угольной промышленности, более 80% работников трудятся в условиях, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) пыли [54].

Наибольшее количество нарушений гигиенических нормативов зафиксировано в подземных угольных шахтах и на карьерах, обогатительных фабриках, а также на участках переработки сырья. Основными источниками пыли являются дробильные установки, перегрузочные пункты и участки вагоноопракидывателей [54].

Согласно материалам форума «Угольная отрасль — новые реалии» (2024 г.), уровень профессиональной заболеваемости в отрасли составляет 18,36 случая на 10 000 работающих — в 22 раза выше среднего по стране. В структуре профзаболеваемости преобладают пневмокониозы, хронический бронхит и обструктивные заболевания лёгких. Меры по снижению

запылённости реализуются недостаточно эффективно. Основные проблемы — изношенность аспирационных систем, нехватка современных средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и слабая организация медицинской профилактики [39, 54].

В Казахстане схожие проблемы выявлены в Карагандинской и Восточно-Казахстанской областях, где сосредоточены основные угольные и металлургические предприятия. По данным Министерства здравоохранения РК и Бюро национальной статистики, в 2023 году около 24,2% работников трудились в условиях, не соответствующих гигиеническим нормативам. Каждый третий сотрудник был подвержен повышенной запыленности и загазованности рабочей среды [38].

В Восточно-Казахстанской области в 2024 году зафиксировано 207 случаев профессиональных заболеваний, из которых 44 (21,2%) связаны с воздействием пыли и химических аэрозолей. Наиболее распространённое заболевание — силикоз, составляющий до 13% от общего числа профзаболеваний. Уязвимыми остаются работники со стажем более 10 лет на вредных участках горно-металлургических заводов. На ряде предприятий продолжается эксплуатация устаревших вентиляционных систем. Также отмечается нехватка современной диагностической аппаратуры, что затрудняет раннее выявление пылевых заболеваний [38].

По состоянию на 2024 год, несмотря на определенные административно-организационные усилия, условия труда по пылевому фактору (включая угольную пыль) на многих горно-металлургических предприятиях Российской Федерации и Республики Казахстан остаются неудовлетворительными. Высокие концентрации угольной и коксовой пыли в воздухе рабочей зоны, превышающие гигиенические нормативы, сохраняются на многих производственных участках, особенно в коксохимическом, доменном и агломерационном производствах [38, 39, 54].

Это напрямую обуславливает стабильно высокий уровень профессиональной заболеваемости пылевой этиологии (антракозы,

антракосиликозы, хронические пылевые бронхиты, хроническую обструктивную болезнь легких), которая продолжает занимать лидирующие позиции в структуре профпатологии металлургов.

Имеющиеся проблемы, обусловленные значительным износом производственного оборудования, ограниченными ресурсами, направляемыми на техническое перевооружение, а также недостаточной отработанностью процедур выявления и учета профессиональной заболеваемости, определяют необходимость применения системного подхода. В качестве приоритетного направления выступает разработка и внедрение научно подтвержденных профилактических решений, ориентированных на снижение профессиональных рисков. Углублённое исследование особенностей воздействия угольной пыли на организм работников и дальнейшее развитие механизмов управления профессиональными рисками сохраняют высокую актуальность и относятся к числу ключевых задач в области гигиены труда и профпатологии [38, 39, 54].

За последние пять лет производство чугуна в России демонстрировало разнонаправленную динамику, с пиком в 2021 году и последующим снижением. Пик производства: В 2021 году производство достигло максимального значения — 54,7 млн тонн. Снижение в 2024 году: Производство снизилось на 6% по сравнению с 2023 годом, составив 51,1 млн тонн (табл.1.1). В Казахстане производства чугуна осталось стабильным на уровне 2,7 млн тонн в год [5, 8].

Таблица 1.1- Производство чугуна в России и Казахстане за 2020-2024 гг.

Год	Россия, млн тонн/ год	Казахстан, млн тонн/год
2020	52,0	2,7
2021	54,7	2,7
2022	52,5	2,7
2023	54,4	2,7
2024	51,1	2,7

В контексте современного этапа индустриального развития, характеризующегося интенсификацией технологических процессов и

увеличением производственных нагрузок, проблема обеспечения нормативно допустимых условий труда сохраняет высокую значимость. По данным государственной статистики, удельный вес работников, осуществляющих трудовую деятельность во вредных и (или) опасных условиях, остается существенным и достигает 37,9 %, что указывает на системный характер профессиональных рисков в промышленном секторе [38].

Металлургическое производство традиционно относится к числу отраслей с повышенной концентрацией неблагоприятных факторов рабочей среды. Специфика технологических операций, включая высокотемпературные процессы, переработку минерального сырья и применение энергоемкого оборудования, формирует комплекс воздействий, оказывающих значимое влияние на состояние здоровья персонала. В структуре производственных факторов наибольшая распространенность отмечается для показателей тяжести трудового процесса, воздействию которых подвергаются 57,2 % работников. Существенную долю составляют также акустические нагрузки: уровень производственного шума превышает гигиенические нормативы для 47,1 % персонала [38].

Наряду с этим, значимое место занимают химические воздействия и вибрационные нагрузки, совокупная доля которых достигает 23,2 %. Указанные факторы связаны с риском развития как функциональных нарушений, так и стойких профессионально обусловленных изменений. Особого внимания заслуживают аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (АПФД), являющиеся одним из ключевых факторов профессионального риска в металлургии. По статистическим оценкам, воздействию АПФД подвержены 37,4 % работников отрасли [38].

Присутствие фиброгенных аэрозолей в воздухе рабочей зоны обусловлено особенностями металлургических процессов — дроблением, транспортировкой и термической обработкой сырьевых материалов, а также операциями, сопровождающимися образованием мелкодисперсных частиц. Воздействие таких аэрозолей рассматривается как значимый фактор развития

пылевой патологии, включая хронические бронхолегочные заболевания и пневмокониозы. В этой связи контроль концентраций АПФД, совершенствование технологических и санитарно-гигиенических мероприятий, а также развитие риск-ориентированных моделей управления условиями труда представляют собой приоритетные направления в системе профилактики профессиональной заболеваемости [23, 25, 30, 37, 38, 51].

Ключевая проблема существующей системы оценки пылевой нагрузки заключается в неучёте наиболее опасных для здоровья человека компонентов производственной пыли – частиц респирабельной фракции. Эти мелкодисперсные частицы, обладающие способностью глубоко проникать в дыхательные пути и оседать в альвеолах, представляют наибольшую угрозу, провоцируя развитие профессиональных заболеваний легких, таких как пневмокониозы, хронические бронхиты и другие патологии [25, 49, 50].

Действующая методика расчета пылевой нагрузки, зачастую ориентированная на общую массу пыли без должного фракционного анализа, приводит к существенной недооценке реальных рисков. Как следствие, происходит завышение максимально допустимого стажа работы в контакте с пылью и, что особенно опасно, несвоевременное планирование и проведение необходимых лечебно-профилактических мероприятий. Это, в свою очередь, ведет к росту профессиональной заболеваемости, снижению качества жизни работников и значительным экономическим потерям для предприятий и государства [1, 7, 17, 22, 34-36, 38, 39].

Следовательно, разработка научно-обоснованных мероприятий, направленных не только на общее снижение запыленности, но и на целенаправленное уменьшение концентрации именно тонкодисперсных (респирабельных) фракций в составе пылевого аэрозоля на предприятиях горно-металлургической отрасли является важной научной задачей. Не менее важным аспектом является создание эффективных методик прогнозирования уровней содержания этих фракций и их обязательного учета при комплексной оценке условий труда и профессиональных рисков [34-36].

Согласно официальной статистике, в Российской Федерации по состоянию на конец 2023 года численность экономически активного населения в возрастной группе 15–72 лет достигла 73,532 млн человек. Списочная численность работников (без учета внешнего совместительства) в организациях, не относящихся к субъектам малого предпринимательства, по основным видам экономической деятельности составила 13 551 747 человек. Из указанного контингента в условиях, классифицируемых как вредные и (или) опасные, осуществляли трудовую деятельность 4 802 707 работников, что соответствует 35,4 %. При формировании данного показателя каждый работник учитывался однократно вне зависимости от числа действующих производственных факторов [39, 54].

Среднесписочная численность персонала (без внешних совместителей) по полному кругу организаций за 2024 год составила 43 157 526,4 человек. Распределение работников по факторам производственной среды и трудового процесса свидетельствует о следующей структуре воздействий: повышенные уровни шума, ультра- и инфразвука — 19,0 %; химические факторы — 7,5 %; вибрация (общая и локальная) — 4,8 %; биологические факторы — 0,3 %; аэрозоли преимущественно фиброгенного действия — 4,5 %; неионизирующие излучения — 1,3 %; неблагоприятные параметры микроклимата — 3,4 %; факторы световой среды — 1,4 %; тяжесть трудового процесса — 20,0 %; напряженность трудового процесса — 3,6 %. В данном случае учет осуществлялся по каждому фактору отдельно, поэтому один и тот же работник мог быть включен одновременно в несколько категорий [39].

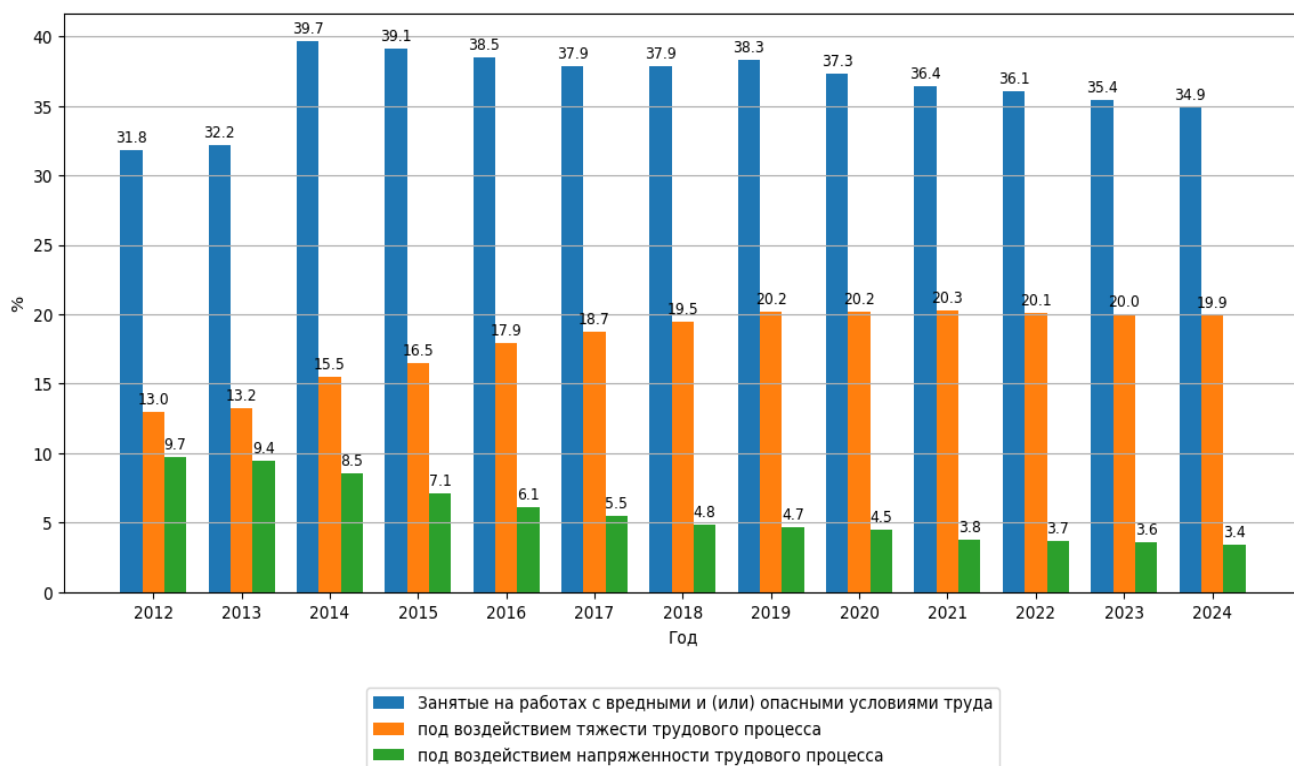


Рисунок 1.1 – Динамика удельного веса занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда (по данным Росстата)

Анализ динамики показателей за период применения специальной оценки условий труда (2014–2024 гг.) указывает на умеренное снижение доли работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях, на 4,3 процентных пункта. Одновременно отмечено значительное уменьшение удельного веса лиц, подвергающихся воздействию факторов напряженности трудового процесса — в 2,4 раза. Вместе с тем зафиксирован рост доли работников, занятых тяжелым трудом: показатель увеличился на 4,5 процентных пункта (с 15,5 % до 20,0 % среди персонала крупных и средних предприятий). В абсолютном выражении численность данной категории возросла с 1,90 млн до 2,71 млн человек (рис. 1.1) [54].

Максимальная доля работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда, характерна в секторе добычи полезных ископаемых — 53,9 %. Внутри данного вида деятельности показатели распределяются следующим образом: добыча угля — 78,9 %, добыча металлических руд — 70,9 %, добыча хризотилового асбеста — 67,1 %, добыча прочих полезных ископаемых — 59,8

%, оказание услуг в области добычи — 50,9 %. Существенный удельный вес занятых во вредных условиях отмечается также в обрабатывающих производствах (41,6 %) и в сфере водоснабжения, водоотведения, обращения с отходами и ликвидации загрязнений (37,4 %) [54].

В отдельных видах обрабатывающей промышленности доля работников, осуществляющих деятельность во вредных и (или) опасных условиях, превышает пороговое значение 50 %. К таким видам относятся: производство химических веществ и химической продукции — 50,5 %; обработка древесины и выпуск изделий из древесины и пробки (за исключением мебели), а также изделий из соломки и материалов для плетения — 51,2 %; производство кокса и нефтепродуктов — 53,6 %; выпуск автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов — 53,9 %; производство табачных изделий — 54,3 %. Наиболее высокий показатель наблюдается в металлургическом производстве, где удельный вес занятых во вредных условиях достигает 70,1 % [39, 54].

По информации Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, уровень профессиональной заболеваемости в Российской Федерации в 2024 году продемонстрировал выраженное снижение относительно 2015 года — на 46,06 %, составив 0,89 случая на 10 000 работников [54].

В структуре профессиональной патологии третью позицию занимают заболевания, ассоциированные с воздействием промышленных аэрозолей, удельный вес которых составляет 15,89 %. Более высокие доли приходятся на заболевания, обусловленные физическими факторами (49,85 %), а также на патологию, связанную с физическими перегрузками и перенапряжением (24,73 %). Совокупная доля заболеваний, вызванных прочими факторами, не превышает 10 % от общего числа зарегистрированных случаев (рис.1.2) [39].

Сравнительный анализ острых форм профессиональной патологии показывает рост их удельного веса: в 2024 году показатель в 3,4 раза превысил уровень 2015 года (1,62 % против 0,47 %). Одновременно отмечается

незначительное уменьшение доли хронических профессиональных заболеваний (отравлений): в 2024 году она составила 98,38 %, что на 1,15 процентных пункта ниже значения 2015 года (99,53 %) [39].

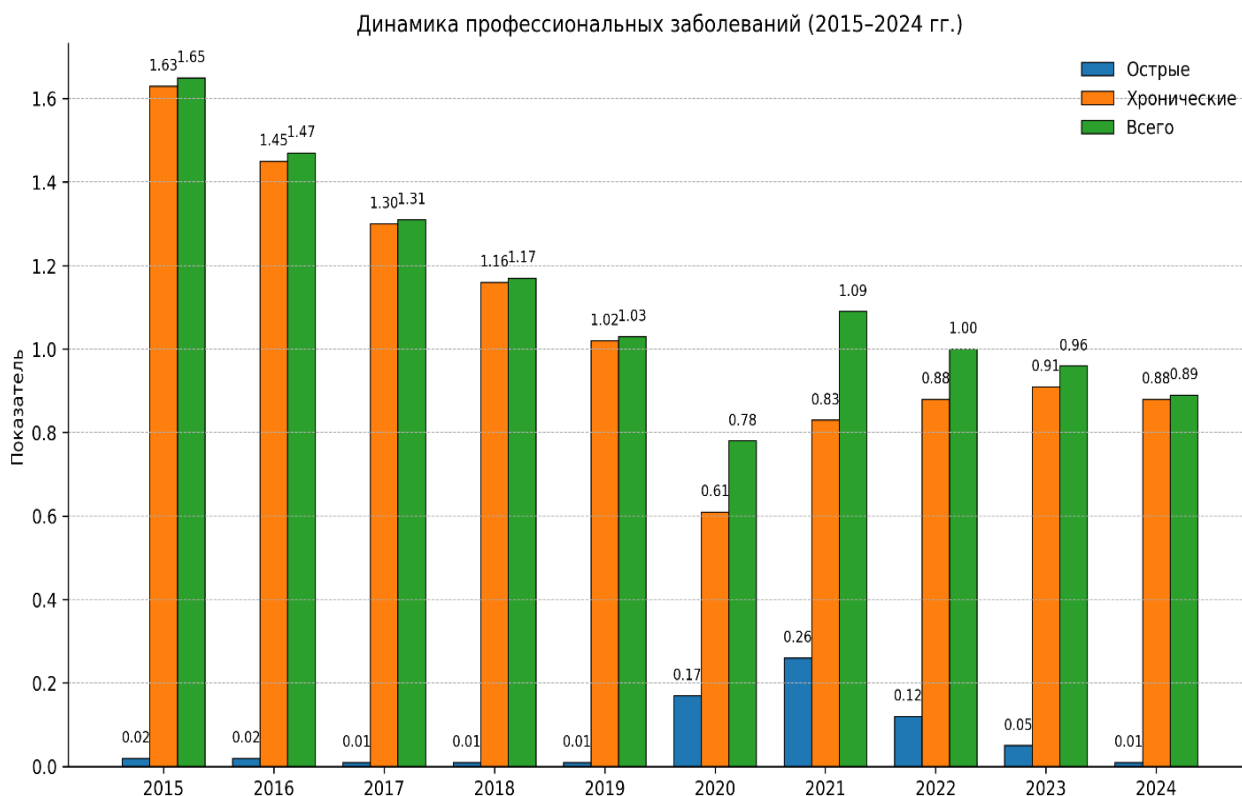


Рисунок 1.2 – Показатели профессиональной заболеваемости за период 2015–2024 гг. в случаях на 10 тыс. работающего населения

В структуре профессиональной патологии, обусловленной воздействием промышленных аэрозолей, наибольшая распространённость характерна для пневмокониозов (в том числе силикозов) и хронических пылевых бронхитов. Доля указанных форм заболеваний в общей структуре профессиональных заболеваний составляет 22,56 % и 20,24 % соответственно [39].

Отмечается также рост числа работников с множественными диагнозами профессиональной природы. По итогам 2024 года, по сравнению с уровнем 2015 года, количество лиц, у которых зарегистрировано два и более профессиональных заболевания, увеличилось на 13,46 % (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Структура с двумя и более зарегистрированными профессиональными заболеваниями за период 2015–2024 гг., %.

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Темп прироста к 2015 г., %
Доля лиц с двумя и более зарегистрированными профессиональными заболеваниями (отравлениями)	16,2	15,2	17,0	18,92	17,83	12,82	13,83	15,21	17,57	18,38	13,46

По итогам 2024 года распределение случаев профессиональной патологии по видам экономической деятельности характеризуется следующими показателями: на предприятия, осуществляющие добычу полезных ископаемых, приходится 46,22 % от общего числа зарегистрированных случаев; на организации обрабатывающих производств — 32,10 %; на сферу транспортировки и хранения — 7,70 %. Удельный вес профессиональных заболеваний среди работников сельского и лесного хозяйства, охоты, рыболовства и рыбоводства составил 4,62 %, в строительной отрасли — 3,24 %. Доля профессиональной патологии в организациях, деятельность которых связана со здравоохранением и предоставлением социальных услуг, достигла 2,92 % (рис. 1.3) [54].

Анализ представленных в таблице показателей не выявляет устойчивой направленности к уменьшению удельного веса силикозов и пылевых бронхитов. Изменение значений во времени носит неравномерный, волнообразный характер, что указывает на отсутствие стабильной положительной динамики. Подобная вариабельность статистических данных косвенно отражает нестабильность параметров пылевой нагрузки на рабочих местах [4, 39, 54].

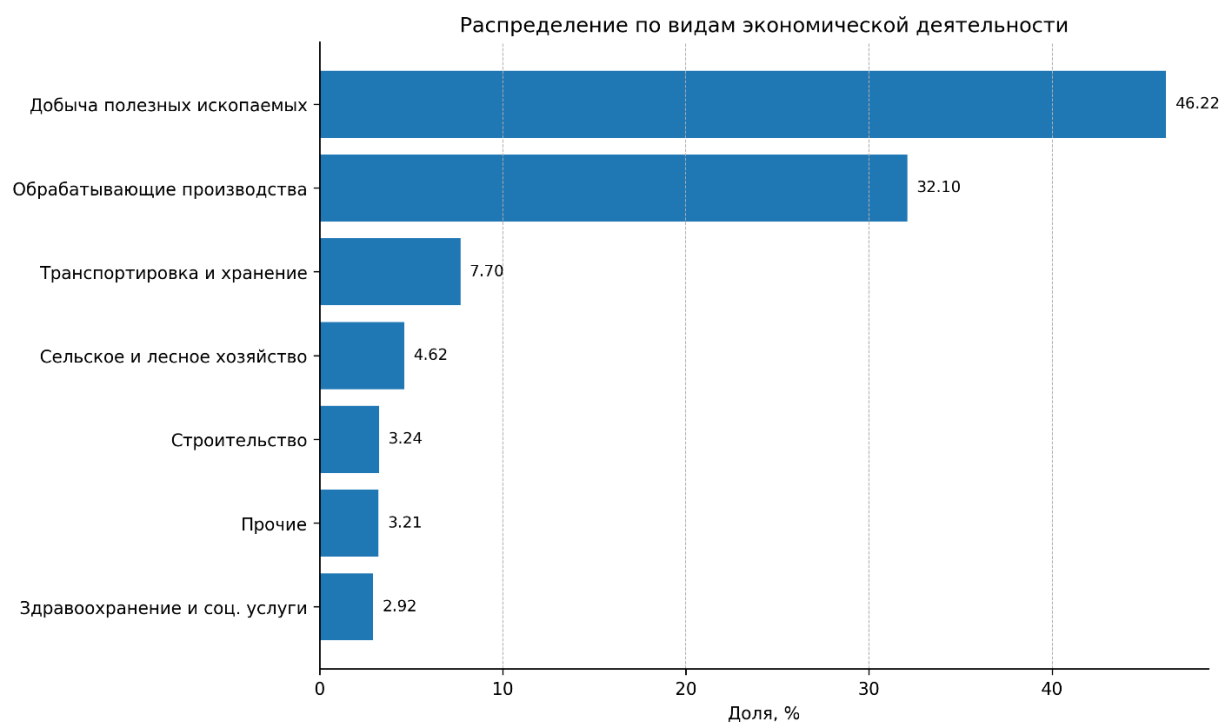


Рисунок 1.3 – Структура профессиональной заболеваемости по основным видам экономической деятельности по Российской Федерации за 2024 г., %

Наблюдаемая динамика может свидетельствовать о том, что уровни запыленности и дисперсный состав аэрозолей в производственной среде остаются переменными и зависят от комплекса факторов: технологических режимов, степени износа и эффективности пылеулавливающего оборудования, организационных особенностей производственного процесса, а также полноты реализации санитарно-гигиенических мероприятий. Отсутствие выраженного снижения доли заболеваний пылевой этиологии позволяет предположить, что принимаемые меры по нормализации условий труда либо недостаточно эффективны, либо их воздействие не обеспечивает долговременного результата [39, 54].

Полученные данные указывают на необходимость дальнейшего совершенствования систем производственного контроля, повышения надежности инженерных средств пылеподавления и более последовательного внедрения риск-ориентированных профилактических подходов, направленных на стабилизацию пылевой обстановки и снижение профессиональных рисков.

1.2 Анализ методик оценки условий труда при воздействии аэрозолей преимущественно фиброгенного действия

Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия представляют собой пылевые аэрозоли минерального и смешанного происхождения, при хроническом ингаляционном воздействии которых повышается риск развития фиброзных изменений легочной ткани и профессиональных заболеваний органов дыхания [34]. Для горно-металлургических производств данная группа факторов является одной из ведущих по распространенности и уровню экспозиции, поскольку образование пыли сопровождает буровзрывные работы, дробление, грохочение, транспортирование, перегрузку руды и концентратов, операции с огнеупорами и шихтовыми материалами, а также ряд металлургических переделов с формированием мелкодисперсных фракций [34-36].

Методики оценки условий труда при воздействии АПФД в РФ и Казахстане опираются на единый гигиенический принцип. Уровень вредности устанавливается по измеренным концентрациям аэрозоля в воздухе рабочей зоны, сопоставленным с гигиеническими нормативами, с последующей классификацией условий труда и определением объема профилактических мероприятий [51]. В последние 5 лет ключевым изменением для РФ стала замена отдельных гигиенических нормативов предельно допустимых концентраций на интегрированный документ СанПиН 1.2.3685-21, введенный в действие с 01.03.2021 постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. Это повлияло на практику ссылок на нормативы ПДК в производственном контроле и в процедуре специальной оценки условий труда [59].

В РФ оценка условий труда по пылевому фактору формируется на стыке трех контуров. Первый контур это санитарно-гигиеническое нормирование и производственный контроль концентраций. Нормативы ПДК загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны включены в СанПиН 1.2.3685-21, который объединил требования к химическим факторам производственной среды и

закрепил действующую структуру нормативов для воздуха рабочей зоны [59]. Второй контур — это классификация условий труда по степени вредности на основе гигиенических критериев Р 2.2.2006-05, где для АПФД используется оценка по среднесменным концентрациям и кратности превышения среднесменной ПДК, что обеспечивает унифицированное отнесение условий к классам 2, 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 [74, 101-102]. Третий контур — это специальная оценка условий труда, регламентированная Федеральным законом № 426-ФЗ и методикой Минтруда России, закрепленной приказом № 33н, которая задает обязательную процедуру идентификации факторов, измерений и оформления результатов для рабочих мест [72].

Ключевым достоинством Методики СОУТ и связанных с ней документов является опора на унифицированные гигиенические нормативы и классификаторы вредных факторов, что обеспечивает сопоставимость результатов для различных предприятий и цехов. Использование не только разовых и среднесменных концентраций АПФД, но и интегрального показателя годовой пылевой нагрузки ($ПН_{\text{год}}$) с сопоставлением с контрольной пылевой нагрузкой ($КПН_{\text{год}}$) позволяет учитывать как уровень запыленности, так и длительность контакта работника с аэрозолем на протяжении всего стажа [35, 36].

Для горно-металлургических производств существенным преимуществом действующей методики является возможность дифференцированной оценки условий труда в зависимости от фиброгенной активности пыли. Разделение АПФД на высоко, умеренно и слабофиброгенные аэрозоли и привязка классов условий труда к кратности превышения ПДК и контрольных пылевых нагрузок отражают различия в биологическом действии пыли на легочную ткань [34-36, 53, 72]. Это особенно актуально для горно-металлургии, где в составе пыли присутствуют как высокофиброгенные компоненты на основе кристаллического SiO_2 , так и менее фиброгенные фазы оксидов металлов и графита. Важной сильной стороной методики является учет непостоянных рабочих мест и чередования

участков с различным уровнем запыленности через введение расчетной $ПН_{1\text{год}}$, что позволяет более корректно оценивать риск у ремонтного персонала, наладчиков и работников, перемещающихся между зонами [52, 53].

В то же время применение существующей методики в условиях горно-металлургических производств сталкивается с рядом практических и концептуальных ограничений, обусловленных как высокой вариабельностью источников пыли, так и многостадийностью технологических цепочек от добычи до металлургических переделов. Во-первых, методика преимущественно ориентирована на стационарные или квазистационарные условия формирования аэрозоля, тогда как для горно-металлургии типичен импульсный характер запыленности с резкими кратковременными пиками при выполнении отдельных технологических операций. На горных работах такие пики возникают при бурении и продувке шпуров и скважин, буровзрывных работах и последующей зачистке, погрузочно-транспортных операциях, перегрузке и пересыпке руды, дроблении, грохочении и сухой классификации, работе конвейерных узлов, выгрузке и формировании штабелей, а также при обслуживании аспирационных установок и обращении с пылеулавливаемыми продуктами [53, 59]. На обогатительных фабриках и в металлургических цехах пиковые показатели запыленности формируются при вагонопрокидывании, подготовке и дозировании шихты, работе участков сухого помола и смешения, загрузке агрегатов, выпуске металла и шлака, продувке конвертеров и ковшей, разливке, зачистке и ремонте футеровки, вскрытии и обслуживании газоходов, очистке рукавных фильтров и электрофильтров, а также при обращении сухих вторичных материалов и шламов после сушки [59, 66]. При таких режимах одноразовые измерения в заранее выбранные «типичные» смены и при фиксированном числе точек отбора воздуха не способны фиксировать экстремальные уровни воздействия, особенно если отбор проб не синхронизирован с наиболее пылеопасными операциями и не учитывает фактическое распределение времени работника между зонами с различной интенсивностью пылевыделения. Это приводит к вероятной недооценке

экспозиции и снижает корректность последующего ранжирования рабочих мест по степени вредности [59, 66].

Во-вторых, традиционная гравиметрическая оценка концентрации АПФД, основанная на массовой концентрации, не в полной мере отражает вклад тонкодисперсных фракций, включая ультрадисперсную и частично нанодисперсную составляющую, которая формируется в ряде горно-металлургических технологий и может обладать повышенной биологической активностью при сопоставимой или меньшей массе [59].

На металлургических переделах существенный вклад таких фракций связан с высокотемпературными процессами, испарением и последующей конденсацией компонентов расплава, образованием дымов при выпуске металла и шлака, при продувке и окислительных режимах, а также с процессами термического разрушения и истирания огнеупорных материалов. На участках дробления и сухого измельчения в горной и обогатительной части цепочки мелкодисперсная фракция формируется за счет интенсивного механического разрушения минералов и вторичного пылеобразования при пересыпках и пневмотранспорте [37, 66].

В результате показатель мг/м^3 может недостаточно характеризовать аэрозольный фактор в ситуациях, где решающее значение имеют не столько масса, сколько численная концентрация, площадь поверхности частиц и распределение по респираторной фракции, а также различия по химико-минералогическому составу, включая содержание свободного диоксида кремния и смешанных пылей. Это создает смысловой разрыв между формально измеренной массовой концентрацией и потенциальной опасностью воздействия в типичных для горно-металлургии пылегазовых средах, где источники аэрозоля многокомпонентны и быстро меняются во времени [57, 61, 62]. В результате при доминировании тонкодисперсных фракций (PM10 и PM2.5) возможно недооценивание реального риска развития пневмокониозов и сопутствующей кардиореспираторной патологии.

Отдельного внимания заслуживает вопрос репрезентативности проб и выбора стратегии измерений для горно-металлургических цехов, особенно в зоне вагоноопрокидывателя. Фиксация отбора проб на высоте 1,5 м в «дыхательной зоне» рабочего соответствует гигиеническим стандартам, однако при высокой турбулентности воздушных потоков и локальных источниках пыли пространственное распределение концентраций может быть крайне неоднородным [37, 68]. Это особенно выражено в зонах разгрузки сырья, у горновых проемов и на участках дробления. При использовании преимущественно стационарных постов отбора воздуха возникает риск получения заниженных оценок экспозиции по сравнению с личным дозиметрическим контролем, основанным на ношении индивидуальных аспираторов в течение смены. Соответственно, для горно-металлургии целесообразно сочетать стационарные измерения, необходимые для СОУТ, с персональным мониторингом пылевой нагрузки у работников наиболее пылеопасных профессий [24, 26, 27, 71, 72].

С методологической точки зрения действующая система нормирования ПДК для АПФД и производных показателей пылевой нагрузки ориентирована преимущественно на органы дыхания и развитие пневмокониозов, тогда как современные эпидемиологические данные указывают на существенный вклад респираторной пыли в формирование сердечно-сосудистых заболеваний и онкопатологии [2, 29]. При этом в рамках СОУТ влияние тонкодисперсных фракций PM_{2.5} и PM₁₀ зачастую рассматривается только косвенно, через общую массу пыли, без обязательного выделения этих фракций и оценки их специфического вклада в риск. Для горно-металлургических производств, где в воздухе могут присутствовать сложные многофазные смеси оксидов металлов, сульфатов, сажи и других компонентов, такое упрощение ограничивает возможность комплексной оценки риска для здоровья.

Еще одним ограничением методики является фрагментарный учет сочетанного действия пыли и других вредных факторов производственной среды, характерных для горно-металлургии. В реальных условиях

запыленность воздуха сочетается с воздействием высоких температур, оксидов азота, оксида углерода и сернистых соединений, а также повышенной физической нагрузкой [80-82]. При этом каждая из этих компонент усиливает негативное влияние АПФД на органы дыхания и сердечно-сосудистую систему, однако в рамках стандартной процедуры СОУТ оценка проводится по отдельным факторам, а интегральный риск часто остается недооцененным. Это требует расширения подходов к оценке профессионального риска за счет использования комбинированных индексов и математического моделирования многокомпонентных воздействий.

С учетом указанных особенностей для горно-металлургических производств оптимальным представляется комбинированный подход к оценке условий труда при воздействии АПФД. Базовая методика СОУТ с расчетом $ПН_{1год}$ и $КПН_{1год}$ должна дополняться целенаправленным контролем респираторной фракции пыли, выделением фракций PM_{10} и $PM_{2.5}$, а также применением современных приборов непрерывного мониторинга концентрации взвешенных частиц [3, 13, 52, 53]. Целесообразно шире использовать индивидуальные пыледозиметры для работников наиболее пылеопасных профессий, а для зон вагоноопрокидывателей с выраженной нестационарностью запыленности — применять специализированные схемы отбора проб, привязанные к наиболее критическим технологическим операциям.

В рамках анализа профессионального риска результаты оценки пылевой нагрузки должны рассматриваться совместно с данными по сопутствующим газовым выбросам и тепловой нагрузке, что позволит более полно обосновывать мероприятия по снижению риска развития профессиональных заболеваний органов дыхания и сердечно-сосудистой патологии у работников горно-металлургических предприятий [2, 3, 13].

Базовыми нормативными и методическими актами, определяющими гигиенические нормативы предельно допустимых концентраций аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), а также требования к

организации и проведению контроля их содержания в воздухе рабочей зоны, выступают действующие санитарные правила, гигиенические нормативы и утверждённые методики измерений, являются [48, 53]:

а) Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»» (зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296);

б) Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 13.02.2018 № 25, утвердившее гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» (взамен ГН 2.2.5.1313-03), действующие до 10.02.2028 г.;

в) ГОСТ Р 54578-2011 «Воздух рабочей зоны. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия. Общие принципы гигиенического контроля и оценки воздействия», устанавливающий подходы к гигиеническому нормированию и оценке риска при воздействии АПФД;

г) Методические указания по методам контроля МУК 4.1.4155-25 «Методика измерения массовой концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия в воздухе рабочей зоны гравиметрическим методом» (введены взамен МУК 4.1.2468-09 «Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности»), регламентирующие порядок отбора проб и гравиметрического определения массовой концентрации АПФД;

д) методика измерений МИ АПФД-18.01-2018, устанавливающая порядок применения гравиметрического метода для определения массовой концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия в воздухе рабочей зоны.

Методика оценки условий труда по аэрозольному фактору включает оценку условий труда, состоящую из следующих этапов [34-36]:

1. Идентификация рабочих мест и вредного фактора. Выделение рабочих мест и профессий, на которых имеется контакт с аэрозолями преимущественно фиброгенного действия (АПФД); описание технологических операций, источников пыли, режимов работы оборудования и продолжительности воздействия.

2. Планирование измерений и выбор репрезентативных условий. Определение смен, участков и периодов с максимально ожидаемой запылённостью, выбор числа точек отбора проб и работников-«носителей» для индивидуального контроля, с учётом непостоянных рабочих мест и перемещений персонала.

3. Отбор проб воздуха в зоне дыхания работающих. Проведение отбора проб воздуха на высоте дыхательной зоны работника (ориентировочно 1,5 м от пола) в период выполнения наиболее пылеобразующих операций (загрузка/разгрузка шихты, дробление, плавка, выгрузка шлака и др.) с использованием аспирационных и/или персональных пробоотборников.

4. Лабораторное определение массовой концентрации АПФД и состава пыли. Гравиметрическое определение массовой концентрации аэрозоля на фильтрах, расчет C ($\text{мг}/\text{м}^3$), а также определение химического и фазового состава пыли, в том числе содержания свободного диоксида кремния и доли респирабельной фракции.

5. Расчет среднесменных и разовых концентраций, выделение респирабельной фракции. Определение максимально-разовых, среднесменных и, при необходимости, среднесуточных концентраций АПФД, оценка фракций $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ и их вклада в общую экспозицию.

6. Сопоставление полученных значений с гигиеническими нормативами. Сравнение фактических концентраций аэрозоля и его компонент с действующими ПДК для аэрозолей фиброгенного действия, определение степени превышения нормативов и предварительная оценка класса условий труда по запыленности.

7. Расчет пылевой нагрузки и установление класса условий труда. Расчет годовой пылевой нагрузки ($ПН_{1год}$) и контрольной пылевой нагрузки ($КПН_{1год}$) с учётом фактической среднесменной концентрации, числа смен в году и объёма вентилируемого воздуха через лёгкие работника; определение класса условий труда по кратности превышения $КПН_{1год}$ и степени фиброгенности аэрозоля.

8. Интерпретация результатов и формирование предложений по снижению риска.

Окончательное отнесение рабочих мест к соответствующим классам условий труда, формирование перечня мероприятий по снижению запыленности и пылевой нагрузки (технические, санитарно-гигиенические, СИЗ, «защита временем», ограничение допустимого стажа работы в данных условиях). Оценка степени отклонения условий труда производится по Классификатору вредных и (или) опасных производственных факторов согласно приказу Минтруда России от 31.12.2020 № 988н [68].

Расчет средней и максимальной концентрации аэрозоля. При применении пылеотборников концентрация пыли в воздухе по результатам измерения массы пыли на одном фильтре рассчитывается по формуле [57]:

$$C_0 = (m_1 - m_0) / V_n \cdot 1000; \text{ мг/м}^3 \quad (1.1)$$

где C_0 - концентрация всей витающей в воздухе пыли, мг/м^3 ; m_0 - масса фильтра до отбора пробы пыли, мг; m_1 - масса фильтра после отбора пробы, мг; V_n - объём воздуха, прошедшего через фильтр и приведенный к нормальным условиям, дм^3 .

Если определено, что пыль содержит более 70% свободного диоксида кремния, то применяется ПДК:

- 0,05 мг/м^3 для SiO_2 .

Учет аэродинамического диаметра: особую опасность представляют тонкодисперсные фракции (PM10 и меньше), способные проникать глубоко в альвеолы. Поэтому современные методики дополнительно предусматривают:

- определение аэродинамического диаметра частиц (например, метод лазерной дифракции);
- выделение респираторной фракции и ее отдельную оценку [34-36].

Классификация условий труда по уровню запыленности представлена в табл. 1.3.

Таблица 1.3 - Классификация условий труда по уровню запыленности

Класс	Уровень условий труда	Критерий по концентрации пыли (отн. к ПДК)
1	Оптимальные	Не превышает ПДК
2	Допустимые	Не превышает ПДК
3.1	Вредные (1 степени)	$1 < C/ПДК \leq 3$
3.2	Вредные (2 степени)	$3 < C/ПДК \leq 5$
3.3	Вредные (3 степени)	$5 < C/ПДК \leq 10$
3.4	Вредные (4 степени)	$C/ПДК > 10$

Особенности оценки условий труда в металлургии. На металлургических предприятиях основными источниками АПФД являются:

- шихтовые операции (разгрузка агломерата, окатышей, угля);
- обжиг и плавка в доменных печах;
- дробление и просеивание сырья;
- выгрузка золы и шлака.

Наблюдается преимущественно дисперсный состав пыли с фракциями менее 10 мкм, что делает её особенно опасной для альвеол лёгких. В связи с этим особое внимание уделяется не только концентрации, но и аэродинамическому диаметру частиц.

Классификация условий труда при воздействии аэрозолей преимущественно фиброгенного действия на непостоянных рабочих местах осуществляется на основании показателя кратности превышения расчетного значения годовой пылевой нагрузки (ПН_{1год}) относительно установленной контрольной пылевой нагрузки (КПН_{1год}). Под пылевой нагрузкой понимается суммарная масса пылевых частиц, поступивших в органы дыхания работника за анализируемый временной интервал. Данный показатель отражает совокупное воздействие пылевого фактора и количественно

характеризует массу пыли, поступившей в органы дыхания работника в процессе трудовой деятельности. Расчет пылевой нагрузки выполняется с использованием соответствующего выражения [34-36]:

$$ПН_{1год} = K_{cc} \cdot N \cdot Q, \text{ мг}, \quad (1.2)$$

где K_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, $\text{мг}/\text{м}^3$; N – число рабочих смен, отработанных в календарном году в условиях воздействия АПФД; Q – объем воздуха, проходящего через легкие работника в течение смены, м^3 , который зависит от категории тяжести работ.

Определение контрольной пылевой нагрузки осуществляется по той же расчетной зависимости, однако в качестве исходного параметра используется не фактическая среднесменная концентрация пыли, а установленное значение предельно допустимой концентрации (ПДК_{cc}):

$$КПН_{1год} = ПДК_{cc} \cdot N \cdot Q, \text{ мг} \quad (1.3)$$

Классификация условий труда по кратности превышения контрольных пылевых нагрузок в соответствии с методикой проведения СОУТ приведена в таблице 1.4 [34-36].

Таблица 1.4 – Определение класса условий труда при воздействии АПФД

Тип АПФД	Класс условий труда, определяемый из соотношения $K_{cc} / ПДК_{cc} = (ПН_{1год} / КПН_{1год})$				
	допустимый	вредный			
		2	3.1	3.2	3.3
Аэрозоли высоко- и умеренно фиброгенного действия	$K_{cc} \leq ПДК$ $ПН \leq КПН_{1год}$	> 1-2	> 2-4	> 4-10	> 10
Слабофиброгенные АПФД	$K_{cc} \leq ПДК$ $ПН \leq КПН_{1год}$	> 1-3	> 3-6	> 6-10	> 10

При превышении установленных контрольных значений пылевой нагрузки целесообразно применение подхода «защиты временем». Данный метод основан на определении допустимой продолжительности трудовой деятельности (T_1) в заданных условиях с использованием контрольной пылевой нагрузки, рассчитанной для нормативного 25-летнего периода работы:

$$T^1 = \frac{КПН^{25}}{(K_{cc} \cdot N \cdot Q)}, \text{ лет}, \quad (1.4)$$

В международной практике наряду с оценкой максимально-разовых, среднесуточных и среднегодовых концентраций пылевых аэрозолей широко применяется измерение и нормирование содержания тонкодисперсных частиц респираторной фракции. В рамках такого контроля анализируется присутствие взвешенных частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм (PM10) и менее 2,5 мкм (PM2.5). Термин «PM» (Particulate Matter) используется для обозначения взвешенных твердых частиц [34]. Частицы указанных размерных диапазонов характеризуются высокой устойчивостью во взвешенном состоянии и способностью длительное время сохраняться в воздушной среде, что увеличивает продолжительность их воздействия на органы дыхания. Вследствие малых размеров они способны достигать глубоких отделов респираторного тракта, включая альвеолярные структуры легких, где могут вызывать повреждение клеточных элементов и функциональные нарушения дыхательной системы.

Помимо локального воздействия на ткани легких, мелкодисперсные частицы представляют потенциальную опасность для системных физиологических процессов. Проникая через альвеолярно-капиллярный барьер, они могут оказывать влияние на состояние кровеносной системы, способствуя развитию неблагоприятных сосудистых и гемодинамических изменений. Длительное и регулярное воздействие таких аэрозолей рассматривается как фактор риска развития сердечно-сосудистых нарушений. Кроме того, хроническое воздействие тонкодисперсных пылевых фракций различного химического состава увеличивает вероятность формирования тяжелых патологий органов дыхания, включая злокачественные новообразования легочной ткани [67].

В пресс-релизе IARC № 359 показано, что в 2022 г. в мире было зарегистрировано 194 864 случая аденокарциномы лёгкого, которые были вызваны воздействием атмосферных взвешенных частиц (ambient particulate matter, прежде всего PM2.5). Это примерно «порядка 200 тыс. случаев» в год [94, 95].

Согласно современным международным оценкам, выполненным Всемирной организацией здравоохранения и аналитическими структурами проекта State of Global Air, воздействие загрязнённого атмосферного воздуха в 2021 году рассматривалось как один из значимых глобальных факторов риска смертности. Основной вклад в формирование неблагоприятных последствий для здоровья связывается с присутствием в воздухе тонкодисперсных взвешенных частиц с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм (PM2.5). По расчётным данным, совокупное влияние данного фактора ассоциировано примерно с 8,1 млн случаев преждевременной смерти, что соответствует более чем одной восьмой части мировой смертности [94, 95].

Структурный анализ причин указывает, что подавляющая доля указанного бремени — порядка 90 % — обусловлена неинфекционными заболеваниями. Ведущее место среди них занимают патологии сердечно-сосудистой и респираторной систем, включая ишемическую болезнь сердца, острые нарушения мозгового кровообращения, хроническую обструктивную болезнь лёгких, а также злокачественные новообразования лёгочной ткани. Подобное распределение подчёркивает системный характер воздействия мелкодисперсных аэрозолей, выходящий за рамки исключительно бронхолёгочных эффектов [94, 95].

Особое значение в оценке медико-демографических последствий придаётся сердечно-сосудистой патологии. По имеющимся эпидемиологическим данным, не менее половины летальных исходов, статистически связанных с воздействием PM2.5, обусловлено именно нарушениями деятельности сердечно-сосудистой системы. Более того, при анализе смертности, связанной исключительно с наружным загрязнением воздуха, доля сердечно-сосудистых причин достигает приблизительно 70 %, причём наибольший вклад формируют ишемическая болезнь сердца и инсульт [94, 95]. Выявленные закономерности свидетельствуют о высокой гигиенической и социальной значимости контроля концентраций тонкодисперсных частиц в атмосферном воздухе. Учитывая способность

частиц PM_{2.5} проникать в глубокие отделы дыхательной системы и оказывать влияние на системные физиологические процессы, снижение уровней аэрозольного загрязнения рассматривается как одно из приоритетных направлений профилактики хронических неинфекционных заболеваний и уменьшения преждевременной смертности населения [94, 95].

Современные многоцентровые исследования временных рядов и мета-анализы (2020–2024 гг.) показывают, что кратковременное увеличение среднесуточной концентрации респираторной пыли PM₁₀ на 0,01 мг/м³ (10 мкг/м³) сопровождается ростом общей смертности примерно на 0,4–0,6 %, тогда как для более мелкой фракции PM_{2.5} аналогичное увеличение связано с ростом общей смертности на 0,6–0,8 %. При длительном (многолетнем) воздействии увеличение среднегодовой концентрации PM_{2.5} на 10 мкг/м³ вызывает рост риска общей смертности в среднем на ~11 %, а смертности от сердечно-сосудистых заболеваний – на ~13 %, что подтверждено недавними систематическими обзорами и метаанализами когортных исследований [94, 95].

1.3 Основные способы борьбы с пылью при погрузочно-разгрузочных работах с углем, коксом и угольной шихтой, как источников пылеобразования

Проблема пылеобразования на горно-металлургических предприятиях остается одной из ключевых в сфере охраны труда, особенно в операциях, связанных с разгрузкой сыпучих материалов (уголь и др.) при помощи вагоноопрокидывателей. Согласно данным Роспотребнадзора, доля профессиональных заболеваний, вызванных воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия, в металлургии стабильно высока и напрямую коррелирует с уровнем запыленности рабочих зон [11-13].

Учитывая опасность мелкодисперсных фракций пыли (менее 10 мкм), которые способны достигать альвеолярной зоны легких и вызывать фиброзные изменения, борьба с запыленностью рабочих мест — приоритетное направление современной производственной гигиены и профилактики

профессиональной патологии [68].

Основными направлениями борьбы с пылью являются [66, 74-78]:

1.1. *Организационно-технические меры* (механизация и автоматизация разгрузочных операций). На вагоноопрокидывателях значительное количество пыли образуется в момент резкого опрокидывания и высыпания материала. Применение автоматизированных систем управления и дистанционного управления позволяют: исключить нахождение оператора в зоне непосредственного пылеобразования; оптимизировать режимы разгрузки, уменьшая интенсивность падения груза (пылеобразование); использовать технологии медленного опрокидывания или послойной выгрузки, что значительно снижает аэрозольный выброс.

1.2. *Герметизация и изоляция технологических участков*: ограждение зон разгрузки и транспортировки материалами с пылеизолирующими свойствами (тенты, металлические кожухи, ПВХ-шторы и др.) позволяет снизить выброс пыли в окружающую рабочую зону до 60–80%.

1.3. *Разделение пылеобразующих и чистых зон*: проектная изоляция пыльных участков от мест постоянного присутствия работников (операторных, коридоров, складов) с применением шлюзов, зональных вентилялей, межцеховых перегородок.

1.4. *Инженерные способы обеспыливания*: аспирационные и вентиляционные системы. На вагоноопрокидывателях используются:

- локальные отсосы пыли от точки выгрузки (присосные патрубки, вытяжные короба);
- системы общезаводской вытяжной вентиляции с многоступенчатой фильтрацией;
- циклонные, рукавные и электрофильтры для улавливания тонкодисперсных фракций.

1.5. *Системы орошения и пылеподавления*: применение тонкораспыленного водяного или пенообразующего облака в зонах разгрузки

позволяет эффективно осаждать взвешенные частицы. В металлургии применяются:

- форсуночные рамки с автоматическим управлением;
- комбинированные системы с смачивателями (ПАВ) ;
- гравитационные орошения стен и днищ приёмных бункеров.

Формула расчета эффективности орошения [34-36]:

$$\eta = (C_{до} - C_{посл}) / C_{до} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

где $C_{до}$ — концентрация пыли до орошения, мг/м³; $C_{посл}$ — после орошения, мг/м³.

При правильно подобранных параметрах орошения коэффициент эффективности может достигать 70–85% .

1.6. Средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД): СИЗОД применяется как вспомогательная мера в условиях, когда невозможно обеспечить нормативное содержание пыли. В металлургической отрасли используются: [66]

- полумаски фильтрующие класса FFP2/FFP3 (ГОСТ Р 12.4.294-2015);
- респираторы с принудительной подачей воздуха;
- самоспасатели и фильтрующие шлемы на участках аварийных разгрузок.

Применение смачивателей — часть комплексного подхода к снижению пылеобразования на горно-металлургических предприятиях [3, 12, 21, 26, 42-44, 63, 64, 69, 86]. Один из эффективных методов борьбы с пылью на горно-металлургических предприятиях — использование смачивателей (или агентов увлажнения). Смачиватели помогают поддерживать влажность вокруг материалов и поверхностей, тем самым уменьшая вероятность образования и поднимания пыли.

Существенный вклад в развитие теоретических и прикладных направлений, связанных с нормализацией пылевой обстановки на предприятиях горно-металлургического комплекса, внесён отечественными и

зарубежными исследователями. Работы указанных авторов охватывают широкий спектр вопросов, включая процессы образования и распространения пылевых аэрозолей, анализ их дисперсного состава, вопросы гигиенического нормирования, а также разработку и совершенствование инженерно-технических решений в области пылеподавления и пылеулавливания.

Значимые результаты в области изучения пылевых факторов производственной среды, механизмов воздействия промышленных аэрозолей на организм работников и разработки профилактических мероприятий получены в работах И.Д. Балона, В.Н. Воронина, В.П. Журавлева, Г.С. Забурдяева, Е.И. Кабанова, Г.И. Коршунова, А.В. Корнева, Б.Ф. Кирина, В.В. Кудряшова, А.С. Кобылкина, А.Е. Лапшина, В.И. Ляшенко, Л.Я. Лихачева, М.И. Нецепляева, Г.А. Позднякова, С.Б. Романченко, В.А. Родионова, О.В. Скопинцевой, Б.В. Старка, А.В. Трубицына, А.Э. Филина и других исследователей. Их научные труды способствовали формированию современных представлений о процессах пылеобразования, критериях оценки пылевой нагрузки и принципах управления профессиональными рисками [19, 55-57, 65, 70, 83-85].

В зарубежной научной литературе значительное внимание проблемам промышленной пыли, методам контроля аэрозольных концентраций и технологиям снижения запыленности уделено в работах W. Courtney, L. Mandell, R. Salaman, J. Colinet, J.M. Listak, X. Chen, Y. Zhang, Q. Wang и других авторов. Представленные исследования расширили понимание физических и аэродинамических характеристик мелкодисперсных частиц, а также эффективности различных технологических и вентиляционных решений [88-93].

В работах И.Г. Ищука, Б.Ф. Кирина, Г.А. Позднякова [47] рассматриваются вопросы повышения эффективности гидрообеспыливания, включая влияние на нее параметров орошения, связанных в том числе с конструктивными особенностями форсунок. Проанализированы различные способы обеспыливания, и даны рекомендации по их применению для обеспечения максимальной эффективности.

В работах О.В. Скопинцевой, А.Ю. Прокоповича, Д.И. Савельева [60-65] детально рассмотрены факторы, влияющие на эффективность предварительного увлажнения массива и снижение пылеобразования.

Вопрос совершенствования пылевой обстановки в горно-металлургической отрасли имеет устойчивую научную базу, сформированную как отечественными, так и зарубежными исследователями. В российской школе медицины труда фундаментальные подходы к оценке и профилактике пылевых заболеваний органов дыхания были заложены в работах Н. Ф. Измерова и соавт., включая руководство «Профессиональные заболевания», где обоснована роль пылевого фактора в развитии пневмокониозов и предложены ключевые принципы санитарного нормирования и профилактики [70].

Значительный вклад в анализ и управление пылевыми рисками внесла серия работ А. Г. Чеботарёва и соавт. Комплексная оценка условий труда и профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий показала высокую распространённость контакта с АПФД, частое превышение ПДК и продемонстрировала эффективность риск-ориентированного подхода, включающего инженерные мероприятия по обеспыливанию, оптимизацию общешахтной и местной вентиляции, герметизацию перегрузочных узлов и совершенствование системы медико-профилактического сопровождения [80-82]. Отдельное исследование этой же группы по физико-химическим свойствам рудничного аэрозоля в шахтах с самоходной дизельной техникой показало комбинированное действие пыли и газообразных токсикантов и привело к рекомендациям по одновременному контролю пылевого и химического факторов [63].

С медико-гигиенической стороны ключевыми являются работы коллектива Северо-Западного НЦ гигиены и общественного здоровья (И. О. Мясников, А. Н. Кизеев и др.), в которых обобщены данные о рисках развития профессиональных и производственно-обусловленных заболеваний у работников горно-металлургических предприятий Арктической зоны РФ,

показана ведущая роль аэрозолей преимущественно фиброгенного действия и обоснована необходимость риск-ориентированного подхода к проектированию профилактических мероприятий [37]. Существенный вклад внесли А. Г. Чеботарёв и соавт., выполнившие комплексную оценку условий труда и профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий, а также проанализировавшие пылевой фактор как ключевой фвктор патологии органов дыхания у горняков [110]. В ряде работ С. А. Сюриной, В. П. Чащина и коллег на материалах северных горно-металлургических территорий показано сочетанное действие запылённости, загазованности и климатических стрессоров, что стало основанием для комплексных программ по снижению пылевой нагрузки и профессиональной патологии [67, 79].

Для коксохимических производств значимыми являются исследования Ю. Г. Бурмака, в диссертационной работе которого раскрыты механизмы развития заболеваний внутренних органов у рабочих коксохимических цехов и предложена система профилактики, включающая снижение запылённости и оптимизацию условий труда [47].

В публикациях отечественных и зарубежных исследователей [69, 83, 89] описаны и проанализированы различные технологические и организационные подходы к снижению запыленности, применяемые на предприятиях горно-металлургического профиля в США. Рассматриваемые решения включают методы локализации пылеобразования, использование систем орошения, вентиляционные мероприятия и другие инженерные средства, направленные на уменьшение концентрации пылевых аэрозолей в воздухе рабочей зоны. Указанные методы ранее были детально изучены и получили широкое освещение в научной литературе [15].

В исследованиях китайских авторов (X. Chen, Y. Zhang, H. Hu, Y. Xu, G. Yang и др.) [91-94] в качестве одного из перспективных направлений повышения эффективности пылеподавления выделяется применение пенных технологий и смачивающих растворов различного химического состава.

Особое внимание уделяется подбору рецептур и концентраций смачивающих добавок с учетом специфики взаимодействия с угольной пылью, обладающей сложными физико-химическими характеристиками. Подчеркивается, что эффективность подавления пыли во многом определяется не только типом используемого реагента, но и его дозировкой, поверхностной активностью, а также способностью изменять свойства межфазного взаимодействия «жидкость–твердое тело» [26].

В ряде научных работ [135-140], выполненных Qingguo Wang, Deming Wang, Hetang Wang, Chaohang Xu, представлены результаты экспериментального и теоретического анализа свойств различных поверхностно-активных веществ. Исследования ориентированы на оценку пенообразующих и смачивающих характеристик реагентов, влияющих на интенсивность увлажнения угольной пыли и скорость ее осаждения из воздушной среды. Авторы отмечают, что корректный выбор ПАВ позволяет существенно повысить эффективность процессов пылеподавления за счет улучшения смачивания частиц, увеличения стабильности пены и интенсификации агломерации мелкодисперсных фракций.

Мировой опыт демонстрирует высокую эффективность автоматизированных систем, адаптированных под характеристики пыли и погодные условия, что позволяет не только обеспечить безопасность труда, но и повысить производственную культуру и устойчивость производства.

На горно-металлургических предприятиях во всем мире ведётся активная работа по снижению уровня запыленности, поскольку производственные аэрозоли, особенно фракции размером менее 10 мкм, представляют серьёзную опасность для здоровья работников [96, 97]. Международная практика показывает, что устойчивый контроль запыленности возможен только при комплексном подходе, сочетающем инженерные, организационные и технологические меры.

В странах Западной Европы, таких как Германия, Франция и Бельгия, горно-металлургические комбинаты внедряют системы аспирации с

многоступенчатой очисткой воздуха, включая фильтры тонкой очистки HEPA-класса. Технологические участки разгрузки материалов оснащаются пылеизолирующими кожухами, а для предотвращения распространения пыли по цеху используются автоматические шторы и барьеры. Воздух в рабочих зонах контролируется с помощью стационарных датчиков концентрации пыли фракций PM10 и PM2.5 в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать на превышения гигиенических нормативов. Например, на заводах компании ArcelorMittal была внедрена автоматизированная система регулирования пылеподавления, учитывающая погодные условия и интенсивность разгрузки, что позволило снизить концентрацию пыли в зоне вагоноопрокидывателей до менее чем 0,3 мг/м³ [85-87, 96, 97].

На предприятиях горнодобывающего и металлургического профиля в США и Канаде значительное распространение получили технические решения, ориентированные на локализацию и удаление пылевых выбросов непосредственно в зонах их образования. В производственной практике активно применяются системы сухого пылеулавливания, а также аппараты инерционного и электростатического действия, обеспечивающие эффективное извлечение взвешенных частиц из воздушных потоков. Для условий открытых технологических площадок и складских территорий используются передвижные и мобильные установки пылеподавления, предназначенные для снижения вторичного пылеобразования и стабилизации санитарно-гигиенических параметров воздушной среды.

Важным элементом производственной политики в области охраны труда является следование концепции ALARA (As Low As Reasonably Achievable), предполагающей поддержание уровней воздействия вредных факторов на минимально достижимом уровне с учетом технической и экономической обоснованности. Реализация данного принципа находит отражение в инженерном проектировании рабочих мест, выборе технологического оборудования, оптимизации режимов работы и разработке организационных

мероприятий. Приоритет отдается мерам, направленным на предупреждение формирования неблагоприятных факторов производственной среды и ограничение их влияния на работников, что способствует снижению профессиональных рисков и повышению уровня промышленной безопасности. В Канаде, на предприятии Algoma Steel, была успешно внедрена система автоматического распыления тумана высокого давления, позволяющая снизить содержание частиц PM10 на 70 % уже в первый год эксплуатации [91, 97].

Горно-металлургические предприятия Азии (Китай, Южная Корея, Япония) делают акцент на цифровизации мониторинга и автоматизации мероприятий по борьбе с пылью. Интеграция смарт-датчиков, подключённых к облачным платформам, позволяет отслеживать уровни загрязнения и управлять оросительными установками в режиме реального времени. На предприятиях группы POSCO в Южной Корее реализованы системы пылеподавления, адаптирующие режим работы в зависимости от скорости ветра и температуры воздуха. Это позволяет поддерживать запылённость воздуха в зоне разгрузки угля на уровне 0,1–0,2 мг/м³ при высокой интенсивности производственного процесса [92, 96].

В странах Латинской Америки и Австралии, таких как Бразилия, Мексика и Австралия, применяются как традиционные инженерные методы, так и инновационные экологические решения. Распространена практика использования биоразлагаемых стабилизаторов грунта и полимерных покрытий, снижающих пылеобразование при складировании сыпучих материалов. Одним из примеров является горно-металлургический комбинат Ternium в Мексике, где реализована комбинированная система аспирации и орошения на участке вагоноопрокидывания. Это позволило сократить количество случаев профессиональных заболеваний органов дыхания на 45 %, а также обеспечить возврат инвестиций менее чем за три года.

Обобщая международный опыт, можно отметить устойчивую тенденцию к использованию многоуровневых и интегрированных решений: совмещение аспирации, пылеподавления, герметизации, цифрового мониторинга и

автоматизации технологических процессов. Такие подходы позволяют не только обеспечить соответствие требованиям промышленной гигиены и охраны труда, но и повысить общую эффективность производства за счёт снижения простоев, уменьшения компенсационных выплат.

Выводы по первой главе

1. Выполненный обзор и оценка текущего состояния технологий, применяемых для снижения запыленности на металлургических предприятиях, позволили определить сильные стороны используемых подходов, а также выявить их проблемные аспекты. Установлено, что существующие инженерные и организационные решения охватывают широкий круг задач — от локализации источников пылеобразования до очистки воздушных потоков и подавления вторичных пылевых выбросов. Вместе с тем анализ эффективности данных мероприятий показывает, что их практическая реализация не всегда обеспечивает стабильное достижение требуемых санитарно-гигиенических показателей.

2. Сохраняющиеся показатели профессиональной патологии, связанной с воздействием промышленной пыли, свидетельствуют о том, что применяемые методы обеспыливания в ряде случаев не приводят к необходимому снижению пылевой нагрузки на персонал. Подобная ситуация может быть обусловлена сложностью механизмов образования пылевых аэрозолей, высокой вариабельностью технологических процессов, особенностями дисперсного состава пыли и ограничениями используемых технических средств. Кроме того, значительное влияние оказывают эксплуатационные факторы, включая режимы работы оборудования, степень его износа и организацию производственного контроля.

3. Выявленные обстоятельства определяют необходимость более детального исследования закономерностей формирования и переноса пылевых частиц в условиях металлургического производства. Актуальной задачей является развитие научно обоснованных подходов к управлению

пылевым фактором, включающих совершенствование методов контроля, оптимизацию параметров пылеподавления и разработку технических решений, обеспечивающих устойчивое снижение концентраций аэрозолей в воздухе рабочей зоны. Реализация данных направлений позволит сформировать практические рекомендации, ориентированные на повышение эффективности профилактических мероприятий и минимизацию профессиональных рисков.

Целью работы является разработка рекомендаций по улучшению условий труда работников в горно-металлургической отрасли по пылевому фактору за счет целенаправленного снижения концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле.

Задачами диссертационного исследования являются:

1. Провести анализ современного состояния условий труда по пылевому фактору и профессиональной заболеваемости на металлургических предприятиях.
2. Выполнить анализ существующих методов и технических средств пылеподавления, применяемых при перегрузке сыпучих материалов, в том числе угля вагоноопрокидывателями на металлургических предприятиях, с учетом их эффективности в отношении тонкодисперсных фракций.
3. Исследовать дисперсный состав и физико-химические свойства тонкодисперсных фракций угольной пыли, образуемой в процессе работы вагоноопрокидывателей на коксохимических заводах, в зависимости от характеристик угля.
4. Установить влияние размеров частиц пыли и капель жидкости на коэффициент захвата угольной пыли каплями жидкости с учетом применения смачивателя.
5. Обосновать технические мероприятия по уменьшению доли тонкодисперсных фракций пыли в пылевом аэрозоле горно-металлургических предприятий.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗАПЫЛЕННОСТИ И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТАХ НА КОКСОХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ АО «QARMET»

2.1 Характеристика основных технологических процессов на коксохимическом заводе АО «Qarmet»

АО «Qarmet» представляет собой крупнейший промышленный комплекс Республики Казахстан, объединяющий металлургическое и горнодобывающее направления. В структуру компании входит Карагандинский металлургический комбинат, расположенный в г. Темиртау и являющийся ведущим предприятием черной металлургии страны. Организационная модель предприятия включает три ключевых производственных блока: стальной, угольный и железорудный, что отражает вертикально интегрированный характер деятельности и обеспечивает замкнутый технологический цикл.

Технологическая схема основного производства охватывает полный комплекс переделов, начиная с подготовки сырьевой базы и заканчивая выпуском готовой металлопродукции. К базовым стадиям относятся коксохимическое производство, агломерация железосодержащих материалов, доменный процесс с получением чугуна, конвертерный передел стали, а также прокатные операции. Конечная продукция представлена широким сортаментом: горячекатаный и холоднокатаный прокат, металлопрокат с различными видами покрытий (оловянным, цинковым, алюмоцинковым, гальвальномовым, полимерным), профилированные листы, электросварные трубы, сортовой прокат. Дополнительно в рамках производственной инфраструктуры осуществляется выработка тепловой и электрической энергии, необходимой для обеспечения стабильной работы технологических агрегатов.

К числу объектов основного производственного контура относятся

подразделения, непосредственно связанные с ключевыми металлургическими процессами: агломерационное, коксохимическое, доменное, конвертерное и листопрокатное производства. Функционирование указанных цехов формирует непрерывную цепочку переработки минерального сырья и определяет специфику производственной среды, включая характер и интенсивность воздействия вредных факторов [46].

Природно-климатические условия района размещения предприятия характеризуются резко континентальным климатом, что оказывает влияние на эксплуатационные и санитарно-гигиенические аспекты производства. Зимний период отличается продолжительностью, низкими температурами, наличием устойчивого снежного покрова и частыми ветровыми нагрузками, нередко сопровождаемыми метелями. Летний сезон сравнительно короткий, с высокими температурными показателями и выраженной сухостью. Территория относится к зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения, что предопределяет повышенную вероятность пылеобразования, особенно на открытых технологических площадках и складах сырья. Пространственное расположение промышленной площадки и прилегающих территорий отражено на ситуационной карте района.

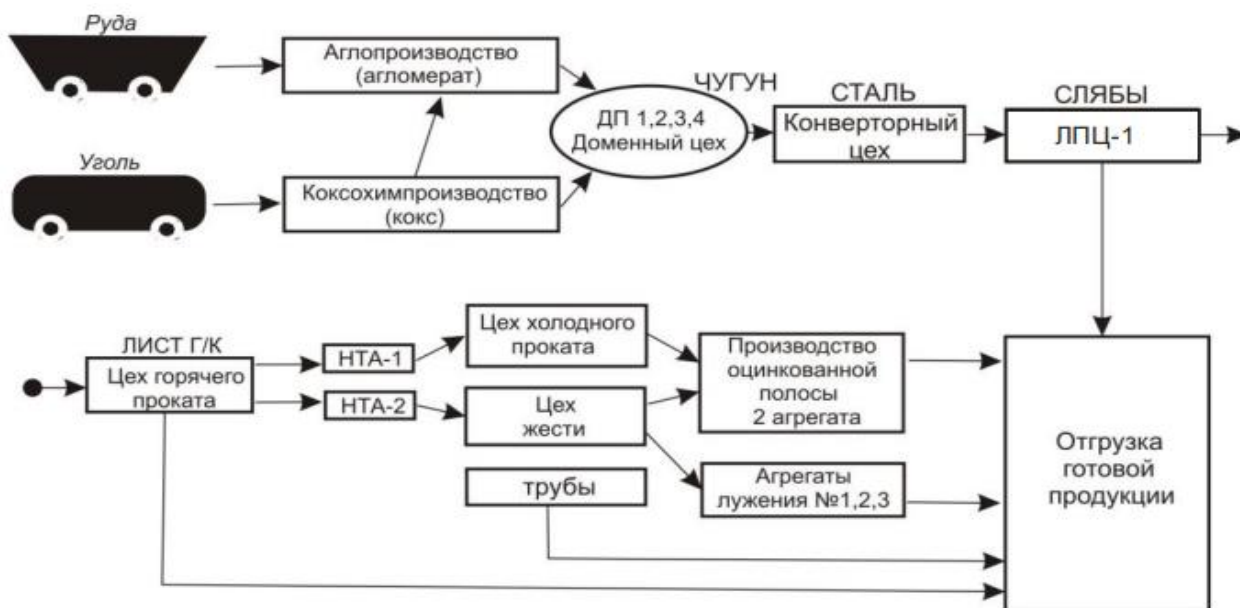


Рисунок 2.1 - Схема производства продукции АО «Qarmet»

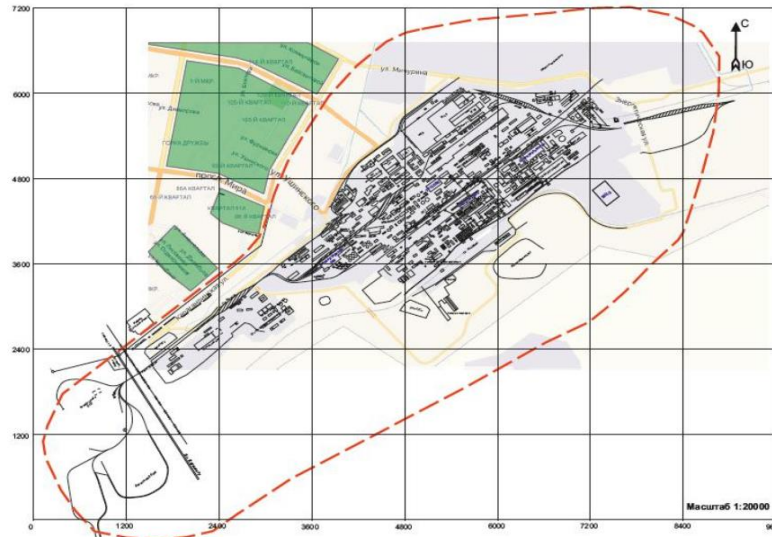


Рисунок 2.2 – Ситуационная карта-схема района расположения предприятия

В структуру коксохимического производства входят:

Углеобогащительный цех. Углеобогащительный цех был передан в структуру Стального департамента АО «Qarmet» в соответствии с распорядительным документом предприятия. В качестве исходного сырья наряду с рядовыми углями Карагандинского месторождения применяется также готовый угольный концентрат, получаемый из того же сырьевого бассейна.

Угли, предназначенные для коксования, характеризуются сравнительно низким содержанием сернистых соединений (до 0,8 %), однако отличаются повышенной зольностью. Наличие значительного количества минеральных примесей, устойчивых к удалению традиционными методами, обуславливает сложность процессов обогащения и требует применения специализированных технологических решений. Основой схемы переработки являются гравитационные методы разделения, включая процессы обогащения в тяжелых средах и отсадку. Для тонкодисперсных классов материала используется флотационное разделение, позволяющее эффективно выделять угольный концентрат из мелких фракций.

На участке УОЦ-2 эксплуатация оборудования предусматривает работу комплекса флотомашин типа МФУ-6. Конструктивно каждая машина

включает шесть камер, объём которых составляет 6 м³, что обеспечивает необходимую производительность и устойчивость технологического режима. Организация процесса основана на замкнутой водно-шламовой системе, в рамках которой оборотная вода подвергается предварительной очистке. Осветление осуществляется с использованием флокулянтов катионного и анионного типов, после чего очищенная вода аккумулируется в соответствующих резервуарах и повторно подается в технологический цикл. Контроль качества оборотной воды предусматривает поддержание концентрации взвешенных твердых частиц на уровне не выше 1 г/л.

Классификация минеральной составляющей пульпы осуществляется с применением гидроциклонного оборудования. Подрешетный продукт, представленный песками из нижней части первичных гидроциклонов, направляется в гидроклассификатор (гидросайзер), где производится разделение материала по крупности в диапазоне 0,25–2 мм. Образующийся концентрат по трубопроводам транспортируется в зумпф вторичного сгущения, тогда как сгущённые отходы выводятся на последующие стадии обработки. Дальнейшее отделение жидкой фазы осуществляется на высокочастотных грохотах, после чего фугат самотёком поступает в систему хвостового хозяйства.

В реагентном режиме флотационного процесса используются аполярные и гетерополярные составы. В качестве аполярных реагентов применяются жидкие углеводородные продукты (дизельное или печное топливо), обеспечивающие гидрофобизацию угольной поверхности. Гетерополярные добавки, представленные побочными продуктами химического производства (КОБС), способствуют стабилизации пены и повышению эффективности разделения фаз. В результате флотации формируются два технологических потока — флотоконцентрат и отходы (хвосты). Концентрат подвергается обезвоживанию на вакуум-фильтрах, что позволяет снизить влажность продукта до требуемых параметров. Для интенсификации процессов сгущения и разделения применяются современные флокулянты анионного и катионного

действия.

Отходы флотационного передела удаляются гидротранспортом и аккумулируются в специализированных хвостохранилищах. Реализуемая технологическая схема обогащения направлена на обеспечение стабильного качества угольного концентрата, повышение эффективности использования водных ресурсов и минимизацию потерь углеродной составляющей, что имеет существенное значение для устойчивости всего коксохимического производства.

Угледоготовительный цех. Угледоготовительный цех в соответствии с внутренними организационными решениями предприятия был включён в структуру Стального департамента АО «Qarmet». Функциональное назначение данного подразделения заключается в обеспечении полного комплекса операций по подготовке угольного сырья к процессу коксования. Производственный цикл цеха охватывает приём и разгрузку углей, их складирование, усреднение качественных характеристик, формирование угольных шихт заданного состава, а также механическую обработку сырья, включающую дробление, измельчение и последующее смешивание. Конечной задачей подразделения является бесперебойное снабжение коксовых печей подготовленной шихтой с требуемыми технологическими параметрами.

Поступление угля на производство осуществляется железнодорожным транспортом. Разгрузка вагонов выполняется с использованием вагоноопрокидывателей, обеспечивающих механизированную подачу материала. Уголь после выгрузки направляется в приёмные устройства, оснащённые питателями, что позволяет регулировать поток сырья и поддерживать стабильность дальнейших технологических операций.

В условиях холодного времени года, продолжительность которого в рассматриваемом регионе значительна, возникает необходимость предварительного размораживания смерзшегося угля. Для этой цели предусмотрено специализированное помещение — гараж размораживания, где поддержание требуемого температурного режима осуществляется за счёт

использования коксового газа. Данная операция обеспечивает восстановление сыпучести материала и предотвращает нарушения в работе транспортных и дробильных систем.

После разгрузки угольное сырьё подвергается предварительному дроблению, в ходе которого происходит отделение крупной породы и посторонних включений. Минеральные примеси удаляются и транспортируются в отвальные хозяйства, тогда как кондиционный материал посредством конвейерных линий направляется на склады усреднения. Для стабилизации качественных показателей используются закрытые угольные склады бункерного типа, конструктивно выполненные в виде железобетонных ёмкостей цилиндрическо-конической формы. Усреднение достигается за счёт регулируемой выгрузки угля из нескольких бункеров одной шахтной группы на общий сборный конвейер, что способствует выравниванию состава и свойств сырья.

Подготовленные и усреднённые угли далее поступают на стадии окончательного дробления, тонкого измельчения и смешивания. В результате формируется угольная шихта с заданными технологическими характеристиками, которая направляется либо на последующие стадии обогащения, либо непосредственно в коксовое производство. Помимо рядовых углей, подразделение осуществляет приём концентрата, поступающего с центральной обогатительной фабрики «Восточная». Концентрат транспортируется конвейерным транспортом в дозировочные отделения или на складские площадки, а после соответствующей подготовки подаётся в коксовый цех.

Следует учитывать, что операции выгрузки, механической обработки и транспортирования угля сопровождаются образованием мелкодисперсных частиц, формирующих угольную пыль. Для ограничения распространения пылевых выбросов узлы пересыпки и перегрузки оборудованы аспирационными системами. Эксплуатируемые установки обеспечивают улавливание взвешенных частиц и поддержание допустимых параметров

воздушной среды, характеризуясь достаточной эффективностью очистки и соответствием требованиям производственной санитарии.

Коксовый цех. Коксовый цех предназначен для получения металлургического кокса из подготовленной угольной шихты, а также для выработки прямого коксового газа, образующегося в процессе термической переработки угля. Производственная структура подразделения включает комплекс коксовых батарей, оснащённых вспомогательным и обслуживающим оборудованием, обеспечивающим непрерывность технологического цикла. В состав цеха входят угольные башни для аккумуляции и дозированной подачи шихты, машины для обслуживания печных агрегатов, установки для тушения кокса, рампы для его приёма и охлаждения, а также участки сортировки готового продукта.

Технологическая схема производства основана на последовательной загрузке коксовых печей угольной шихтой. Запасы подготовленного сырья формируются в угольных башнях, представляющих собой железобетонные бункерные конструкции, разделённые на отдельные секции. Из нижней части башни через систему затворов шихта поступает в загрузочные вагоны, которые транспортируют её к печам. Процесс заполнения камеры коксования регламентирован по времени и обычно занимает несколько минут.

В коксовых печах осуществляется высокотемпературное термическое разложение угольной массы без доступа кислорода, в результате чего формируются твёрдый остаток — кокс — и летучие продукты коксования. Коксование проводится в печных агрегатах, объединённых в батареи. Конструктивные и эксплуатационные параметры батарей, включая полезный объём камер, определяются проектными характеристиками оборудования. Обогрев печей осуществляется газообразным топливом, при этом состав используемой газовой смеси зависит от конкретной технологической схемы подразделения.

Работа коксового производства организована по непрерывному принципу с циклическим режимом выдачи готового кокса. Периодические

остановки, предусмотренные графиком эксплуатации, необходимы для обеспечения технологической устойчивости, профилактического обслуживания и синхронизации операций загрузки и выгрузки. Продолжительность коксования и оборот печей устанавливаются в зависимости от типа батарей и свойств угольной шихты.

Охлаждение раскалённого кокса выполняется методом мокрого тушения. Для этого используется система тушильных башен, оборудованных трубопроводами и распылительными устройствами, обеспечивающими равномерное распределение воды по поверхности материала. Кратковременное орошение приводит к снижению температуры кокса до безопасных значений и стабилизации его влажности. Излишняя вода после тушения отводится в отстойники, где осуществляется её осветление и повторное использование в оборотном цикле. Образующиеся шламовые отложения удаляются механизированным способом и направляются на дальнейшую переработку.

После охлаждения кокс выгружается на рампы, где происходит дополнительное удаление влаги за счёт естественного испарения. Далее материал транспортируется на сортировочные установки, где производится классификация по крупности. Разделение выполняется с применением дробильно-грохотного оборудования, что позволяет выделить товарные фракции металлургического кокса и мелкие классы. Готовая продукция подаётся конвейерными системами к потребителям или в транспортные средства для отгрузки.

С целью ограничения выбросов пыли и газообразных продуктов при загрузке печей внедряются специальные технологические решения, включая бездымные режимы загрузки. Такие методы основаны на улавливании и направленном отводе газопылевых потоков, что способствует снижению неорганизованных выбросов в производственные помещения и атмосферу. Дополнительное значение имеет поддержание герметичности печных агрегатов, для чего проводится регулярное восстановление и ремонт

огнеупорной кладки и уплотняющих элементов.

К числу основных источников поступления загрязняющих веществ в окружающую среду относятся организованные и неорганизованные выбросы, формирующиеся при эксплуатации коксовых батарей, тушильных устройств, узлов перегрузки и сортировки кокса, а также элементов аспирационных систем и вентиляционных устройств. Согласно приказа №126 от 27.01.2021 года коксовый цех разделён на коксовый цех №1 и коксовый цех №2. Технологическая схема коксохимического производства представлена на рис. 2.3 [63].

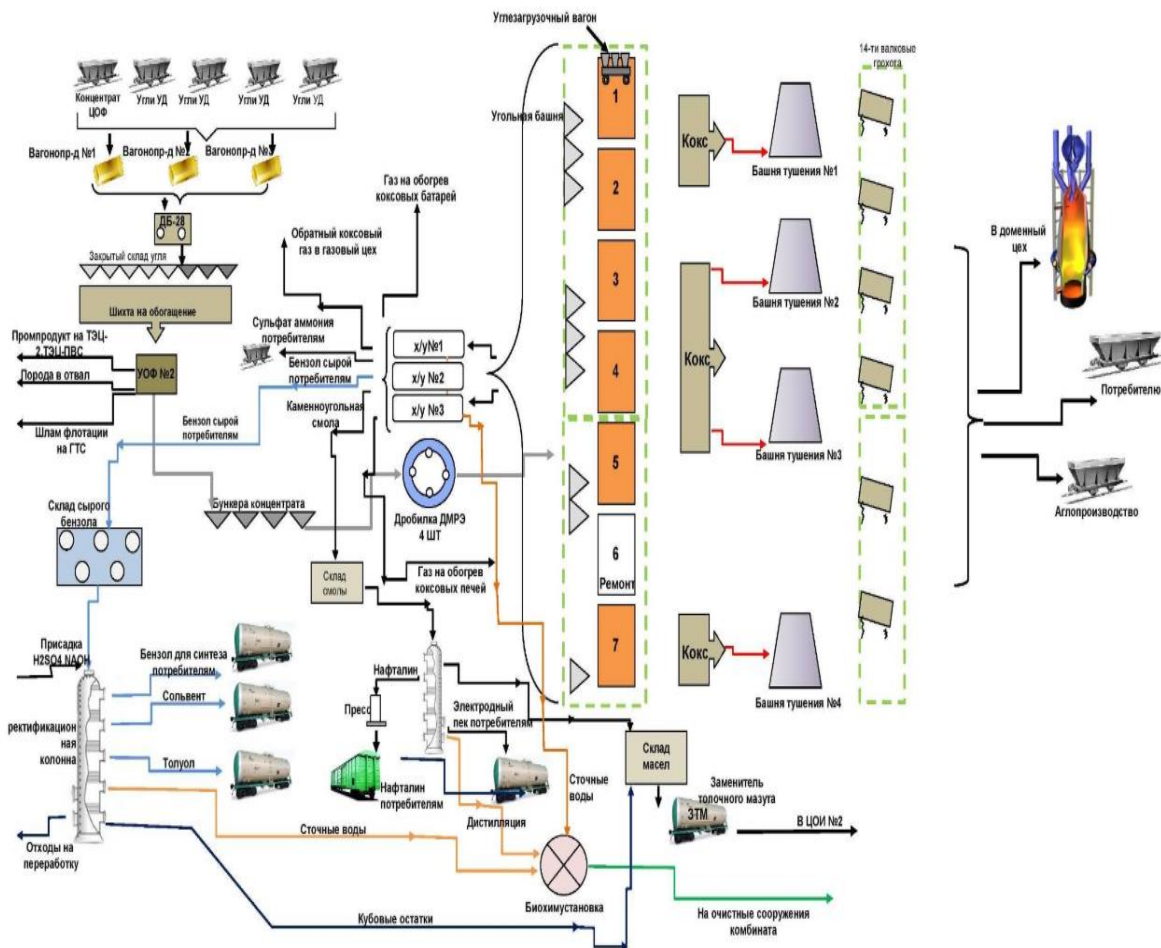


Рисунок 2.3 - Технологическая схема коксохимического производства

Цех химулавливания (ЦХУ) (отделения № 1, 2, 3). Отделение № 1. Функциональное назначение данного участка связано с первичной обработкой коксового газа, включающей его охлаждение, конденсацию и извлечение

сопутствующих химических компонентов. В процессе понижения температуры газового потока происходит выделение каменноугольной смолы и аммиачных соединений, после чего очищенный газ направляется к потребителям. Структурно ХО-1 ЦХУ объединяет машинно-конденсационное и аммиачно-сульфатное отделения.

Машинно-конденсационное отделение оснащено трубчатыми холодильниками с вертикальной компоновкой теплообменных труб, что обеспечивает интенсивный теплоотвод и эффективную конденсацию парогазовой смеси. В состав оборудования также входят механизированные осветлители, предназначенные для разделения жидких фаз и удаления взвешенных примесей, насосные агрегаты системы конденсации и машинный зал с размещением основного технологического оборудования.

Аммиачно-сульфатное отделение выполняет задачи по улавливанию аммиака из газовой среды с последующим получением сульфата аммония. Технологическая схема включает специализированную установку, складские помещения для готовой продукции и реагентов, а также инфраструктуру для хранения и дозирования химических веществ.

Отделение № 2. Второе отделение цеха улавливания химических продуктов коксования ориентировано на дальнейшее охлаждение и конденсацию коксового газа, а также на выделение ценных побочных компонентов. Технологическая конфигурация участка во многом аналогична первому отделению, однако отличается конструктивными особенностями оборудования. В частности, используются трубчатые газовые холодильники с горизонтальным расположением теплообменных труб, что позволяет адаптировать процесс теплообмена к заданным эксплуатационным параметрам.

В состав отделения входят системы освещения конденсата, насосное оборудование, обеспечивающее циркуляцию жидких сред, и машинный зал. Дополнительно предусмотрена насосная станция замкнутого водооборотного цикла конечных газовых холодильников, предназначенная для поддержания

стабильного температурного режима и рационального использования охлаждающей воды. Аммиачно-сульфатный участок выполняет функции, аналогичные соответствующему подразделению первого отделения, включая производство и складирование сульфата аммония.

Отделение № 3. Третье отделение предназначено для комплексной очистки коксового газа и извлечения из него химических примесей. Основные технологические операции включают улавливание смолистых веществ, выделение аммиака и нафталина, а также проведение процессов, направленных на снижение содержания нежелательных компонентов в газовом потоке. Реализация указанных стадий обеспечивает подготовку газа к последующему использованию в качестве технологического топлива или химического сырья.

Эксплуатация оборудования данного участка ориентирована на повышение степени очистки газа, стабилизацию его физико-химических характеристик и снижение нагрузки на последующие элементы газотранспортной системы. В результате обработки очищенный коксовый газ направляется конечным потребителям в соответствии с установленными технологическими требованиями.

Цех ректификации сырого бензола. Эксплуатация технологического комплекса цеха была прекращена в соответствии с распорядительным документом предприятия (приказ № 759 от 26.11.2015 г.). В рабочем состоянии сохранены исключительно резервуарные мощности, предназначенные для аккумулирования и хранения сырого бензола. Основное производственное здание цеха ректификации коксохимического производства выведено из эксплуатации на основании решения специализированного экономического суда Карагандинской области.

Смолоперерабатывающий цех (СПЦ). Функциональное назначение цеха заключается в извлечении и переработке ценных химических компонентов, входящих в состав каменноугольной смолы, включая нафталин, антрацен, различные виды масел и пек. Технологический процесс предусматривает подачу смолы из резервуарных хранилищ после стадии конденсации на

участок термической подготовки, где сырьё подвергается нагреву в трубчатых печах до температуры порядка 400 °С.

Дальнейшая переработка осуществляется в ректификационных колоннах, в которых происходит разделение смолы на отдельные фракции в зависимости от температурных интервалов кипения. В результате ректификации выделяются следующие продукты: лёгкая фракция с температурой кипения до 170 °С, фенольная — в диапазоне 170–210 °С, нафталиновая — 210–230 °С, поглотительная — 230–300 °С и антраценовая — 300–360 °С. Такое распределение обеспечивает получение товарных химических продуктов с заданными физико-химическими характеристиками и дальнейшее их использование в технологических и производственных целях.

Агломерационное производство. Сырьевое обеспечение металлургического комбината формируется за счёт железорудных концентратов, поставляемых предприятиями ТОО «Оркен» и Соколовско-Сарбайским горно-обогатительным производственным объединением. Указанные материалы служат основой для агломерационного передела, который выполняет функцию подготовки железосодержащего сырья к доменному процессу.

Производственная структура аглопроизводства включает дробильно-сортировочный комплекс с участком формирования шихты и агломерационный цех. Дробильно-сортировочная фабрика обеспечивает выполнение операций по приёму, переработке и подготовке компонентов агломерационной смеси. Технологические процессы охватывают разгрузку поступающих материалов, их дробление, складирование, классификацию по крупности и усреднение качественных характеристик рудных и флюсовых составляющих, а также железосодержащих вторичных ресурсов.

В составе фабрики функционируют роторные вагоноопрокидыватели, складские площадки различного типа, дробильные агрегаты и оборудование для дозирования и смешивания шихтовых компонентов. Для размещения сырья используются как открытые склады эстакадной конструкции, так и

закрытые хранилища, предназначенные для доменного сырья и операций усреднения. На открытых складах формирование штабелей осуществляется с учётом необходимости выравнивания химического состава и гранулометрических характеристик материалов. Извлечение сырья из штабелей производится экскаваторной техникой с последующей подачей в дробильное отделение.

Процессы измельчения рудных и флюсовых компонентов реализуются в конусных дробильных установках, работающих в замкнутом цикле, что позволяет обеспечить требуемые параметры крупности. Материал, предназначенный для агломерации, должен соответствовать установленным гранулометрическим ограничениям, поскольку эффективность спекания во многом определяется равномерностью распределения частиц по размерам. Фракции мелкого класса направляются непосредственно на агломерационные машины для последующего спекания.

На участке подготовки шихты ключевыми элементами технологической схемы являются установки дробления и грохочения твёрдого топлива, включая кокс и уголь, а также оборудование для переработки флюсовых добавок, в частности известняка. Транспортировка компонентов шихты и готового агломерата между производственными переделами осуществляется системой ленточных конвейеров.

Следует учитывать, что процессы механической переработки и перемещения сыпучих материалов сопровождаются образованием пылевых выбросов. Дробильное, сортировочное и транспортное оборудование рассматривается как потенциальный источник загрязнения воздушной среды, что обуславливает необходимость применения аспирационных систем. Для улавливания и очистки запылённых воздушных потоков используются установки с мокрым способом пылеулавливания, обеспечивающие снижение концентраций взвешенных частиц и поддержание нормативных параметров производственной среды.

Агломерационный цех. Подготовленные для агломерации компоненты

шихты направляются в бункерное хозяйство шихтового отделения, где для каждого вида материала предусмотрены отдельные ёмкости. Формирование шихтовой смеси осуществляется посредством дозирования исходных составляющих с учётом заданных технологических параметров будущего агломерата, включая содержание железа, показатели основности, а также концентрации оксидов магния и марганца [63]. Компоненты, подаваемые на общий конвейер, транспортируются в смесительные барабаны, где достигается равномерное распределение частиц. Далее материал поступает в окомкователи, в которых при контролируемом увлажнении обеспечивается формирование гранул с оптимальной влажностью, как правило, в пределах 6,0–7,5 %.

Процесс агломерации представляет собой высокотемпературную стадию окускования мелкодисперсных железосодержащих материалов, включающую спекание руд, концентратов и вторичных металлургических продуктов. Цель данной операции заключается в получении прочного пористого агломерата с требуемым химическим составом и структурой, пригодного для эффективного использования в доменном переделе. Технологическая сущность процесса основана на частичном плавлении и последующем сцеплении частиц с образованием устойчивых минеральных фаз.

Основными агрегатами агломерационного цеха являются агломашины, функционирующие в непрерывном режиме. Загрузка шихты осуществляется однослойным способом на колосниковые решётки с предварительным формированием постели из возвратного материала. При прохождении зоны зажигания происходит воспламенение углеродсодержащего топлива, введённого в состав смеси. Генерация тепловой энергии, необходимой для спекания, обеспечивается за счёт горения топлива в потоке воздуха, который просасывается через слой шихты сверху вниз. Перемещение фронта горения сопровождается последовательным прогревом и структурным преобразованием материала по высоте слоя.

Образующийся спек, обладающий высокой температурой, подвергается дроблению до требуемых размеров, после чего направляется на охлаждение.

Снижение температуры агломерата производится в охладительных установках с принудительной подачей воздуха. Охлаждённый продукт поступает на грохочение, где происходит разделение по гранулометрическим классам. Возвратные фракции используются для формирования постели, а кондиционный агломерат транспортируется конвейерными системами в бункерное хозяйство доменного производства.

Доменное производство. Доменное производство является следующим ключевым этапом металлургического цикла. В структуру доменного цеха входят доменные печи и оборудование для разлива жидкого чугуна. Эксплуатационные характеристики агрегатов позволяют получать чугун различных марок в соответствии с действующими национальными и международными стандартами.

Сырьевой базой доменного процесса служат агломерат собственного производства, окатыши, железорудные концентраты и металлические добавки. Подготовленные материалы поступают в бункеры цеха, откуда дозированно подаются в загрузочные устройства печей. В качестве основного топлива используется металлургический кокс, при необходимости дополняемый углеводородными энергоносителями. Газообразные продукты доменного процесса находят применение в энергетических системах, в частности для нагрева дутья.

Доменная печь представляет собой вертикальный шахтный агрегат непрерывного действия, в котором реализуются процессы восстановления железа из оксидных соединений с образованием жидкого металла и шлака. Загрузка шихты осуществляется через верхнюю часть печи с применением специализированных загрузочных устройств, обеспечивающих равномерное распределение материалов. В нижней зоне печи через фурменные приборы подаётся нагретое и обогащённое дутьё, поддерживающее высокотемпературный режим плавки.

Температурное поле внутри печи характеризуется выраженной градиентностью: максимальные значения достигаются в области горна, тогда

как по мере подъёма газов температура снижается. Такое распределение тепловых потоков определяет последовательность протекания физико-химических превращений, обеспечивающих восстановление и плавление железосодержащего сырья. Для поддержания надёжности оборудования доменные агрегаты периодически выводятся в капитальный ремонт, что является неотъемлемым элементом их эксплуатационного цикла.

Конвертерный цех. В составе конвертерного передела эксплуатируются три кислородных конвертера вместимостью по 300 т, предназначенные для переработки жидкого чугуна и получения стали требуемого химического состава. Технологические операции сопровождаются образованием отходящих газов, в составе которых наряду с оксидом углерода и твердыми частицами присутствуют оксиды азота и диоксид серы. Наличие указанных компонентов обусловлено особенностями протекания высокотемпературных окислительных процессов и характеристиками исходного сырья.

Сущность конвертерного способа производства стали основана на интенсивном окислении примесных элементов металлошихты. В ходе продувки кислородом происходит химическое взаимодействие между жидкой металлической ванной, шлаковой фазой и газовой средой. В результате данных реакций осуществляется снижение содержания углерода, кремния и серы за счёт их перехода в газообразные продукты и шлак. Эффективность удаления примесей определяется кинетикой окислительных реакций, параметрами дутья и условиями массопереноса между фазами.

Кислородный конвертер выполняет несколько ключевых технологических функций. Одной из основных задач является обезуглероживание чугуна, обеспечивающее формирование заданных свойств стали. Одновременно реализуются процессы десульфурации, направленные на уменьшение концентрации сернистых соединений. Существенное значение имеет также регулирование температурного режима плавки, позволяющее достичь оптимальных условий для последующей обработки металла перед разливкой.

Характерной особенностью конвертерного процесса является высокая тепловая эффективность. Окисление примесных элементов сопровождается экзотермическими реакциями, приводящими к выделению значительного количества тепловой энергии. Образующийся тепловой избыток превышает уровень, необходимый для достижения требуемой температуры стали. Избыточное тепло используется в технологических целях, прежде всего для расплавления добавляемого металлического лома. Введение скрапа позволяет корректировать тепловой баланс агрегата, оптимизировать состав шихты и повысить экономическую эффективность сталеплавильного передела.

Цех обжига известняка (ЦОИ). Производственная структура подразделения включает восемь термических агрегатов, из которых пять относятся к шахтному типу, а три представляют собой вращающиеся печи. Технологический процесс ориентирован на получение извести из карбонатного сырья. В качестве исходного материала применяется известняк сторонних поставщиков, который доставляется железнодорожным транспортом на объединённые складские площадки сыпучих материалов. Разгрузка поступающих партий осуществляется механизированным способом с использованием грейферных кранов, обеспечивающих равномерное распределение материала по длине складского штабеля без смешивания с другими видами сырья.

Перед подачей в печные агрегаты известняк подвергается предварительной классификации по гранулометрическому составу. Складированный материал посредством перегрузочного оборудования направляется в приёмные бункеры, откуда через регулируемые питатели поступает на вибрационные или механические грохоты. В ходе сортировки выделяются фракции различной крупности: материал с размером частиц, превышающим установленный предел, транспортируется конвейерными линиями в бункерное хозяйство печей обжига, тогда как мелкие классы возвращаются на склад и используются в других технологических переделах, в частности в агломерационном производстве.

Термическая обработка известняка в шахтных печах осуществляется при использовании газообразного топлива. В качестве основного энергоносителя применяется коксовый газ, дополнительно вводится ограниченное количество металлургического кокса, необходимое для стабилизации теплового режима. Совокупность данных операций обеспечивает получение извести с требуемыми физико-химическими характеристиками.

Прокатное производство. Прокатный передел металлургического комбината объединяет несколько специализированных подразделений, включая листопрокатные, сортопрокатные и трубосварочные цеха. Производственные процессы связаны с термической и механической обработкой металлических заготовок, что определяет специфику формирования выбросов загрязняющих веществ. Существенная доля газообразных выбросов образуется при эксплуатации нагревательных печей, где в результате сжигания топлива формируются оксиды азота, оксиды углерода и диоксид серы.

Работа прокатных станов, вспомогательных механизмов и участков последующей обработки металла сопровождается выделением твёрдых частиц, представленных преимущественно соединениями железа и неорганической пылью. Дополнительным фактором воздействия на воздушную среду являются участки хранения и обращения с технологическими смазочными материалами. Маслоподвалы и складские зоны масел могут выступать источниками выбросов аэрозолей минеральных масел, которые учитываются в составе площадных источников предприятия.

Комплексная характеристика выбросов прокатного производства отражает многофакторный характер загрязнения, обусловленный сочетанием высокотемпературных процессов, механической обработки и эксплуатации вспомогательной инфраструктуры. Это требует применения систем газоочистки, вентиляции и производственного экологического контроля.

Для коксования используются угли шахт Абайская, Костенко и разрезов Экибастуз, Уголь Куу Чекинский (Нура) за 2024 год (табл. 2.1).

Таблица 2.1- Характеристика углей

Период	Экибастуз Q _n	Экибастуз W _r	Экибастуз A _c	Смесь Q _n	Смесь W _r	Смесь A _c
Январь	4198,3	7,6	41,2	3789,4	8,0	44,3
Февраль	4007,2	7,7	41,5	3599,2	8,1	45,8
Март	4428,2	7,0	39,2	3676,0	7,9	45,3
Апрель	4622,3	6,9	37,3	3780,0	7,9	44,8
Май	4149,0	9,0	40,0	3893,2	7,3	43,8
Июнь	4611,0	6,7	40,2	3948,6	6,4	43,4
Июль	0	0	0	3950,3	6,1	42,0
Август	3915,3	10	43,9	3731,8	6,5	46,2
Сентябрь	4144,0	6,1	42,7	3654,0	7,3	46,1
Октябрь	4059,7	6,7	42,8	3725,9	7,9	44,9
Ноябрь	4641,5	7,5	36,2	3819,8	8,1	43,6
Декабрь	4232,0	9,5	39,1	3824,0	8,1	43,6
Год	4273,5	7,7	40,3	3782,7	7,5	44,5

А также в структуру завода входят вспомогательные подразделения, ТЭЦ и др. Основные показатели производственной деятельности АО «Qarmet» приведен в табл. 2.2 [63].

Таблица 2.2 - показатели производственной деятельности

№ п/п	Основные показатели	Ед. изм.	2022 год	2024 год
1	Производство стали (сляб+блуж)	Тыс.т	3 423	3600
2	Производство агломерата	Тыс.т	4 837	5 107
3	Производство извести	Тыс.т	560	560
4	Производство чугуна	Тыс.т	3 137	3 186
5	Производство кокса	Тыс.т	2 115	2 254

2.2. Определение дисперсного состава пылевого аэрозоля на участках вагоноопрокидывания

Пылевой аэрозоль представляет собой систему, сформированную взвешенными в воздушной среде твердыми частицами, геометрические характеристики которых — форма и линейные размеры — носят вероятностный характер. Вследствие этого распределение частиц по размерам описывается статистическими зависимостями, где параметр (D) используется как количественная мера, характеризующая условный размер частицы (диаметр). Подобный подход позволяет анализировать дисперсный состав

аэрозоля с учётом случайной изменчивости параметров частиц [4, 57, 65].

В аэрозольных системах с твёрдой дисперсной фазой, рассматриваемых в рамках данного исследования, преобладают частицы нерегулярной конфигурации, для которых линейные размеры в различных направлениях сопоставимы по величине. Для унификации процедур классификации и сопоставления результатов измерений размеры таких частиц приводят к эквивалентной сферической форме. В практических расчётах используется усреднённая величина диаметра, которая может определяться либо на основе геометрических параметров, либо с учётом динамических характеристик, например скорости гравитационного осаждения [14, 18].

В нормативной и методической практике Российской Федерации применяется понятие аэродинамического диаметра пылевой частицы. Под этим термином понимают диаметр условной сферы с плотностью 1 г/см^3 , обладающей такой же установившейся скоростью осаждения в неподвижном воздухе, как и анализируемая частица при идентичных условиях среды. Данный критерий позволяет сопоставлять частицы различной формы и плотности, исходя из их аэродинамического поведения: при равенстве скоростей осаждения значения аэродинамического диаметра считаются одинаковыми [57].

Для характеристики размеров дисперсной фазы также используется стоксовский диаметр, который определяется как диаметр гипотетической сферической частицы с теми же параметрами плотности и скорости осаждения, что и у реальной частицы. Отличие между указанными параметрами заключается в том, что аэродинамический диаметр учитывает влияние плотности материала, тогда как стоксовский диаметр рассматривается как величина, определяемая преимущественно гидродинамическими условиями движения частицы [57, 73, 76, 77].

Следует отметить, что точное определение аэродинамического диаметра в реальных условиях сопряжено с рядом методических ограничений. На практике отсутствует возможность установления индивидуальной плотности

каждой частицы, а также прямого измерения скорости её осаждения. По этой причине в большинстве экспериментальных методик, применяемых для исследования дисперсного состава аэрозолей, размеры частиц оцениваются по их геометрическим характеристикам. Наиболее распространёнными методами являются ситовый и микроскопический анализ, при которых используются эквивалентные линейные параметры [14, 57, 76, 77].

В инженерных и лабораторных исследованиях для описания геометрических размеров частиц применяются различные условные диаметры. Диаметр Ферета определяется как наибольшее расстояние между противоположными границами проекции частицы. Диаметр Мартина характеризует длину отрезка, делящего частицу на две части равной площади. Диаметр проектируемой поверхности устанавливается как диаметр круга, эквивалентного по площади видимой проекции частицы. Использование подобных параметров позволяет количественно описывать дисперсный состав пылевых аэрозолей и проводить сопоставление экспериментальных данных при отсутствии прямых аэродинамических измерений [57].

Для наглядных микроскопических и лазерных исследований с компьютерной обработкой наиболее перспективным является понятие приведенного диаметра частиц, близкое к понятию диаметра проектируемой поверхности. Программная обработка цифрового изображения позволяет с высокой точностью определить площадь неправильной фигуры $S_{\text{част}}$ — видимой проекции частицы. Наиболее распространенная форма частиц — изометрическая; третья координата частицы с высокой вероятностью соответствует видимому диаметру плоской фигуры. Объемный диаметр частицы рассчитывается на основе видимого микроскопического изображения [57]:

$$d=2\sqrt{\frac{S_{\text{част}}}{\pi}}, \quad (2.1)$$

где $S_{\text{част}}$ — площадь видимого микроскопического изображения частицы.

Случайная величина, характеризующая размер частиц и выражаемая

через параметр диаметра (D), описывается статистическими закономерностями распределения. Для количественного представления дисперсного состава используется функция распределения ($F(d)=P\{D<d\}$), отражающая вероятность того, что диаметр частицы не превышает заданного значения (d), а также функция плотности распределения ($f(d)$), определяющая относительную долю частиц в окрестности выбранного интервала размеров.

В задачах, связанных с исследованием динамики пылевых аэрозолей, указанные зависимости принято интерпретировать как интегральную и дифференциальную гранулометрические функции. Первая из них характеризует накопленное распределение частиц по размерам, тогда как вторая описывает их распределение по отдельным диапазонам диаметров, что позволяет более детально анализировать дисперсную структуру аэрозольной системы.

Как всякая вероятность, $F(d)$ безразмерна и выражается в долях или процентах, а плотность распределения $f(d)$ имеет размерность, обратную размерности случайной величины.

Гранулометрические функции связаны соотношением [57]:

$$f(d) = F'(d) = \frac{d}{dd} F(d), \quad (2.2)$$

где dd – дифференциал по переменной величине d .

Также,

$$F(d_1 < d < d_2) = \int_{d_2}^{d_1} f(d) dd. \quad (2.3)$$

Для условий выделения пыли в шахте число образующихся частиц конечно, но достаточно велико, поэтому случайная величина аэродинамического диаметра частиц d может принимать практически непрерывные значения в диапазоне $0 < d_i < d_{\max}$. Соответственно, функция распределения $F(d)$ и функция плотности распределения $f(d)$ рассматриваются как функции непрерывной случайной величины. В свою очередь, численный эксперимент ограничен техническими возможностями приборов: набором сит с определенными размерами ячеек или числом каналов лазерного анализатора

(N_k). Поскольку значительная часть исследований в настоящее время производится на лазерных анализаторах дисперсного состава аэрозолей с числом каналов $N_k=62-124$, гранулометрические функции $F(d)$ и $f(d)$ могут быть рассмотрены для 62 или 124 значений аргумента в диапазоне диаметров частиц 0,01–1000мкм.

Исходя из определения плотности распределения $f(d)$ и с учетом того, что случайная величина аэродинамического диаметра (а.а.) частиц пыли принимает только неотрицательные значения, интеграл от $f(d)$ в пределах от 0 до ∞ равен единице:

$$\int_0^{\infty} f(d) dd = 1. \quad (2.4)$$

При вычислении дисперсного состава пыли в процентах значение интеграла (2.4) равно 100%.

В классической теории вероятностей [4] отмечено «проблемное» свойство функции $f(d)$: функция плотности распределения $f(d)$ не универсальна, она существует только для непрерывных случайных величин. При экспериментальном получении ее значений диаметры частиц разделены на интервалы от d_i до $d_i+\Delta d$ и $f(d)$ имеет вид гистограммы.

Для технологий 1950–1970-х гг. основной проблемой при получении $f(d)$ считалась необходимость сглаживания «неправильностей», обусловленных недостаточным числом экспериментальных значений интегральных функций [76, 77]. Указанные функции численно либо графически аппроксимировались на основе нескольких точек, что не выявляло реальные проблемы экспериментального определения дифференциальной функции распределения пыли $f(d)$.

Определение $f_{\text{экс}}(d_i)$ на современной приборной базе для заданного диаметра d_i сводится к измерению массовой доли частиц в интервале аэродинамического диаметра (а.а.) от d_i до $d_i+\Delta d$ ($i=1-N_k$):

$$f_{\text{экс}}(d_i) = \frac{M[d_i, d_i+\Delta d]}{M}, \quad (2.5)$$

где M – общая масса (объем) анализируемой пробы пыли; $M[d_i, d_i+\Delta d]$ –

масса (объем) частиц в диапазоне аэродинамических диаметров от d_i до $d_i+\Delta d$ ($i=1-N_k$).

При определении объемных долей частиц во всех оптических или лазерных анализаторах дисперсного состава вместо массы $M[d_i, d_i+\Delta d]$ могут использоваться величины объема частиц $V[d_i, d_i+\Delta d]$.

С ростом числа экспериментальных значений d_i от 2–5 при ситовом анализе до 62–124 сумма всех фракций пыли не изменяется и равняется единице (или 100%). В этом случае при фиксированной сумме (100%) рост числа слагаемых приводит к резкому уменьшению их значений. Поэтому процесс уточнения $f_{\text{экс}}$ методом дробления интервалов аргумента оптимизируется современными методами.

Учитывая сложности получения $f_{\text{экс}}(d)$, процесс экспериментального определения дифференциальной функции распределения является аппаратно-зависимым. На его результаты оказывают влияние:

- число анализируемых интервалов диаметров частиц N_k ;
- ширина интервалов Δd в диапазоне $[d_i, d_i+\Delta d]$.

Сопоставление результатов определения дисперсного состава пыли возможно только при совпадении (или близком равенстве):

- числа анализируемых диапазонов N_k ;
- значений ширины интервалов Δd .

При этом значения интегральной функции $F(d)$ не зависят от числа экспериментальных точек и полностью совпадают.

С появлением методов и средств лазерного детализированного анализа пыли появилась дополнительная возможность контролировать ранее использовавшиеся ситовые методы определения ее дисперсного состава.

Наряду с функциональными зависимостями распределения частиц по размерам, представляемыми интегральной $F(d)$ и дифференциальной $f(d)$ функциями, при анализе свойств и поведения пылевых аэрозолей широко используются обобщенные численные параметры. К числу основных статистических показателей, характеризующих дисперсный состав, относятся:

математическое ожидание $M[D]$, мода $Mo[D]$, медиана $Med[D]$, дисперсия $D[D]$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma[D]$ [57].

Перечисленные характеристики позволяют количественно описывать распределение частиц по диаметрам, оценивать степень варибельности размеров и выявлять преобладающие фракции в аэрозольной системе. Их вычисление осуществляется на основе стандартных вероятностно-статистических соотношений, применяемых для дискретных и непрерывных случайных величин. При этом выбор конкретной расчетной схемы и точность определения параметров зависят от используемых средств измерений и технических возможностей приборов, предназначенных для анализа гранулометрического состава пыли:

$$M[D] = \int_0^{d_{max}} df(d) dd = \sum_{i=1}^{N_k} d_i \cdot f(d_i), \quad (2.6)$$

где: N_k — число каналов анализатора,

d_i — среднее значение диаметра в i -м интервале,

$f(d_i)$ — массовая/объемная доля частиц в i -м интервале.

Величина медианы случайной величины D (может быть обозначена как d_{50}) определяется так:

$$Med [D] = d_{50} = P\{D < d_j\} = P\{D > d_j\} = 0,5 \quad (2.7)$$

Мода случайной величины аэродинамического диаметра частиц $Md[D]$ определяется как значение аэродинамического диаметра, при котором дифференциальная функция распределения принимает наибольшее значение. Иными словами, данный параметр соответствует размеру частиц, наиболее часто встречающемуся в анализируемой пылевой пробе:

$$\begin{cases} Md[D] = d_{mod}; \\ f(d_{mod}) = \max(f(d_j)), j = 1, N_k \end{cases} \quad (2.8)$$

Для пылевых аэрозолей, формирующихся в результате действия единственного источника пылеобразования, характерно мономодальное распределение. В этом случае функция плотности вероятности имеет единственный выраженный максимум, отражающий преобладающий размер частиц дисперсной фазы. Однако даже при теоретическом рассмотрении

очевидно, что в лавах имеет место витание и отложение частиц пыли от нескольких источников: очистного комбайна, лавных конвейеров, перегружателей, а также пыли с секций крепи при их подвигании и т.д. В современных подготовительных выработках пыль образуется в основном от двух источников: комбайна и бурильных станков анкероустановщиков. В этом случае смешивание вентиляционных потоков создает суммарный аэрозоль (или аэрогель) с функциями распределения $F_{\text{сум}}$ и $f_{\text{сум}}$, учитывающими особенности составляющих аэрозолей [57].

Современная приборная база, определяющая дисперсный состав пыли с высокой детализацией, позволяет выявлять пыль с несколькими локальными максимумами функции $f_{\text{сум}}$. Такая пыль по определению является полимодальной.

Для полимодальной пыли имеется несколько значений $M_d[D]$ и определение должно рассматриваться в некоторой окрестности диаметра частиц, примыкающих к локальному максимуму.

Определение $D[D]$ — дисперсии пыли — исходя из технических возможностей анализаторов дисперсного состава на основании (2.6) производится так:

$$D[D] = \sum_{i=1}^{N_k} d_i^2 f(d_i^2) - (\sum_{i=1}^{N_k} d_i f(d_i))^2 \quad (2.9)$$

Среднеквадратическое отклонение случайной величины D для рудничной пыли на основе экспериментальных данных определяется так:

$$\sigma[D] = \sqrt{D[D]} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_k} d_i^2 f(d_i^2) - (\sum_{i=1}^{N_k} d_i f(d_i))^2} \quad (2.10)$$

Согласно литературным данным, тонкая пыль оседает на пересыпных станциях, где её мода составляет 15-17 мкм, а диапазон улавливаемых частиц — от 0,17 до 69,15 мкм, с среднеквадратическим отклонением размеров частиц 5,67 мкм. Уровни запыленности при разгрузке влажного угля с помощью вагоноопрокидывателя на предприятии АО «Qarmet» составили 40 мг/м³ и более. При этом был проанализирован дисперсный состав пыли, образуемой во время разгрузки угля с помощью вагоноопрокидывателя (рис.2.4), охватывающий диапазон частиц от 0,01 до 200 мкм [60].

В здании вагоноопрокидывателя при разгрузке вагонов в момент опрокидывания материал высыпается в бункер на решетку под вагоном, и в этот момент вылетает большое количество пыли, которая поднимается над вагоноопрокидывателем и висит в здании вагоноопрокидывателя. Так как вагоноопрокидыватель является составной частью машин непрерывного транспорта, и он встроен в технологическую цепочку, то практически циклы опрокидывания непрерывны.

Пыль вырывается с периодичностью раз в 2–3 минуты, накапливаясь за смену и переходя на следующую смену, оставаясь в воздухе самого здания. Существующие системы аспирации, которые расположены и под бочкой вагоноопрокидывателя, и рядом, при таком объеме выбросов пыли и объеме помещения, малоэффективны. Особенно возникают большие проблемы по пылеподавлению на нулевом уровне, где расположена сама бочка вагоноопрокидывателя [44, 60].

После выгрузки вагона работают фрезерные машины, которые тоже выделяют большое количество пыли, поэтому проблема пыления присутствует и ниже нулевого уровня. Это на приемных решетках, в отделении дробления, в районе питателей, приемного стола. На этих уровнях работает система аспирации, но она не имеет большой эффективности [60].

На рис.2.4 представлен дисперсный состав пыли, отобранной с фильтров аспирационной системы здания вагоноопрокидывателя.

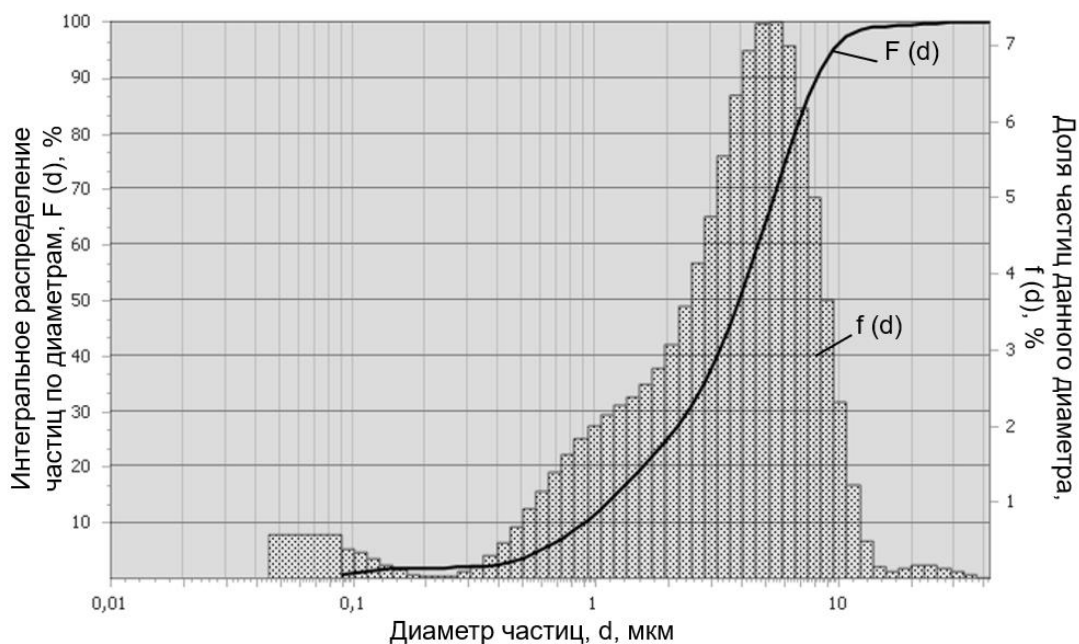


Рисунок 2.4 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагоноопрокидывателя

Анализ графических данных (рис. 2.4) показывает, что размеры пыли, витающей в здании вагоноопрокидывателя, представлены в диапазоне частиц от 0,1 мкм до 22,5 мкм с модой 3-4 мкм. Содержание респираторной пыли размером до 7,5 мкм составляет до 95%. Таким образом, почти вся витающая пыль в здании вагоноопрокидывателя является респираторной.

Электронно-сканирующие микроскопические изображения (рис. 2.5) отображают склонность частиц дисперсной фазы к коагуляции и их способность создавать агрегатные состояния.

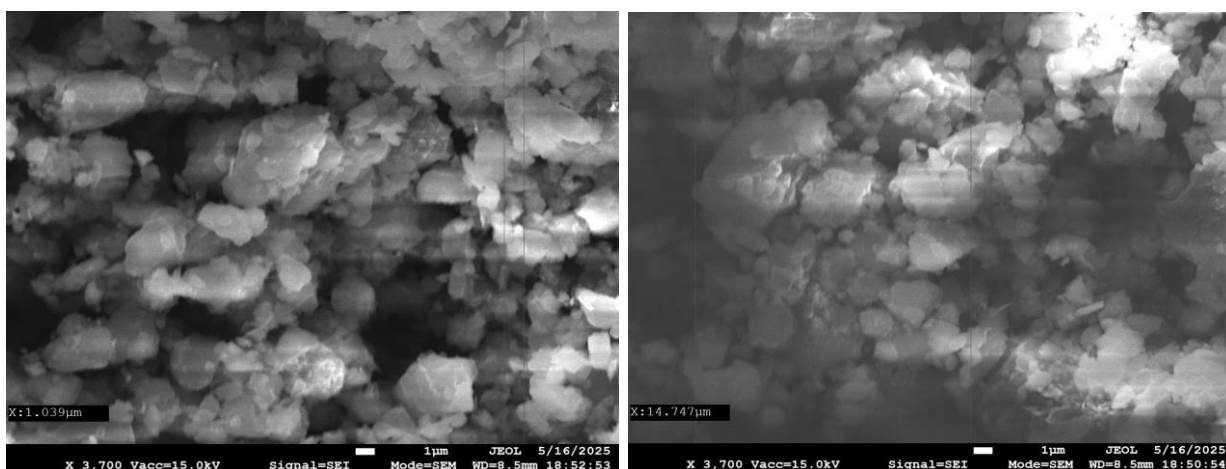


Рисунок 2.5 – Электронно-сканирующие микроскопические изображения высокого разрешения формы частиц пыли (размер до 10 мкм, марка Ж)

2.3. Анализ факторов, влияющих на запыленность и содержание тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле

Среди факторов, оказывающих влияние на уровень запыленности воздуха и дисперсный состав пылевого аэрозоля в зонах разгрузки угля на участке вагоноопрокидывания, можно выделить три основные группы. Первая группа включает факторы, определяющие интенсивность разрушения угольной массы при выгрузке и, как следствие, объём образующейся пыли различного гранулометрического состава. Вторая группа охватывает факторы, влияющие на скорость перехода пылевых частиц в аэрозольное состояние, а третья — параметры, определяющие эффективность последующего пылеподавления, в том числе при применении орошающих систем [44].

Первую группу факторов обуславливают физико-механические свойства

угля (прочность, влажность, слоистость), высота его свободного падения в момент разгрузки, а также конструктивные параметры вагоноопрокидывателя (тип и угол наклона платформы, наличие направляющих лотков, глубина бункера). Чем выше высота падения угольной массы и ниже её природная влажность, тем интенсивнее процесс деструкции материала и тем большее количество мелкодисперсной пыли (PM10 и PM2.5) образуется при разгрузке [25, 28, 31].

Во вторую группу входят факторы, влияющие на аэродинамику зоны разгрузки: скорость и направление воздушных потоков в районе вагоноопрокидывателя, конструкция приёмного бункера, наличие/отсутствие локальных укрытий и кожухов, герметичность зоны разгрузки, а также разрежение, создаваемое аспирационной системой. При слабом или нерегулярном функционировании аспирации часть пыли не задерживается, а подхватывается восходящими потоками воздуха и распространяется в рабочую зону [41, 57].

Третья группа факторов влияет на эффективность осаждения пыли и связана с работой систем пылеподавления. Сюда относятся такие параметры, как тип применяемого орошающего оборудования (форсуночные рамки, туманообразующие устройства, гидрошторы), давление и равномерность распыления воды, а также использование поверхностно-активных веществ (смачивателей), повышающих способность влаги связывать частицы пыли. Кроме того, важным параметром является время контакта пылевоздушного потока с водной завесой, что напрямую зависит от конструкции узла разгрузки и скорости потока [9, 10, 42-44].

На фактическую пылевую ситуацию в зоне вагоноопрокидывателя также существенно влияет техническое состояние оборудования. Например, изношенные форсунки, засоры в трубопроводах, недостаточное давление воды в системе орошения или отключение отдельных участков пылеулавливающих систем приводят к резкому снижению эффективности пылеподавления. Не менее значимым фактором является организация воздухообмена в здании

вагоноопрокидывания: при недостаточной вытяжке и плохой локализации пыли возможно её вторичное распространение по производственным помещениям [57].

Комплексная оценка запыленности в зоне разгрузки угля должна учитывать как физико-механические характеристики материала и режим разгрузки, так и аэродинамические условия и состояние пылеулавливающих и орошающих систем. Это позволяет разрабатывать технически обоснованные и эффективные меры по снижению пылевой нагрузки в воздухе рабочей зоны и обеспечению безопасности труда персонала на коксохимических предприятиях.

2.4. Методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий на основе учета дисперсного состава пылевого аэрозоля

Оценку пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли PM10 и PM2,5 в рабочей зоне предлагается осуществлять путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов, увеличивающих общую пылевую нагрузку, если в массе витающей пыли присутствуют фракции PM10 и PM2,5 [34-36].

Введем коэффициент K_i - коэффициент учета фракционного состава респираторной пыли PM10 и PM2,5

$$K_i = \frac{D_i}{100}, \quad (2.11)$$

где D - процентное содержание фракции пыли;

$i = 1$ – фракция пыли PM2,5;

$i = 2$ – фракция пыли PM10.

Коэффициент K_i изменяется от 0 до 1: значение $K_i = 0$, если данная фракция отсутствует в общей массе пыли; $K_i = 1$, если вся масса пыли состоит из данной фракции.

Расчет пылевой нагрузки (ПН) на органы дыхания рабочего (или группы

рабочих, если они выполняют аналогичную работу в одинаковых условиях) рассчитывается исходя из фактических среднесменных концентраций АПФД в воздухе рабочей зоны, объема легочной вентиляции (зависящего от тяжести труда) и продолжительности контакта с пылью [34-36]:

$$ПН = K_{cc}NTQ, \quad (2.12)$$

где K_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м³;

N – число рабочих смен в календарном году;

T – количество лет контакта с АПДФ;

Q – объем легочной вентиляции за смену, м³.

С учетом коэффициентов K_1 и K_2 формула (2.11) примет вид:

$$ПН_{10+2.5} = K_{cc}NTQ(1 + 0,5K_1 + 0,25K_2). \quad (2.13)$$

В формуле (2.13) коэффициент K_1 и K_2 отражают увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций РМ10 и РМ2,5. Если фракция РМ2,5 отсутствует, но вся масса пыли состоит из фракций РМ10, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,25 раз. Если фракция пыли РМ10 отсутствует, и вся масса пыли состоит из фракций РМ2,5, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,5 раза. При отсутствии фракций РМ10 и РМ2,5 пылевая нагрузка рассчитывается по стандартной формуле (2.12) [34-36].

Выводы по второй главе

1. АО «Qarmet» представляет собой промышленный комплекс с завершённым металлургическим циклом, структура которого охватывает все ключевые стадии переработки сырья и выпуска готовой продукции. В состав предприятия, помимо основных металлургических переделов, входят энергетические объекты — ТЭЦ-ПВС и ТЭЦ-2, обеспечивающие технологические процессы тепловой и электрической энергией.

2. Производственная схема предприятия включает последовательные этапы: коксохимическое производство, агломерационный

передел, доменную плавку с получением чугуна, сталеплавильное производство, а также прокатные процессы. Номенклатура выпускаемой продукции охватывает широкий сортамент металлопродукции, включая горячекатаный и холоднокатаный прокат, материалы с различными видами защитных покрытий (оловянным, гальвальномовым, цинковым, алюмоцинковым и полимерным), профилированные листы, электросварные трубы и сортовой прокат. Дополнительно предприятие осуществляет выработку энергетических ресурсов, необходимых для устойчивого функционирования производственной инфраструктуры.

3. Для коксования используются угли шахт Абайская, Костенко и разрезов Экибастуз, Уголь Куу Чекинский (Нура). Влажность используемых углей изменяется в диапазоне от 6.5% до 8.1%, зольность – от 42,0% до 4,2 %. Уровни запыленности при разгрузке влажного угля с помощью вагоноопрокидывателя на предприятии 1. АО «Qarmet» составляют 40 мг/м³ и более. При этом дисперсный состав пыли, образуемой во время разгрузки угля с помощью вагоноопрокидывателя, охватывает диапазон частиц от 0,01 до 300 мкм.

4. Гранулометрические функции пыли при разгрузке угля показывают, что размеры частиц, витающих в здании вагоноопрокидывателя, варьируются в диапазоне от 0,1 мкм до 22,5 мкм, при этом модальный размер составляет 3-4 мкм. Содержание респирабельной пыли размером до 7,5 мкм достигает до 95 %, которая представляет опасность для здоровья, что считается очень высоким значением; для сравнения, в угольных шахтах аналогичные фракции составляют всего 3–5 %.

5. Среди факторов, оказывающих влияние на уровень запыленности воздуха и дисперсный состав пылевого аэрозоля в зонах разгрузки угля на участке вагоноопрокидывания, можно выделить три основные группы. Первая группа включает факторы, определяющие интенсивность разрушения угольной массы при выгрузке и, как следствие, объём образующейся пыли различного гранулометрического состава. Вторая группа охватывает факторы,

влияющие на скорость перехода пылевых частиц в аэрозольное состояние, а третья — параметры, определяющие эффективность последующего пылеподавления, в том числе при применении орошающих систем.

6. Разработана методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли PM10 и PM2,5 путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов K_1 и K_2 , отражающих увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций PM10 и PM2,5.

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СМАЧИВАЕМОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ, ЭЛЕМЕНТНОМУ СОСТАВУ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ, КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАХВАТА ПЫЛИ ЖИДКОСТЬЮ

3.1 Исследования эффективности смачиваемости угольной пыли в зависимости от размера частиц, концентрации поверхностно-активных веществ и температуры раствора смачивателя

Каменный уголь, наряду с бурым остается в современной экономике мира стратегическим ресурсом, наращивание объемов добычи которого наблюдается и планируется, как в нашей стране, так и в других угледобывающих странах мира [43]. Основными негативными факторами, сопровождающими технологические процессы, связанные с добычей угля, его транспортировкой, погрузочно-разгрузочными работами, хранением и переработкой углей являются значительное пылеобразование с последующим пылевыделением и пылеотложением [41].

Поскольку уголь является гидрофобным веществом и плохо смачивается водой, то для снижения содержания пыли при технологических процессах по переработке углей, используют пылеподавляющие растворы разного состава [41]. Целью лабораторных исследований являлась оценка эффективности смачивания каменных и бурых углей в зависимости от концентрации и температуры раствора смачивателя.

Смачивание является разновидностью сорбционно-адгезионного взаимодействия на границах раздела трех фаз: жидкости, газа и твердого тела [26]. Если межфазное (молекулярное) сцепление между твердым телом и жидкостью больше межмолекулярного взаимодействия в жидкости, то произойдет смачивание поверхности твердого тела. Уменьшение пыления угольной массы можно обеспечить за счет применения смачивающих добавок к основному веществу (воде) [41, 42]. При этом уменьшаются величины краевого угла (θ) и теплоты смачивания (W), определяемые соотношениями по закону Юнга (уравнение 3.1) и уравнению Думанского А.В (уравнение 3.2):

$$\sigma_{тг} = \sigma_{тж} + \sigma_{жг} \cos\theta, \quad (3.1)$$

где $\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$, $\sigma_{жг}$ – поверхностные натяжения на границах раздела твердое тело–

газ; твердое тело–жидкость; жидкость–газ; θ – краевой угол в системе твердое тело–жидкость–газ.

$$W = S\sigma_{тж}\cos\theta, \quad (3.2)$$

где S – площадь смачиваемой поверхности.

Теплота смачивания – это энергия, которая выделяется в виде тепла (процесс экзотермический) и равна разности поверхностной энергии при смачивании и до него. Теплота смачивания характеризует интенсивность взаимодействия сухого твердого вещества с жидкостью. Если вещество не смачивается, ($\theta > 90$ градусов), то тепло поглощается и $W < 0$.

Смачивающие добавки увеличивают эту интенсивность. При этом, растет скорость процесса уменьшения пыления и уменьшается его время.

В соответствии с законом сохранения энергии уменьшение поверхностной энергии системы сопровождается превращением ее в другие виды энергии. Таким образом, величина поверхностной энергии определяет неравновесное состояние и нестабильность системы [43].

Появление пыли является одним из проявлений такого отсутствия равновесия и протекания быстрых и часто весьма вредных процессов, препятствующих нормальному ведению технологических процессов и ухудшающих общее экологическое состояние.

Для проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности смачивания были выбраны каменные угли средней стадии метаморфизма (марки Ж, ГЖ) и бурые угли (марка ЗБВ). Характеристика исследуемых углей представлена в табл. 3.1.

Были подготовлены пробы угольной пыли (К1-К5) размером 0,5-1,0 мм. Масса одной пробы составляла 1 г. В качестве смачивателя использовался смачиватель СП-01 (ТУ 2481-002-95498669-2008).

Физико-технические параметры смачивателя СП-01 характеризуются следующими показателями. Продукт представляет собой однородную жидкость, не содержащую видимых механических включений, признаков расслоения или осадка.

Таблица 3.1 – Качественные показатели углей

№ п/п	Образцы углей	Марка угля	Влажность угля, %	Выход летучих веществ, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Теплотворная способность, кДж/кг (ккал/кг)
1	К1	Ж	2,4	30,9	5,0	0,44	36317,12 (8680)
2	К2	Ж	2,8	32,1	8,3	0,48	35480,32 (8480)
3	К3	ГЖ	4,0	41,7	37,8	0,3	26986,8 (6450)
4	К4	ГЖ	4,11	41,7	29,0	0,3	26986,8 (6450)
5	К5	Б	7,8	46,82	10,40	0,71	24175 5774

Плотность вещества при температуре 20 °С составляет 1050 кг/м³. Кинематическая вязкость исходного (неразбавленного) реагента при тех же температурных условиях равна 53,56 мм²/с, тогда как для водного раствора с концентрацией 0,5 % данный показатель снижается до 0,8832 мм²/с [43].

Водородный показатель (рН) водного раствора с массовой долей реагента 1 % находится в диапазоне 7,0–10,0, что указывает на нейтральную или слабощелочную реакцию среды. Температура потери текучести (застывания) составляет –30 °С, что позволяет использовать продукт в условиях пониженных температур. Поверхностное натяжение водного раствора смачивателя достигает 39,24 мН/м, что свидетельствует о выраженных смачивающих свойствах и способности реагента эффективно снижать межфазное натяжение [43].

Результаты смачивания угольной пыли при различных концентрациях смачивателя представлены в табл. 3.2 и на рис. 3.1.

Таблица 3.2 – Время осаждения пыли в растворе смачивателя, секунды

№ п/п	Образцы углей	Концентрация смачивателя, %			
		0	0,3	0,5	1,0
1	К1 (марка Ж)	Не оседает	25	15	10
2	К2 (марка Ж)	Не оседает	12	10	6,65
3	К3 (марка ГЖ)	Не оседает	10	8	6
4	К4 (марка ГЖ)	Не оседает	25	20	15
5	К5 (марка Б)	Нет данных	7	5,63	4,65

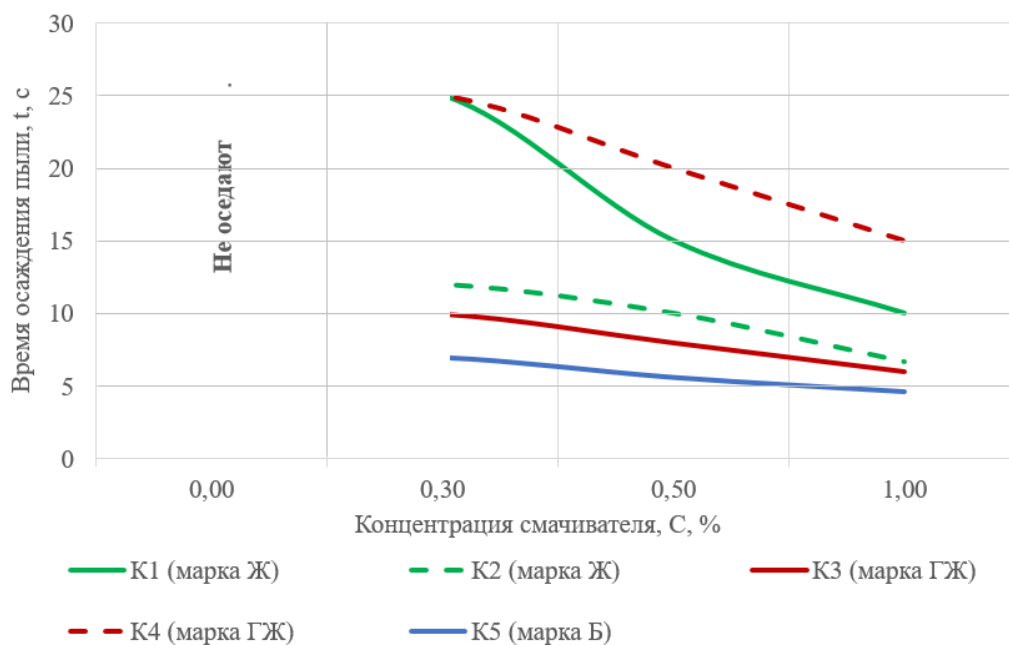


Рисунок 3.1 – Зависимость времени осаждения пыли от концентрации смачивателя

Анализ данных, представленных на рис. 3.1, показывает, что время осаждения пыли бурых углей меньше, чем для пыли каменных – от 2-х до 5 раз, причем, если время осаждения пыли бурых углей уменьшается в 1,5 раза при увеличении концентрации смачивателя от 0,3% до 1,0 %, то для пыли каменных углей уменьшение этого времени равно 2,5 раз. Это может свидетельствовать о том, что сорбция смачивателя пылью каменных углей при концентрациях смачивателя от 0,3% до 1% происходила ниже максимально возможной по сорбционной емкости смачивателя угольной пылью [42, 43].

Для дальнейших исследований была выбрана пыль бурых углей, размер фракций составлял до 43 мкм, масса одной пробы пыли равнялась 1 г. Были выбраны концентрации смачивателя, удовлетворяющие сорбционной емкости пыли в отношении поверхностно-активных веществ. Температура раствора смачивателя составляла: 60, 40, 22 и 5°C. Время осаждения пыли представлено в табл. 3.2, по значениям которого и формулам (3.1) и (3.2) рассчитаны краевой угол смачивания, теплота смачивания и поверхностное натяжение (табл. 3.3). Величина поверхностного натяжения для воды принимается равной 73 мН/м, средняя теплота смачивания угля водой принимается равной 11,6 кал/г

$(48,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/кг})$ [42, 43].

Таблица 3.3 – Результаты расчета характеристик обработки угольной пыли при применении смачивающих добавок

№ п/п	Температура раствора, Т		Концентрация смачивателя, С, %	Время смачивания, t, с	Теплота смачивания, $W \cdot 10^3$, Дж/кг	Краевой угол смачивания, θ , градус	Поверхностное натяжение раствора, σ , мН/м
	°С	К					
1	60	333	0	3600	3,26	89	67,17
2	40	313	0	н/см	-20,38	94	69,55
3	22	295	0	н/см	-58,16	101	72,75
4	5	278	0	н/см	-76,57	104	75,62
5	60	333	1,5	28,9	53,55	58,3	58,7
6	40	313	1,5	34,4	57,74	62	60,1
7	22	295	1,5	35,2	67,36	62,5	60,9
8	5	278	1,5	36	70,29	63	62,1
9	60	333	2,5	29,8	41,21	59	52,43
10	40	313	2,5	26	40,58	55	51,5
11	22	295	2,5	28,5	56,90	58	55,2
12	5	278	2,5	37,1	53,55	64	69,2
13	60	333	3,5	10,1	35,98	28	41,6
14	40	313	3,5	16,2	30,96	30,6	42,8
15	22	295	3,5	16	27,82	30,5	42,5
16	5	278	3,5	22,3	35,15	42	49,8

Примечание: н/см – не смачивается.

Важным выводом из анализа данных табл. 3.2 следует тот факт, что в чистой воде пыль бурых углей не оседает, и только при температуре воды 60°С пыль оседает в течение одного часа, что свидетельствует о необходимости добавления в воду поверхностно-активных веществ [43].

Анализ графических зависимостей (рис. 3.2) показывает, что в диапазоне исследованных значений концентраций и температур смачивателя концентрация является более сильным фактором для снижения поверхностного натяжения по сравнению с температурным фактором [59, 60]. При увеличении температуры от 5 до 60°С поверхностное натяжение снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с

увеличением температуры смачивателя [43].

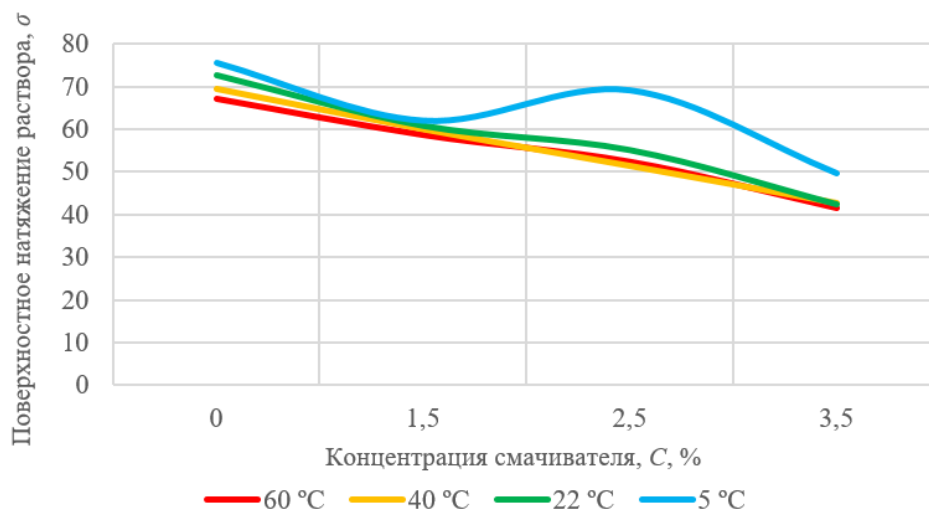


Рисунок 3.2. – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации раствора смачивателя при разных температурах раствора

Возрастание роли каменного и бурого угля, как стратегического ресурса, связано с востребованностью угля в металлургической, топливно-энергетической, химической и др. отраслях. Добыча угля сопровождается такими негативными факторами для атмосферы горных предприятий и окружающей среды, как газовыделение, пылевыведение, пылеотложение. Но и вспомогательные операции, связанные с транспортировкой полезных ископаемых, включающие погрузочно-разгрузочные работы, складирование, хранение и переработку полезных ископаемых, также сопровождаются значительными газопылевыведениями, способными привести к самовозгоранию углей, вспышкам и взрывам метана, пожарам, особенно свойственным для конвейерных лент по транспортировке угля [42]. На горно-металлургических предприятиях запыленность на рабочих местах приводит к заболеваниям легочной этиологии у рабочих, в окружающей среде выделяющийся в атмосферу метан создает парниковый эффект, а значительные пылевыведения загрязняют земельные и водные объекты.

Согласно анализу современных исследований, объекты металлургического производства (где происходят погрузочно-разгрузочные работы и транспортировка угля) являются источниками пыли на всех этапах

единой технологической цепочки, от разгрузки угля до подачи его в печь, оказывая значительное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье работников.

Для пылеподавления на предприятиях металлургической отрасли, где используется уголь, можно рассмотреть использование поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВ представляют собой химические вещества, которые могут использоваться для снижения образования пыли путем уменьшения поверхностного натяжения жидкости или других веществ, с которыми они взаимодействуют.

ПАВ могут быть использованы при погрузочно-разгрузочных работах и транспортировке угля на металлургических предприятиях в процессах пылеподавления для создания пленок или препятствий, которые помогают удерживать пылевые частицы на поверхности и предотвращать их рассеивание в атмосферу рабочей зоны и окружающей среды.

Это может способствовать улучшению условий труда и снижению выбросов пыли в окружающую среду. Конкретный выбор и применение определенных ПАВ для пылеподавления и пылеосаждения на металлургических предприятиях требует индивидуального подхода в том числе в вопросах применения эффективных способов вентиляции.

В рамках проведения экспериментальных исследований, направленных на оценку смачиваемости пылевых частиц бурых углей, был осуществлён отбор проб осевшей пыли в зонах разгрузки угольного материала, расположенных под навесом складского хозяйства. Совокупная масса полученной пылевой пробы составила 253,42 г. Для определения гранулометрического состава и последующего разделения материала по фракциям использовался метод ситового анализа, реализованный с применением вибрационной установки, обеспечивающей равномерное и воспроизводимое распределение частиц по размерам [60, 61]. В соответствии с размером ячеек сит рассеиваемая пыль распределялась по диапазонам, мм: +1,0; 0,8÷1,0; 0,5÷0,8; 0,25÷0,5; 0,1÷0,25; 0,071÷0,1; 0,04÷0,071; 0,04÷0,071; -

0,04. В верхнем сите осталась пыль, размером больше 1 мм. Количество пыли по фракционному составу представлено в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Массовые и относительные значения фракционного состава пыли

№ п/п	Размер сита, мм	Масса, г	Относительные значения, %
1	+1,0	54,72	21,41
2	0,8÷1,0	6,21	2,43
3	0,5÷0,8	11,94	4,67
4	0,25÷0,5	15,43	6,04
5	0,1÷0,25	26,88	10,52
6	0,071÷0,1	25,27	9,89
7	0,04÷0,071	70,7	27,66
8	-0,04	42,27	16,54
Всего:		253,42	99,992

На основании данных, приведённых в таблице, был сформирован график распределения частиц по размерам (рис. 3.3). Анализ полученной зависимости показывает, что преобладающая доля пылевой массы сосредоточена во фракции с размером частиц от 0,04 до 0,071 мм, величина которой составляет 70,7 г. Следующей по количественному содержанию является наиболее мелкая фракция с размером частиц менее 0,04 мм, масса которой равна 42,27 г. Менее выраженная доля приходится на диапазон размеров 0,2–0,25 мм, где зафиксировано 26,88 г пылевого материала. Установленная картина распределения свидетельствует о доминировании тонкодисперсных частиц в исследуемой пробе .

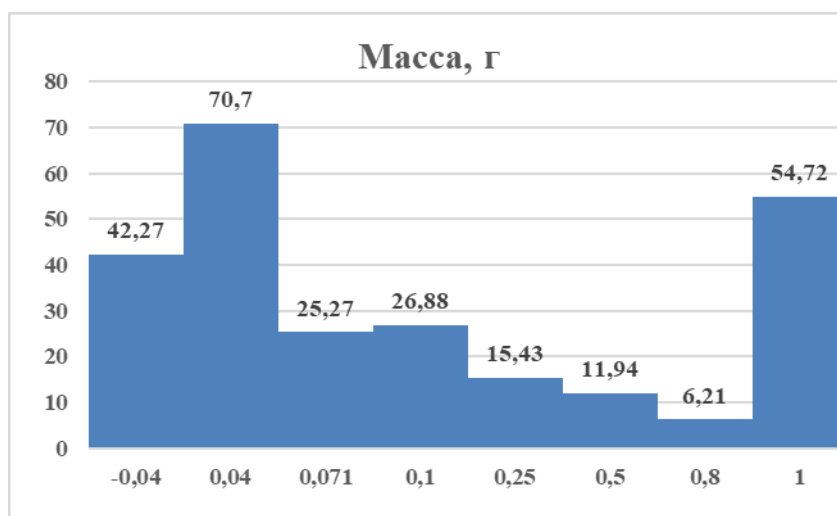


Рисунок 3.3 – Распределение массы пыли по размерам фракций

В качестве поверхностно-активного реагента при проведении эксперимента применялся смачиватель СП-01. Приготовление рабочих растворов осуществлялось дозированием исходного продукта с использованием мерных шприцев объёмом 1 и 5 см³, что обеспечивало требуемую точность задания концентраций. В исследовании были рассмотрены следующие значения массовой доли реагента, %: 0; 0,05; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 (рис. 3.4).

Для реализации экспериментальной серии было подготовлено 27 лабораторных ёмкостей с растворами различной концентрации. Для каждой концентрации формировались параллельные пробы, в которые помещались навески пылевого материала массой по 1 г. Образцы были представлены тремя ранее выделенными гранулометрическими фракциями: с размером частиц менее 0,04 мм; в диапазоне 0,04–0,071 мм; а также 0,2–0,25 мм. Такое построение эксперимента позволило сопоставить влияние концентрации смачивателя на характеристики взаимодействия раствора с пылевыми частицами различной дисперсности (рис. 3.4).

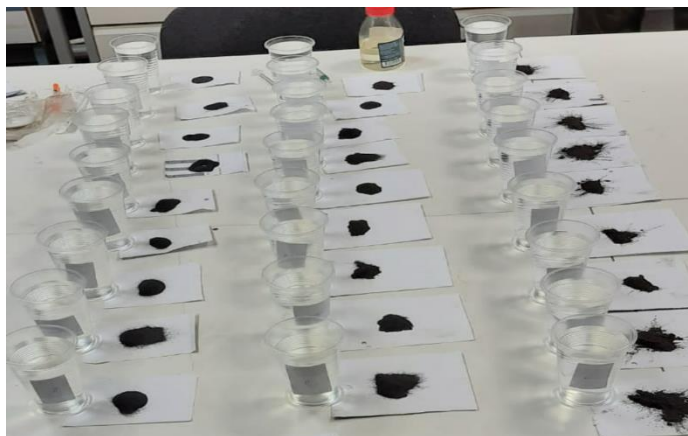


Рисунок 3.4 – Растворы смачивателя и пробы пыли

Подготовленные образцы пыли помещались в лабораторные стаканы с заранее приготовленными растворами смачивателя, после чего фиксировалась продолжительность интервала, необходимого для полного осаждения частиц на дно ёмкости. Контрольные наблюдения показали, что в отсутствие реагента, при использовании чистой воды, выраженного оседания пыли не происходит,

что указывает на недостаточную смачиваемость частиц. Результаты измерений и соответствующие графические зависимости, отражающие изменение времени осаждения пылевых фракций в зависимости от концентрации раствора смачивателя, представлены на рис. 3.5.

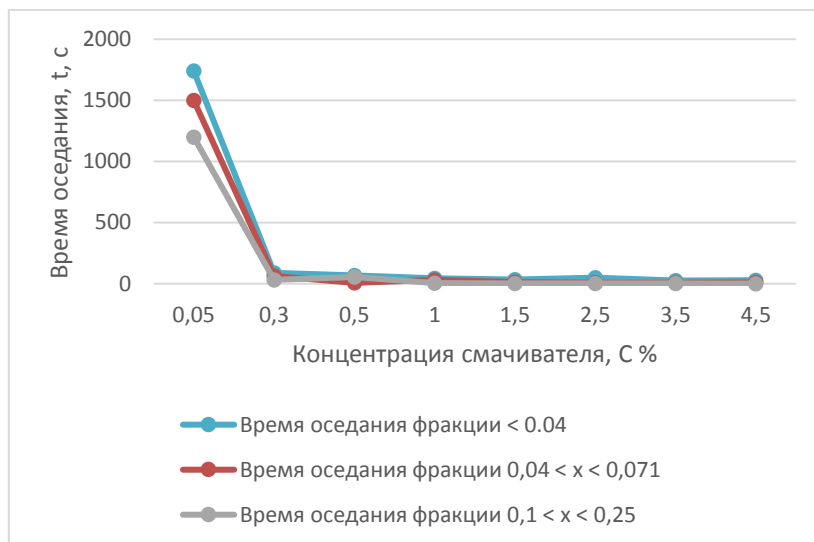


Рисунок 3.5 – Время осаждения пыли в зависимости от концентрации раствора смачивателя и размера частиц пыли

Анализ экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 3.5, показывает, что при увеличении концентрации раствора смачивателя наблюдается выраженное сокращение времени, необходимого для взаимодействия жидкости с пылевыми частицами. Наиболее заметное изменение данного параметра зафиксировано при концентрации смачивателя 0,3 %, где происходит резкое ускорение процесса смачивания. Указанная закономерность проявляется для всех исследованных фракций пыли, независимо от диапазона размеров частиц.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии пороговой области концентраций, при достижении которой поверхностно-активные свойства раствора обеспечивают существенное повышение эффективности увлажнения пылевого материала. Практическое значение данного эффекта заключается в возможности оптимизации параметров пылеподавления, поскольку снижение времени смачивания напрямую связано с интенсификацией осаждения тонкодисперсных частиц и уменьшением их содержания в воздушной среде.

Это позволяет рассматривать концентрацию 0,3 % в качестве рационального режима применения смачивателя СП-01 при реализации процессов орошения.

В производственных условиях горно-металлургических предприятий комплекс мероприятий по снижению запыленности традиционно включает использование систем орошения, локализацию источников пылеобразования посредством укрытий, организацию пылеотсоса, а также эксплуатацию установок пылеулавливания. Среди указанных методов орошение занимает особое место благодаря технологической универсальности и возможности воздействия непосредственно на взвешенные частицы. Эффективность данного способа существенно возрастает при введении в воду поверхностно-активных добавок, способных снижать межфазное натяжение и улучшать смачивающие характеристики жидкости.

Результаты выполненных исследований показывают, что для пыли бурых углей, характеризующейся значительной долей мелкодисперсных частиц, наиболее выраженное сокращение времени смачивания достигается при концентрации раствора СП-01, равной 0,3 %. Данный эффект устойчиво проявляется во всём исследованном диапазоне размеров частиц, что подтверждает универсальность выбранного режима. Установленная зависимость может рассматриваться как обоснование для практических рекомендаций по применению смачивателя СП-01 в системах пылеподавления, где указанная концентрация обеспечивает требуемую эффективность увлажнения и осаждения пылевых аэрозолей.

В проблеме борьбы с угольной пылью на горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятиях гидрообеспыливание является основой противопылевого комплекса мероприятий, повышением эффективности которых является химреагентная обработка воды. Проведены исследования смачиваемости угольной пыли пластов марок Ж, ГЖ, Б. По результатам времени осаждения смачиваемость пыли бурых углей растворами поверхностно-активных веществ лучше от 2-х до 5 раз смачиваемости этими же растворами пыли каменных углей марок Ж, ГЖ.

Сорбция смачивателя пылью каменных углей при концентрациях смачивателя от 0,3% до 1% происходила ниже максимально возможной по сорбционной емкости смачивателя угольной пылью.

Проведены исследования по оценке эффективности смачиваемости угольной пыли растворами смачивателя температурой от 5 до 60 °С. Установлено, что поверхностное натяжение во всем диапазоне исследуемых температур снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя. Полученные результаты можно использовать для оценки растворов, планируемых для термовлажностной химреагентной обработки угольной массы с целью связывания пыли.

3.2 Сканирующая электронная микроскопия угля различных марок, элементный состав образцов угля, поверхности пылевых частиц

Целью экспериментальных исследований явилось выявление отличительных особенностей химического состава углей разных стадий метаморфизма и оценка влияния состава угля на смачиваемость угольной поверхности пыли. Составы и структуры поверхностных слоев угольных частиц были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии JSM-7600F с системой микроанализа (ЭДС), производства OXFORD и программным обеспечением AZTEC рис. 3.6 (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Технические характеристики исследуемых образцов угольных пластов

№ п/п	Образцы углей	Марка угля	Влажность угля, %	Выход летучих веществ, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Теплотворная способность, кДж/кг (ккал/кг)
1	2	3	4	5	6	7	8

1	К1 (пласт Е-1, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,4	30,9	5,0	0,44	36317,12/(8680)
2	К2 (пласт Е-5, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,8	32,1	8,3	0,48	35480,32/(8480)
3	К3 (пласт «Поленовский, шахта им. С.М. Кирова)»	ГЖ	4,0	41,7	37,8	0,3	26986,8/(6450)
4	К4 (пласт «Болдыревский», шахта им. С.М. Кирова)»	ГЖ	4,11	41,7	29,0	0,3	26986,8/(6450)
5	К5 (бурый уголь)	ЗБВ	7,8	46,82	10,40	0,71	24175/(5774)
6	К6 (пласт I ₆ , шахта «Алмазная»)	А	5,4	9,0	9,8	1,7	34183,28/(8170)
7	К7 (пласт 66, шахта «Талдинская-Западная 1»)	ДГ	9,5	38,5	13,37	0,32	31463,68/(7520)
8	К8 (энергетический, шахта Грамотеинская)»	Д	7,5	43	10,5	0,3	31463,68/(7520)
9	К9 (пласт К-5, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,3	30,3	7,6	0,51	36149,76/(8640)
10	К10 (бурый уголь)	ЗБВ	7,8	46,82	10,40	0,71	24175/(5774)
11	К11 (бурый уголь)	ЗБВ	7,8	46,82	10,40	0,71	24175/(5774)

Химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается для углей различных стадий метаморфизма (табл. 3.6). Образцы углей низкой стадии метаморфизма имеют повышенное содержание атомов кислорода. Образцы углей высокой стадии метаморфизма содержат больше углерода.

Таблица 3.6 – Элементный состав образцов угля

Код образца	Марка	А ^c , %	W ^p , %	П, %		Содержание элементов, % (атомное)									Атомное отношение, О/С	
				От и до	max	С	О	S	Ti	Ca	Si	Al	Na	K		
К5	ЗБВ	10,4	46,8	20–30	60	74,5	25,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,340
К10	ЗБВ	9,5	45,2	20–30	60	79,6	20,4	—	—	—	—	—	—	—	—	0,260
К11	ЗБВ	9,0	44,8	20–30	60	81,7	18,1	0,1	—	—	—	—	—	—	—	0,220
К8	Д	10,5	43,0	20–25	40	82,7	17,1	—	—	—	0,1	0,1	0,1	—	—	0,210
К7	ДГ	13,37	38,5	15–20	30	85,7	14,1	0,1	—	—	0,1	0,1	—	—	—	0,160
К3	ГЖ	37,80	41,7	5–10	20	89,0	10,7	0,1	—	—	0,1	0,2	—	—	—	0,120
К4	ГЖ	29,00	41,7	5–10	20	88,5	11,4	0,1	—	—	—	0,1	—	—	—	0,130
К1	Ж	5,00	30,9	5–10	25	93,7	6,2	0,1	—	—	—	—	—	—	—	0,066
К2	Ж	8,30	32,1	5–10	25	92,7	6,1	0,2	—	—	0,6	0,4	0,1	0,1	—	0,066
К9	Ж	7,60	30,3	5–10	25	94,2	5,0	0,3	—	—	0,3	0,2	—	—	—	0,053
К6	А	9,80	9,0	5–7	40	95,3	3,7	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	—	—	—	0,039
К12	—	—	—	—	—	79,3	20,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	—	—	—	0,254

K13	—	—	—	—	—	75,8	22,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,6	Zn 0,3	Cu 0,4	0,294
-----	---	---	---	---	---	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----------	-----------	-------

Примечание: A^c — зольность, %; W^p — выход летучих веществ, %; П — общая пористость, %; K12, K13 — пыль (цех углеподготовки, Казахстан).

Расчетные значения коэффициента атомного отношения кислорода к углероду для проб пыли, отобранных из системы аспирации здания вагоноопрокидывателя (пробы K12 и K13), показывают, что эта пыль образована из угля марки Б или Д (рис. 3.6).

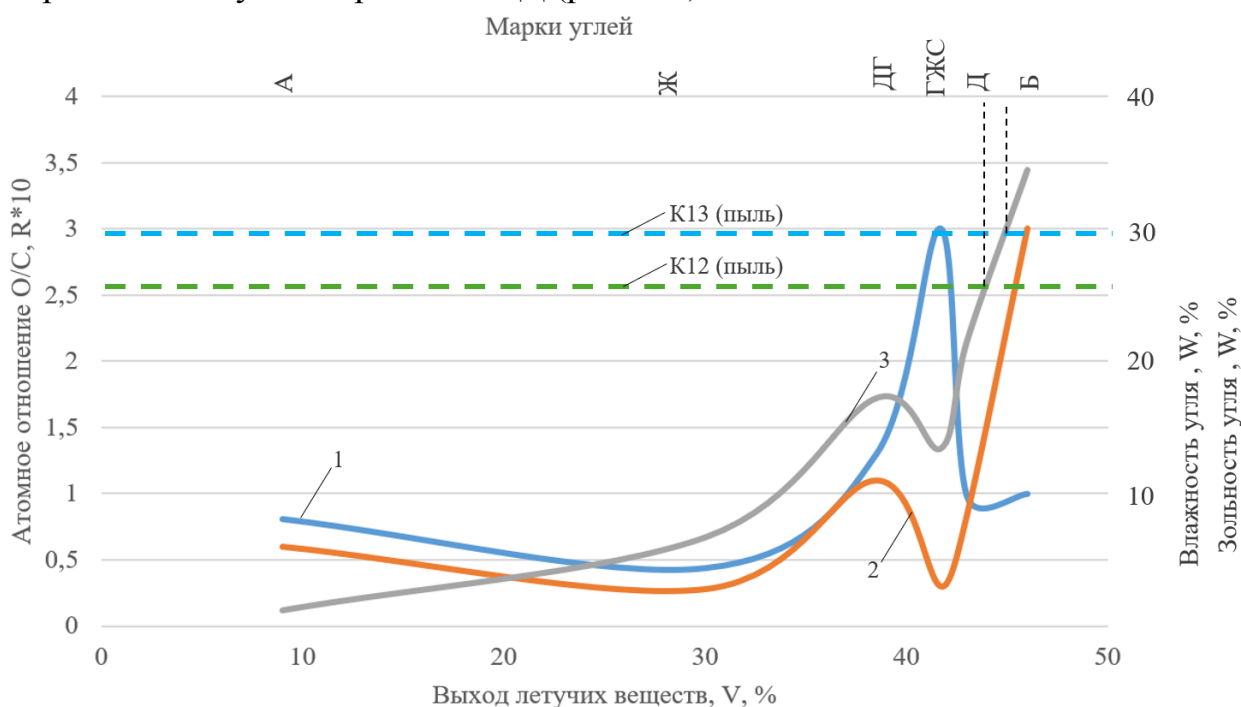


Рисунок 3.6 – Зависимость атомного отношения кислорода к углероду (R) от марки угля

1 - зольность угля, %; 2 - влажность угля, %; 3 - зависимость атомного отношения кислорода к углероду (R); K12 - расчетное значение атомного отношения O/C частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагоноопрокидывателя (образец №1); K13 - расчетное значение атомного отношения O/C частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагоноопрокидывателя (образец №2).

С целью комплексной характеристики условий труда по пылевому фактору в районе эксплуатации вагоноопрокидывателей выполнено исследование химического состава и дисперсных характеристик частиц угольной пыли. Аналитические исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа, что позволило получить детализированные изображения микроструктуры частиц и оценить их морфологические особенности.

Результаты последующей статистической обработки

экспериментальных данных, иллюстрируемые на рис. 3.8, представлены в формате микрофотографий, полученных при увеличении, эквивалентном 100-кратному масштабу. Такой подход обеспечил возможность наглядной оценки геометрических параметров и распределения частиц по размерам.



Рисунок 3.7 – Сканирующий электронный микроскоп JSM-7600F

Многослойная карта распределения химических элементов в угле (образец К1, марка Ж) представлена на рис. 3.8, из которой видно взаимодействие всех химических элементов, находящихся в пробе пыли, между собой.

Многослойная карта ЭДС 76

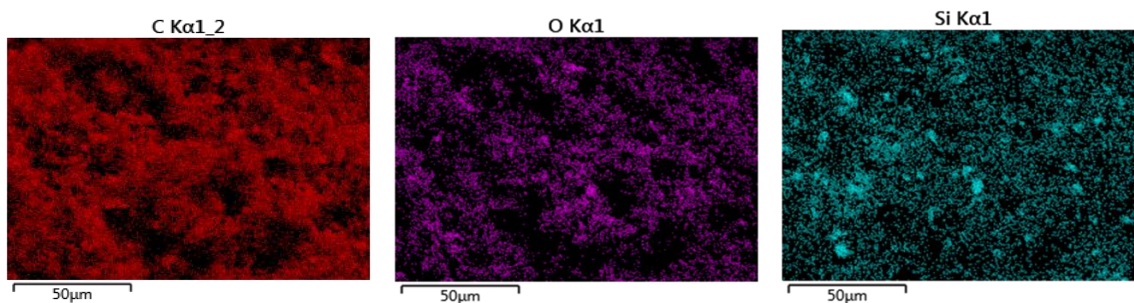
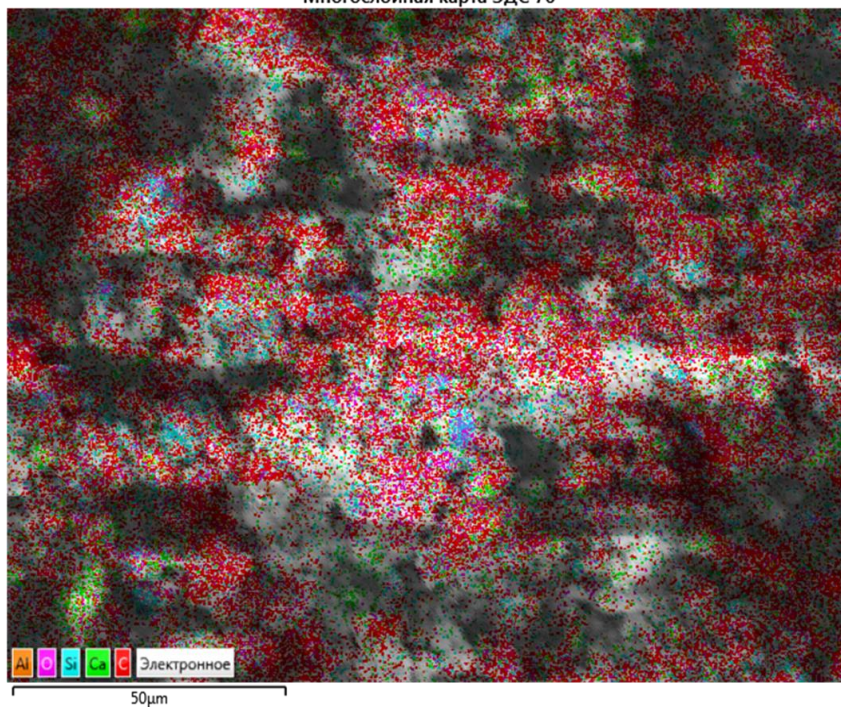
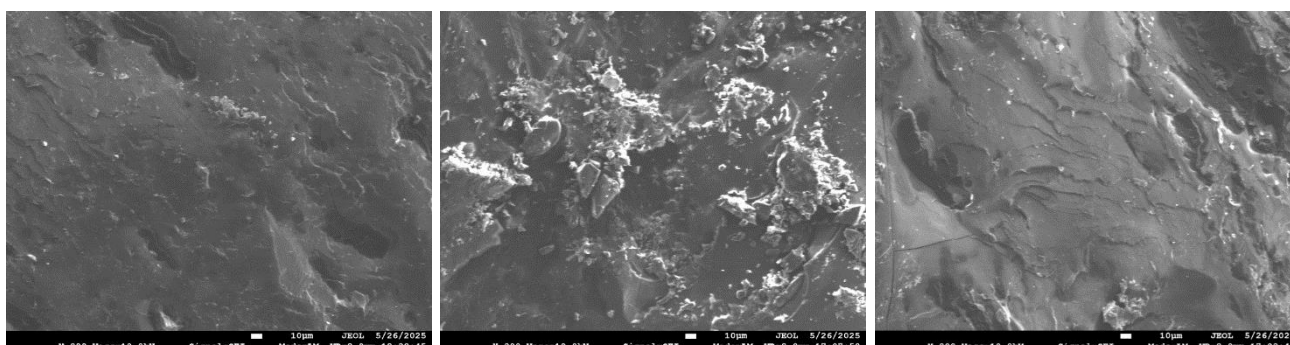


Рисунок 3.8 – Многослойная карта состава химических элементов в пробе
ПЫЛИ

Поверхности образцов пыли разных марок угля показаны на рис. 3.9.



а

б

в

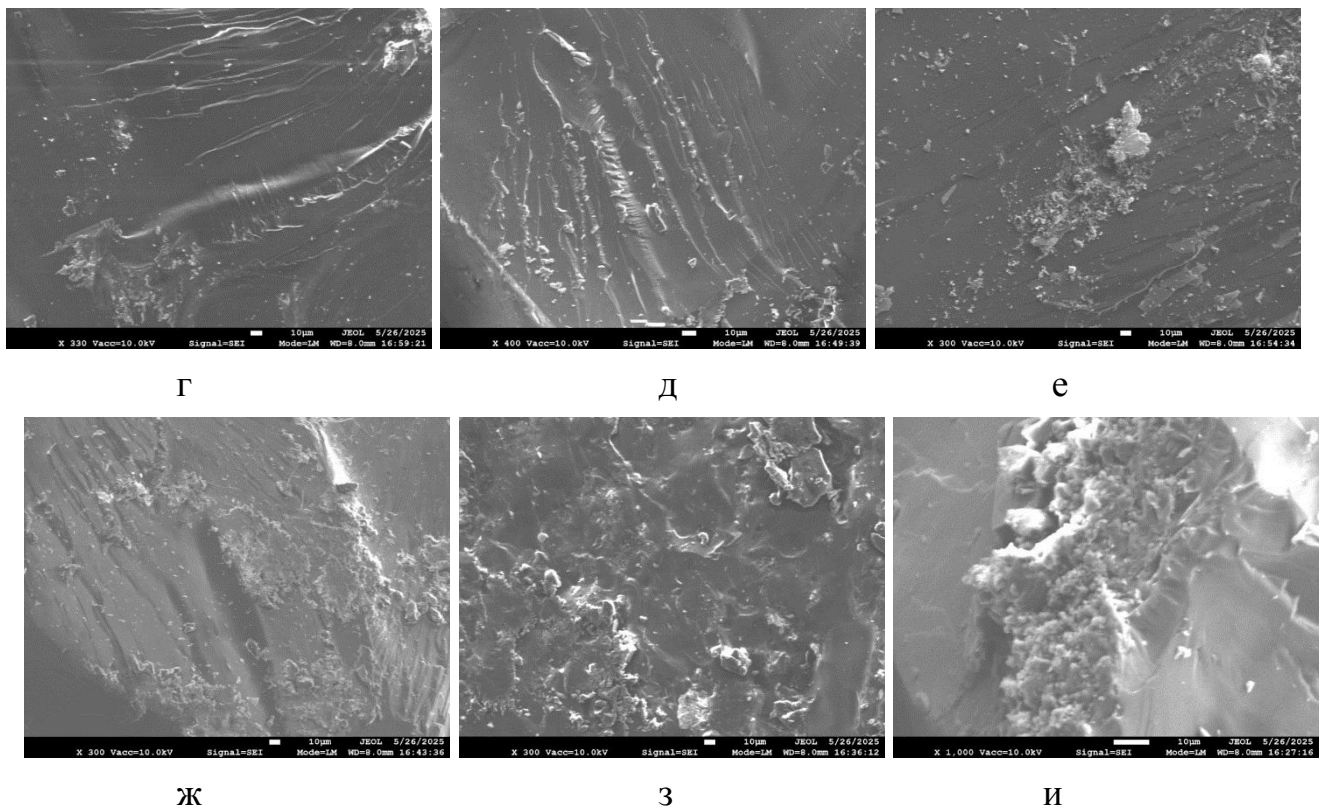


Рисунок 3.9 – Снимки угля марки угля под сканирующим электронным микроскопом

где: а – пласт Е1 (марка угля Ж); б – пласт Е5 (марка угля Ж); в – пласт Болдыревский (марка угля ГЖ); г – пласт Поленовский (марка угля ГЖ); д – шахта Алмазная, (марка угля А); е – шахта Талдинская – Западная 1 (марка угля ДГ); ж – шахта Грамотеинская (марка угля Д); з – пласт К5, шахта Осинниковская (марка угля Ж); и – шахта Шубакроль Комир Казахстан (марка угля ЗБВ).

3.3. Исследование процесса седиментации частиц угля в зависимости от концентрации смачивателя и действия гравитационных сил

Для пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями предлагается применять орошение с использованием туманообразователей. При применении туманообразователей имеет место седиментационное пылеулавливание. Были проведены эксперименты по оценке скорости седиментации пылевых частиц в зависимости от концентрации раствора смачивателя. Были выбраны пять диапазонов размеров пылевых частиц (x , мм): $x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$; $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$. Для

седиментации частиц использовались водные растворы шести концентраций смачивателя СП-01. Замерялось время осаждения пылевых частиц. Было получено время седиментации каждой фракции в зависимости от концентрации раствора смачивателя (табл.3. 7).

По данным табл. 3.7 построены графики зависимостей времени осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01 (рис. 3.12).

Таблица 3.7 – Время седиментации пылевых частиц бурого угля

№ п/п	Концентрация смачивателя, %	Время осаждения пылевых частиц, с, по фракционному составу (x), мм				
		$x < 0,04$	$0,04 \leq x < 0,071$	$0,071 \leq x < 0,1$	$0,1 \leq x < 0,25$	$0,25 \leq x < 0,5$
1	0,05	1450	1300	980	520	240
2	0,1	670	530	220	192	75
3	0,15	295	217	198	114	70
4	0,2	217	160	150	56	55
5	0,25	200	144	135	31	20
6	0,3	98	73	70	26	19

Анализ данных показывает, что для крупных (последних трех диапазонов: $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$) фракций пыли резкое изменение времени осаждения частиц происходит при концентрации смачивателя 0,1%. Среднее время осаждения этих фракций пыли равно 162 с. Для более мелких фракций пыли ($x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$) время осаждения больше и составляет в среднем 600 с, что 3,7 раз больше, чем для крупных частиц пыли. Наблюдаемая закономерность может быть интерпретирована с позиций механики движения частиц в дисперсной среде. В процессе осаждения на отдельную пылевую частицу одновременно воздействуют две противоположно направленные силы: сила тяжести, обусловленная действием гравитации, и выталкивающая сила, определяемая законом Архимеда. Указанные силы имеют постоянный характер, однако их направления противоположны, что определяет результирующее воздействие на частицу.

Равнодействующая сила, вызывающая седиментацию, равна:

$$F_{сед} = F_g - F_A = m_{ом} g = v(\rho - \rho_0)g \quad (3.4)$$

где F_g — сила тяжести; F_A — выталкивающая сила; m и v — соответственно масса и объём частицы; g — ускорение свободного падения; ρ_0 — плотность дисперсионной среды; $m_{от}$ — относительная масса частицы с учётом свойств среды; ρ — плотность материала дисперсной фазы.

Относительная масса частицы рассчитывается по формуле:

$$m_{от} = m - v\rho_0 \quad (3.5)$$

Расчёты равнодействующей силы, вызывающей седиментацию представлены в табл.3.8.

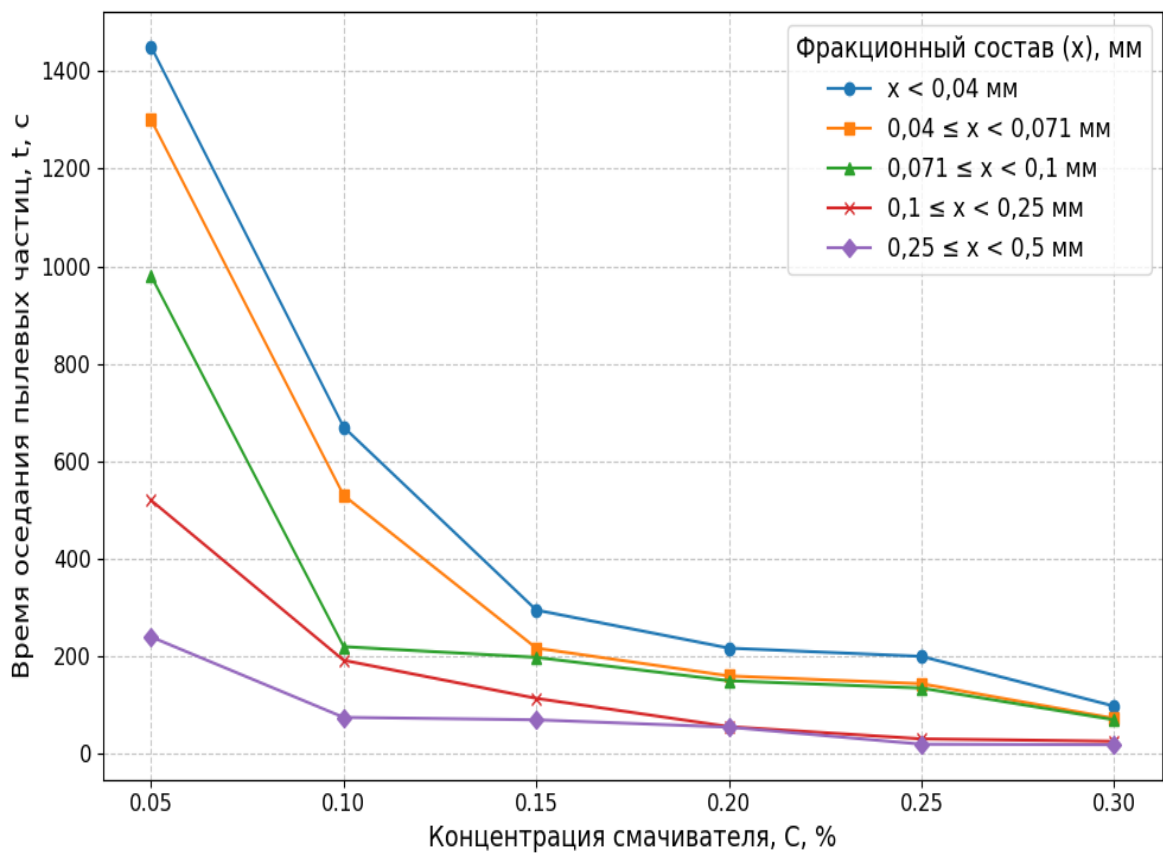


Рисунок 3.10 – Зависимость времени осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01

Таблица 3.8 – Равнодействующая сила, вызывающая седиментацию частиц

№ п/п	Средний радиус частицы, r, м	Объем частицы, v, м ³	Сила седиментации, F _{сед} , Н
1	$2 \cdot 10^{-5}$	$33,52 \cdot 10^{-15}$	$0,164 \cdot 10^{-9}$
2	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$697,11 \cdot 10^{-15}$	$0,342 \cdot 10^{-8}$
3	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$2573,18 \cdot 10^{-15}$	$0,126 \cdot 10^{-7}$

4	$17,5 \cdot 10^{-5}$	$22455,78 \cdot 10^{-15}$	$0,110 \cdot 10^{-6}$
5	$37,5 \cdot 10^{-5}$	$220957,03 \cdot 10^{-15}$	$0,108 \cdot 10^{-5}$

Примечание: плотность бурого угля принята 1500 кг/м³; плотность воды – 1000 кг/м³.

Анализ данных табл.3.8 показывает, что сила седиментации для частиц радиусом менее 71 мкм на 3-4 порядка меньше силы седиментации для частиц радиусом 250 мкм, что объясняет увеличение времени седиментации мелких частиц в 3,7 раза по сравнению со временем седиментации более крупных частиц. Поскольку при концентрации смачивателя 0,1% происходит резкое снижение времени седиментации для всех фракций пыли, то можно сделать вывод, что в диапазоне концентраций 0,0725-0,1025% находится критическая концентрация мицеллообразования для смачивателя СП-01.

По данным табл.3.8 был произведен расчет скоростей седиментации для каждой из пяти фракций в зависимости от концентрации раствора смачивателя (табл.3.9).

Таблица 3.9 – Скорость седиментации пылевых частиц бурого угля

№ п/п	Концентрация, %	Скорость седиментации, см/с				
		Фракция пылевых частиц (x), мм				
		$x < 0,04$	$0,04 \leq x < 0,071$	$0,071 \leq x < 0,1$	$0,1 \leq x < 0,25$	$0,25 \leq x < 0,5$
1	0,05	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$19,23 \cdot 10^{-3}$	$41,66 \cdot 10^{-3}$
2	0,1	$16,39 \cdot 10^{-3}$	$18,87 \cdot 10^{-3}$	$45,45 \cdot 10^{-3}$	$52,08 \cdot 10^{-3}$	$133,33 \cdot 10^{-3}$
3	0,15	$33,9 \cdot 10^{-3}$	$46,08 \cdot 10^{-3}$	$50,5 \cdot 10^{-3}$	$87,7 \cdot 10^{-3}$	$142,86 \cdot 10^{-3}$
4	0,2	$46,08 \cdot 10^{-3}$	$69,4 \cdot 10^{-3}$	$66,6 \cdot 10^{-3}$	$178,57 \cdot 10^{-3}$	$181,82 \cdot 10^{-3}$
5	0,25	$50,0 \cdot 10^{-3}$	$69,04 \cdot 10^{-3}$	$74,07 \cdot 10^{-3}$	$322,58 \cdot 10^{-3}$	$500,0 \cdot 10^{-3}$
6	0,3	$10,2 \cdot 10^{-2}$	$13,7 \cdot 10^{-2}$	$14,28 \cdot 10^{-2}$	$38,46 \cdot 10^{-2}$	$52,63 \cdot 10^{-2}$

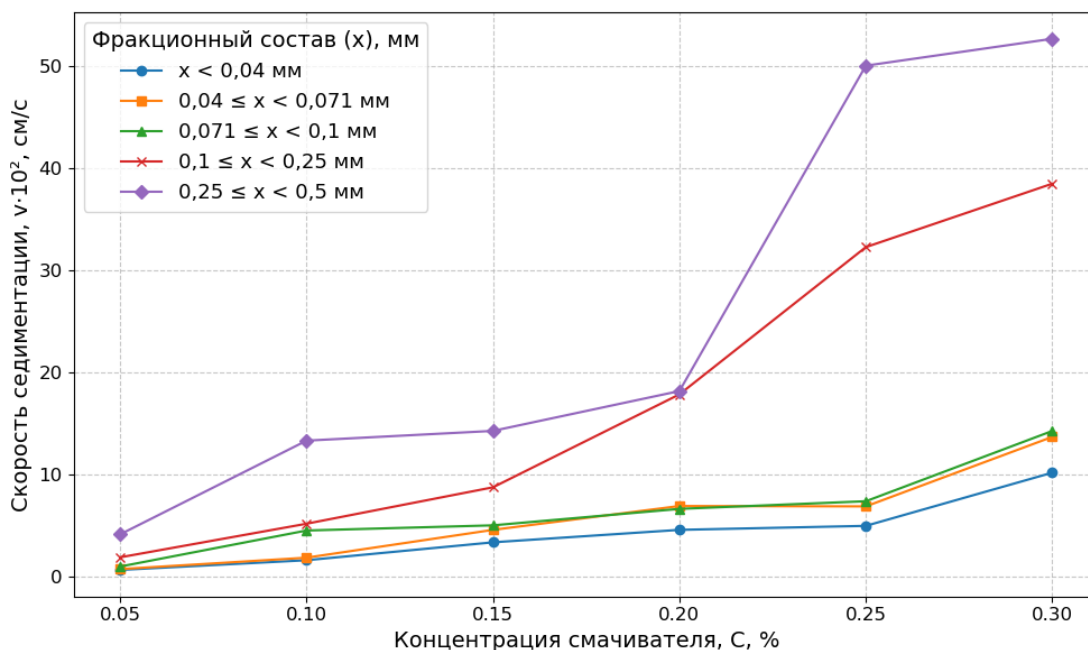


Рисунок 3.11 – Зависимость скорости осадения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01

По полученным данным построен график зависимости скорости оседания частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01, представленный на рис. 3.11. Анализ данных показывает, что при концентрации 0,2% происходит существенный (в 4,5 раза) рост скорости седиментации для крупных фракций пылевых частиц.

Так как седиментация протекает в определенной среде (в нашем случае в водном растворе смачивателя), то при ламинарном движении частицы возникает сопротивление – сила трения, пропорциональная скорости движения частицы [73]:

$$F_{mp} = Bu, \quad (3.7)$$

где B – коэффициент трения, u – скорость движения частиц.

Таким образом, сила, действующая на частицу, во время движения, равна:

$$F = F_{сед} - F_{mp} = v(\rho - \rho_0)g - Bu, \quad (3.8)$$

С ростом скорости при достаточно большом коэффициенте трения наступает момент, когда сила трения достигает силы, вызывающей седиментацию, и таким образом движущая сила F оказывается равной нулю.

Скорость движения частицы можно определить из уравнения (3.8) при условии $F=0$:

$$u = (m_{om} g)/B = v(\rho - \rho_0)g/B, \quad (3.9)$$

Выражение для силы трения, возникающей при движении сферических частиц, можно представить в виде закона Стокса:

$$B = 6\pi\eta r, \quad (3.10)$$

где η – динамическая вязкость среды; r – радиус частицы.

Подставляя уравнение (3.10) в (3.9) и выражая объем частицы через ее радиус, получим:

$$u = 2g (\rho - \rho_0) r^2/9\eta \quad (3.11)$$

Соотношение показывает, что скорость седиментации частицы пропорциональна квадрату ее радиуса, разности плотностей частицы и среды, и обратно пропорциональна вязкости среды.

Формула (3.11) и данные рис.3.11 подтверждают, что при равных концентрациях смачивателя, даже при снижении вязкости раствора с увеличением концентрации смачивателя до определенного значения (после которого идет возрастание вязкости) наибольший вклад в возрастание скорости седиментации оказывает радиус частиц (скорость седиментации частицы пропорциональна квадрату ее радиуса). Для наших данных это превышение скорости достигает 5 раз.

3.4. Исследование эффективности захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью при гидрообеспыливании

На практике основным способом подавления пыли продолжает оставаться орошение, сущность которого заключается в том, что водяной аэрозоль, полученный при помощи оросителей (форсунок), направляется на источник пылеобразования или пылевое облако. Частицы пыли, взвешенные в воздухе, сталкиваются с каплями воды, улавливаются ими и под действием сил тяжести и инерции оседают на почву и т.д.

Академиком П.А. Ребиндером были сформулированы принципы взаимодействия взвешенной в воздухе пылинки с каплей жидкости и экспериментально изучалось влияние добавок поверхностно-активных веществ на эффективность пылеулавливания. Анализом процесса прилипания пылинки к капле и втягивания ее в каплю, исследованием механизма действия смачивателей при орошении занимались многие ученые.

Орошение – наиболее распространенный способ очистки воздуха, заключающийся в смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием при этом гетерокоагуляционной системы «частица пыли – капля жидкости». Физический процесс пылеподавления заключается в преодолении аэродинамического барьера при столкновении частиц пыли с каплями жидкости, т. е. зависит от эффективности коагуляции, способности капель жидкости захватывать и поглощать частицы пыли.

Схема процесса взаимодействия капли жидкости с твердой частицей состоит из следующих четырех этапов:

1.Первый этап. При встречном движении пылевого потока и потока диспергированной жидкости процесс пылеулавливания в первую очередь зависит от вероятности столкновения частицы с каплей. На этом этапе сближения капли с пылинкой существенную роль играют концентрация водного аэрозоля и аэродинамические явления (например, эффект обтекания), которые осложняют условия их соприкосновения.

2.Второй этап – прилипание пылинки с нарушением поверхностного слоя капли (точечный прорыв), зависящее в первую очередь от величины поверхностного натяжения жидкости на границе раздела с воздухом.

3.Третий этап- растекание жидкости по поверхности пылинки.

4. В четвертом, последнем этапе происходит внедрение пылинки в каплю.

В условиях металлургических производств, в частности на участках разгрузки угля с использованием вагоноопрокидывателей, пылевая нагрузка на работников остается одним из наиболее значимых факторов

производственной среды. Особенно остро стоит вопрос воздействия на организм работников тонкодисперсных фракций пыли, размер которых не превышает 10 мкм, способной проникать глубоко в дыхательные пути.

Коэффициент захвата пылевой частицы каплей жидкости представляет собой безразмерную величину, характеризующую вероятность столкновения и последующего улавливания частицы каплей в газовой среде. Для распылительных систем принято рассматривать три основных механизма захвата: броуновскую диффузию, перехват и инерционное соударение. В инженерных расчётах для одиночной капли или разреженного капельного потока общий коэффициент захвата E удобно представлять как сумму вкладов отдельных механизмов:

$$E \approx E_{Br} + E_{int} + E_{imp} \quad (3.12)$$

где E_{Br} — коэффициент захвата за счёт броуновской диффузии; E_{int} — коэффициент захвата за счёт перехвата; E_{imp} — коэффициент захвата за счёт инерционного соударения.

В соответствии с расчётными зависимостями для системы «аэрозольная частица - жидкая капля» отдельные составляющие коэффициента захвата можно записать следующим образом.

Для броуновской диффузии [96, 97]:

$$E_{Br}(d_p, D_d) = 2 \left(\frac{4}{3\pi Pe} \right)^{1/2} \left(\frac{(1-\alpha)(3\sigma+4)}{J+\sigma K} \right)^{1/3} \quad (3.13)$$

для перехвата:

$$E_{int}(d_p, D_d) = \frac{1-\alpha}{J+\sigma K} \left[\frac{R}{1+R} + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{1+R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right] \quad (3.14)$$

для инерционного соударения:

$$E_{imp}(d_p, D_d) = \left(\frac{Stk}{Stk+0.35} \right)^2 \quad (3.15)$$

где d_p — диаметр пылевой частицы, м; D_d — диаметр капли жидкости, м; α — объёмная доля жидкости в газовом объёме; $\sigma = \mu_w/\mu_a$ — отношение вязкости жидкости к вязкости газа; J, K — гидродинамические коэффициенты.

Определяющим параметром эффекта касания является безразмерное отношение диаметра частицы к диаметру капли [96]

$$R = \frac{d_p}{D_d} \quad (3.16)$$

Механизм захвата за счет инерции тем эффективнее, чем выше скорость фильтрации и больше масса частицы. Определяющим параметром инерционного осаждения является критерий Стокса, характеризующий отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды. Число Стокса, характеризует инерционность частицы [73, 96, 97]

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \mu_a D_d} \quad (3.17)$$

где ρ_p — плотность частицы, кг/м³; U — относительная скорость частицы и капли, м/с; μ_a — динамическая вязкость воздуха, Па·с; μ_w — динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Pe — число Пекле, характеризующее соотношение конвективного и диффузионного переноса [96, 97]

$$Pe = \frac{D_d U}{D_{diff}} \quad (3.18)$$

где D_{diff} — коэффициент броуновской диффузии частицы в воздухе, м²/с [96, 97]

$$D_{diff} = \frac{k_B T_a C_c}{3\pi \mu_a d_p} \quad (3.19)$$

где k_B — постоянная Больцмана; T_a — абсолютная температура воздуха, К; C_c — поправка Каннингема на скольжение [96, 97].

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_a}{d_p} \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1d_p}{2\lambda_a}\right) \right] \quad (3.20)$$

где λ_a — средняя длина свободного пробега молекул воздуха, м.

Эти зависимости прямо показывают, что коэффициент захвата зависит прежде всего от диаметра частицы d_p , диаметра капли D_d , относительной скорости U , плотности частицы ρ_p , вязкости воздуха μ_a и коэффициента диффузии частицы в воздухе.

С физической точки зрения рост размера частицы усиливает вклад инерционного механизма, так как число Стокса пропорционально d_p^2 . Уменьшение диаметра капли при прочих равных увеличивает отношение $R =$

d_p/D_d и также способствует росту Stk , то есть обычно повышает вероятность захвата. Вместе с тем избыточное уменьшение каплей может приводить к снижению эффективности за счёт уменьшения относительной скорости частица-капля. Для мелких частиц доминирует диффузионный механизм, для промежуточного диапазона характерна зона пониженной улавливаемости, а для более крупных частиц возрастает роль инерционного соударения.

Приведем примеры расчета коэффициента захвата для частиц пыли для PM2.5 и PM10.

Для иллюстрации выполним расчёт для одиночной водяной капли диаметром $D_d = 100 \mu\text{м} = 1.0 \times 10^{-4}$ м, при температуре воздуха $T_a = 293$ К и относительной скорости $U = 1.0$ м/с, динамической вязкости воздуха $\mu_a = 1.81 \times 10^{-5}$ Па·с, динамической вязкости воды $\mu_w = 1.00 \times 10^{-3}$ Па·с, плотности частицы $\rho_p = 1500$ кг/м³ и средней длине свободного пробега молекул воздуха $\lambda_a = 0.066 \mu\text{м} = 6.6 \times 10^{-8}$ м.

Для упрощённого расчёта примем разреженное капельное поле, то есть

$$\alpha \approx 0, \quad J \approx 1, \quad K \approx 1$$

Тогда

$$\sigma = \frac{\mu_w}{\mu_a} = \frac{1.00 \times 10^{-3}}{1.81 \times 10^{-5}} \approx 55.25$$

Такой расчёт является иллюстративным и показывает влияние на коэффициент захвата размера частицы при фиксированном размере капли.

1. Расчет для PM2.5.

Примем

$$d_p = 2.5 \mu\text{м} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Поправка Каннингема:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_a}{d_p} \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1d_p}{2\lambda_a}\right) \right]$$

$$C_c = 1 + \frac{2 \cdot 6.6 \times 10^{-8}}{2.5 \times 10^{-6}} \left[1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1 \cdot 2.5 \times 10^{-6}}{2 \cdot 6.6 \times 10^{-8}}\right) \right] \approx 1.066$$

Коэффициент диффузии частицы:

$$D_{diff} = \frac{k_B T_a C_c}{3\pi\mu_a d_p}$$

$$D_{diff} \approx \frac{1.380649 \times 10^{-23} \cdot 293 \cdot 1.066}{3\pi \cdot 1.81 \times 10^{-5} \cdot 2.5 \times 10^{-6}} \approx 1.01 \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$$

Число Пекле:

$$Pe = \frac{D_d U}{D_{diff}} = \frac{1.0 \times 10^{-4} \cdot 1.0}{1.01 \times 10^{-11}} \approx 9.88 \times 10^6$$

Тогда диффузионная составляющая:

$$E_{Br} \approx 2 \left(\frac{4}{3\pi Pe} \right)^{1/2} \left(\frac{3\sigma + 4}{1 + \sigma} \right)^{1/3} \approx 5.99 \times 10^{-4}$$

Отношение размеров:

$$R = \frac{d_p}{D_d} = \frac{2.5 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-4}} = 0.025$$

Составляющая перехвата:

$$E_{int} = \frac{1}{1 + \sigma} \left[\frac{R}{1 + R} + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{1 + R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right] \approx 1.33 \times 10^{-3}$$

Число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18\mu_a D_d} = \frac{1500 \cdot (2.5 \times 10^{-6})^2 \cdot 1.0}{18 \cdot 1.81 \times 10^{-5} \cdot 1.0 \times 10^{-4}} \approx 0.288$$

Инерционная составляющая:

$$E_{imp} = \left(\frac{Stk}{Stk + 0.35} \right)^2 = \left(\frac{0.288}{0.288 + 0.35} \right)^2 \approx 0.204$$

Итоговый коэффициент захвата:

$$E \approx E_{Br} + E_{int} + E_{imp}$$

$$E \approx 0.00060 + 0.00133 + 0.20358 \approx 0.206$$

Следовательно, для частицы PM2.5 при выбранных условиях расчётный коэффициент захвата одной каплей составляет примерно

$$E_{PM2.5} \approx 0.21$$

то есть около 20,6 %.

2.Расчет для PM10

Примем

$$d_p = 10 \text{ мкм} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Поправка Каннингема:

$$C_c \approx 1.017$$

Коэффициент диффузии:

$$D_{diff} \approx \frac{1.380649 \times 10^{-23} \cdot 293 \cdot 1.017}{3\pi \cdot 1.81 \times 10^{-5} \cdot 1.0 \times 10^{-5}} \approx 2.41 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$$

Число Пекле:

$$Pe = \frac{1.0 \times 10^{-4} \cdot 1.0}{2.41 \times 10^{-12}} \approx 4.15 \times 10^7$$

Диффузионная составляющая:

$$E_{Br} \approx 2.92 \times 10^{-4}$$

Отношение размеров:

$$R = \frac{1.0 \times 10^{-5}}{1.0 \times 10^{-4}} = 0.10$$

Составляющая перехвата:

$$E_{int} \approx 1.41 \times 10^{-2}$$

Число Стокса:

$$Stk = \frac{1500 \cdot (1.0 \times 10^{-5})^2 \cdot 1.0}{18 \cdot 1.81 \times 10^{-5} \cdot 1.0 \times 10^{-4}} \approx 4.60$$

Инерционная составляющая:

$$E_{imp} = \left(\frac{4.60}{4.60 + 0.35} \right)^2 \approx 0.864$$

Общий коэффициент захвата:

$$E \approx 0.00029 + 0.01408 + 0.86369 \approx 0.878$$

Следовательно, для частицы PM10 при тех же условиях

$$E_{PM10} \approx 0.88, \text{ то есть около } 88,0 \%$$

Полученные результаты показывают зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли. При фиксированном диаметре капли 100 мкм увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата примерно от 0,21 до 0,88 (примерно в 4,2 раза). Это объясняется прежде всего увеличением числа Стокса и резким усилением инерционного механизма улавливания. Для PM2.5 вклад броуновской диффузии и перехвата остаётся сравнительно малым, тогда как для PM10 доминирует инерционное соударение. В целом расчёт подтверждает положение о том, что при прочих равных условиях крупные частицы улавливаются каплями существенно эффективнее, чем тонкодисперсные фракции. Также существует оптимальное соотношение между размерами капли и пылинки. Зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли является ключевой задачей в проектировании систем пылеподавления.

Смачиватель СП-01 в концентрациях 0,1-0,3% оказывает существенное влияние на процесс захвата частиц вследствие снижения поверхностного натяжения жидкости на 25-35%. В результате коэффициент захвата можно представить в виде:

$$E = E_0 \varphi, \quad (3.21)$$

где E_0 – коэффициент захвата без смачивателя; φ – коэффициент смачивания.

$$\text{Для СП-01 } \varphi=1,2-1.4. \quad (3.22)$$

Были проведены расчеты (табл. 3.10) вклада каждого механизма захвата и общего коэффициента захвата для размеров пыли 2,5 мкм (область минимальной эффективности улавливания пыли) и 10 мкм (максимальный размер респирабельной пыли) для размеров капли жидкости от 2,5 мкм до 200 мкм. Общий коэффициент захвата был рассчитан при орошении без применения ПАВ и с применением ПАВ СП-01, коэффициент эффективности смачивания, согласно (3.22), был принят $\varphi = 1,36$.

Таблица 3.10 – Расчеты коэффициента захвата пыли каплями жидкости без применения ПАВ и с применением ПАВ СП-01

№ п/п	Диаметр капли, мкм	Коэффициент захвата, E				
		Броуновская диффузия, E_{Br}	Перехват, E_{int}	Инерционное соударение, E_{int}	E (без применения ПАВ)	E (с применением ПАВ)
1	2	3	4	5	6	7
Пыль размером 2,5 мкм						
1	2,5	0,003787	0,386111	0,94185	1	1
2	5	0,002678	0,17358	0,888628	1	1
3	10	0,001894	0,063911	0,794876	0,860681	1
4	15	0,001546	0,033333	0,715214	0,750093	1
5	20	0,001339	0,020604	0,646954	0,668896	0,910603
6	30	0,001093	0,010296	0,536786	0,548175	0,746226
7	40	0,000947	0,006267	0,452537	0,45975	0,625872
8	50	0,000847	0,004268	0,386671	0,391786	0,533335
Пыль размером 10 мкм						
9	10	0,000924	0,386111	0,984968	1	1
10	20	0,000654	0,17358	0,970272	1	1
11	30	0,000534	0,09875	0,955902	1	1
12	40	0,000462	0,063911	0,94185	1	1
13	50	0,000413	0,044877	0,928105	0,973395	1
14	100	0,000292	0,014086	0,863693	0,878072	1
15	150	0,000239	0,007005	0,805761	0,813005	1
16	200	0,000207	0,004268	0,753468	0,757943	1

По результатам расчета (табл. 3.10) построены графики зависимости коэффициента захвата пыли жидкостью в зависимости от размеров пилочки и

капли жидкости с применением ПАВ при орошении и без применения ПАВ (рис. 3.12, 3.13).

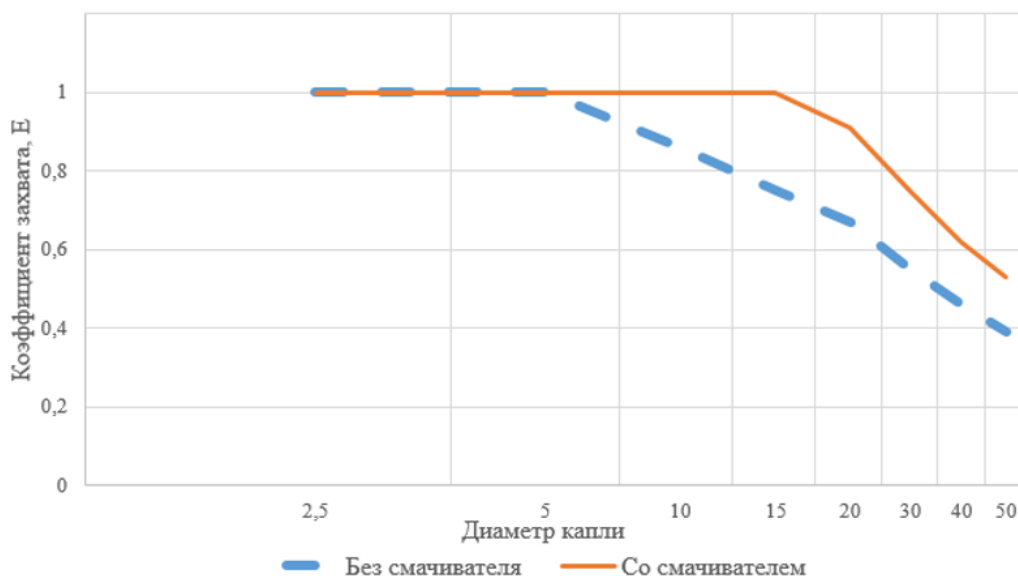


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента захвата частицы пыли размером 2,5 мкм от размера капли жидкости

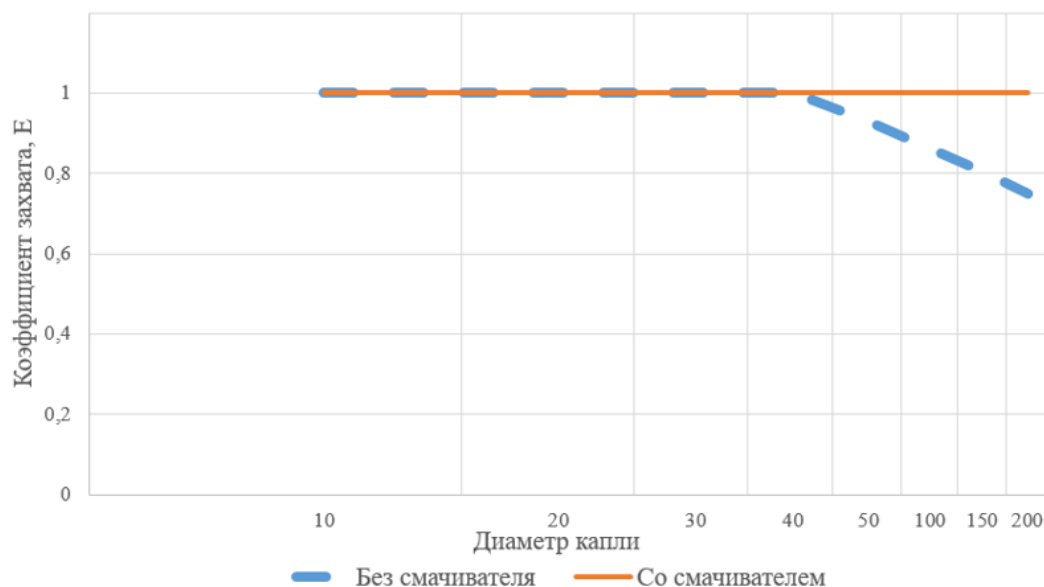


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента захвата частицы пыли размером 10 мкм от размера капли жидкости

Анализ данных табл. 3.10 и рис.3.12, 3.13 показывает, что соотношение размеров пыли и жидкости играет существенную роль в процессе захвата пыли жидкостью при орошении, причем для размеров пыли от 1 до 3 мкм наблюдается область минимальной эффективности улавливания, связанная с

переходом между доминирующими механизмами: с броуновской диффузии на инерционное соударение. Для частицы пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра пыли к диаметру капли не должно превышать 2. Для частицы пыли диаметром 10 мкм это соотношение равно 4-5.

Применение смачивателя СП-01 расширяет диапазон эффективного пылеулавливания для частицы пыли размером 2,5 мкм с 2 до 6 раз (размер капли 15 мкм). Для частицы пыли размером 10 мкм диапазон эффективного пылеулавливания увеличивается с 4 до 20 раз.

На рис. 3.14 представлен внешний вид форсунок разного диаметра (сопла), мкм: 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200.

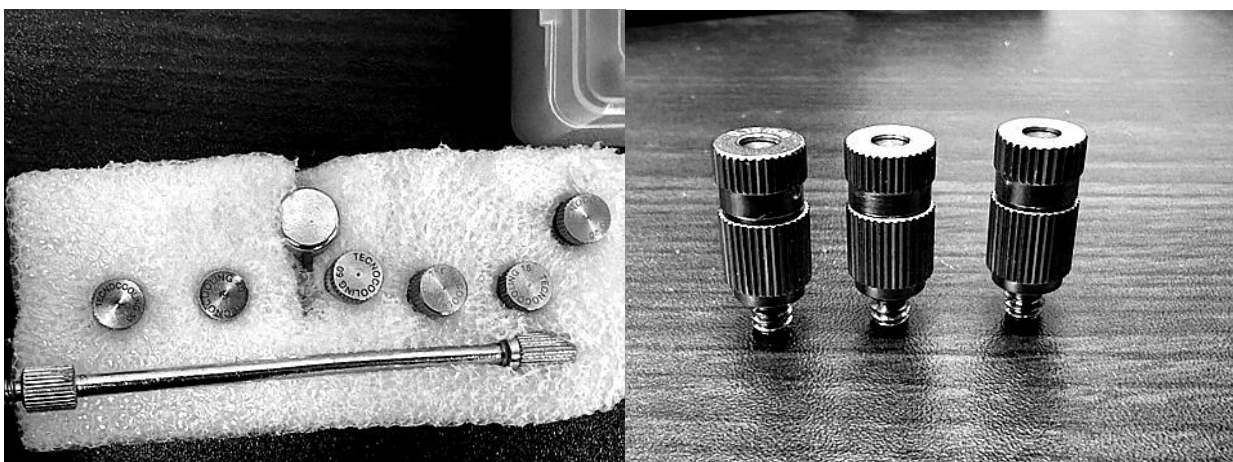


Рисунок 3.14 – Внешний вид форсунок для распыла жидкости

Экспериментальные исследования дисперсного состава витающей пыли в здании вагоноопрокидывателя показали, что диапазон частиц пыли составляет 0,1-22,5 мкм с модой 3-4 мкм. Содержание респирабнльной пыли размером до 7,5 мкм составляет 95%. Исходя из этого, предлагается создавать размер капель жидкости при пылеподавлении в здании вагоноопрокидывателя 10 мкм с использованием 0,1%-ного содержания смачивателя СП-01.

Выводы по третьей главе

1. По результатам времени осаждения смачиваемость пыли бурых углей растворами поверхностно-активных веществ лучше от 2-х до 5 раз

смачиваемости этими же растворами пыли каменных углей марок Ж, ГЖ. Сорбция смачивателя пылью каменных углей при концентрациях смачивателя от 0,3% до 1% происходила ниже максимально возможной по сорбционной емкости смачивателя угольной пылью.

2. Установлено, что в процессе смачивания угольной пыли растворами смачивателя температурой от 5 до 60 °С, поверхностное натяжение во всем диапазоне исследуемых температур снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя.

3. Химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается для углей различных стадий метаморфизма. Образцы углей низкой стадии метаморфизма имеют повышенное содержание атомов кислорода. Образцы углей высокой стадии метаморфизма содержат больше углерода.

4. Установлено, что сила седиментации для частиц радиусом менее 71 мкм на 3-4 порядка меньше силы седиментации для частиц радиусом 250 мкм, что объясняет увеличение времени седиментации мелких частиц в 3,7 раза по сравнению со временем седиментации более крупных частиц. Поскольку при концентрации смачивателя 0,1% происходит резкое снижение времени седиментации для всех фракций пыли, то можно сделать вывод, что в диапазоне концентраций 0,07–0,1% находится критическая концентрация мицеллообразования для смачивателя СП-01.

5. Установлена зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли. При фиксированном диаметре капли 100 мкм увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата примерно от 0,21 до 0,88 (примерно в 4,2 раза). Это объясняется прежде всего увеличением числа Стокса и резким усилением инерционного механизма улавливания. Для PM2.5 вклад броуновской

диффузии и перехвата остаётся сравнительно малым, тогда как для PM10 доминирует инерционное соударение.

6. Установлено, что соотношение размеров пыли и жидкости играет существенную роль в процессе захвата пыли жидкостью при орошении, причем для размеров пыли от 1 до 3 мкм наблюдается область минимальной эффективности улавливания, связанная с переходом между доминирующими механизмами: с броуновской диффузии на инерционное соударение. Для частицы пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра пыли к диаметру капли не должно превышать 2. Для частицы пыли диаметром 10 мкм это соотношение равно 4-5.

7. Применение смачивателя СП-01 расширяет диапазон эффективного пылеулавливания для частицы пыли размером 2,5 мкм с 2 до 6 раз (размер капли 15 мкм). Для частицы пыли размером 10 мкм диапазон эффективного пылеулавливания увеличивается с 4 до 20 раз.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ В ЗДАНИЯХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ

4.1 Принцип действия и технические характеристики вагоноопрокидывателей стального департамента коксохимического производства АО «Qarmet»

Вагоноопрокидыватели классифицируются по конструктивному исполнению и принципу разгрузки подвижного состава. В зависимости от кинематической схемы различают башенные и роторные установки. По характеру изменения пространственного положения вагона выделяют боковые, торцевые и комбинированные варианты разгрузки. Башенные конструкции обеспечивают поворот вагона вокруг оси, расположенной вне его габаритов, тогда как в роторных системах вращение осуществляется относительно оси, близкой к продольной геометрической оси полувагона. Торцевые устройства реализуют продольный наклон кузова и применяются преимущественно для вагонов, оснащённых раскрывающимися торцевыми элементами. Комбинированные схемы предусматривают одновременное изменение положения вагона в продольной и поперечной плоскостях, что расширяет область их технологического применения [46].

Использование вагоноопрокидывателей рассматривается как один из наиболее производительных способов механизированной разгрузки сыпучих грузов. Применение данных установок позволяет достигать высокой интенсивности операций, обеспечивая переработку значительного количества вагонов в единицу времени. В промышленной практике получили распространение как стационарные роторные агрегаты, так и передвижные подъёмно-поворотные системы. В производственной структуре Стального департамента коксохимического направления АО «Qarmet» используется стационарный роторный двухопорный вагоноопрокидыватель типа ВРДС-100Л [46]. Указанная установка предназначена для механизированной выгрузки сыпучих материалов, в частности угля, из железнодорожных

полувагонов грузоподъёмностью до 100 т. Разгрузка осуществляется путём вращения ротора вокруг горизонтальной оси, что обеспечивает полное опрокидывание вагона и поступление материала в приёмные бункеры технологической линии.

Технические параметры рассматриваемой установки характеризуются следующими значениями: диапазон угла поворота полувагона составляет 165–175°, продолжительность цикла разгрузки одного вагона варьирует от 75 с до 3 мин в зависимости от технологических условий, масса агрегата достигает 187 т. Электропитание оборудования осуществляется от сети напряжением 380 В, при этом расчётная установленная мощность составляет 113 кВт. Конструктивной особенностью данного типа вагоноопрокидывателя является возможность его монтажа на существующем основании, ранее использовавшемся для эксплуатации устаревших моделей, что позволяет исключить необходимость реконструкции фундаментных конструкций.

Вагоноопрокидыватель ВРДС-100Л представляет собой специализированное устройство, предназначенное для высокопроизводительной механизированной выгрузки насыпных материалов из типовых железнодорожных полувагонов грузоподъёмностью до 100 т. Эксплуатационные характеристики установки обеспечивают выполнение разгрузочных операций в сжатые временные интервалы, как правило, не превышающие нескольких минут на единицу подвижного состава.

Конструктивно подобные агрегаты выполняются в виде платформенных систем, оборудованных направляющими элементами, обеспечивающими точное позиционирование вагона в рабочей зоне. После установки полувагона осуществляется его фиксация с помощью удерживающих механизмов, предотвращающих смещение при выполнении разгрузочных операций. Опорожнение кузова реализуется за счёт изменения пространственного положения вагона — наклона, опрокидывания или вращения — с использованием гидравлических, механических либо комбинированных приводных устройств. Такой принцип действия обеспечивает полное удаление

перевозимого материала и высокую эффективность переработки сыпучих грузов.

Функционирование вагоноопрокидывателей основано на механизированном изменении пространственного положения подвижного состава с целью выгрузки насыпных материалов. В отдельных конструктивных решениях разгрузка может осуществляться путём принудительного перемещения груза рабочим органом, совершающим возвратно-поступательные движения и обеспечивающим подачу материала в приёмный бункер. Подача очередного вагона в рабочую зону выполняется с использованием толкательных устройств, которые перемещают загруженный вагон в поворотный механизм, одновременно освобождая установку от ранее обработанного подвижного состава.

После установки вагона в рабочее положение производится его фиксация удерживающими элементами. Дальнейшая разгрузка реализуется за счёт поворота люльки или ротора на заданный угол, что обеспечивает самотёчное перемещение груза в приёмные устройства. В башенных конструкциях вращение осуществляется вокруг внешней оси, тогда как в роторных системах вагон поворачивается совместно с ротором. Особенностью башенных установок является возможность их перемещения вдоль фронта разгрузки, что позволяет изменять положение агрегата относительно складских или траншейных приёмных устройств.

Исторически внедрение вагоноопрокидывателей в промышленную практику началось ещё в конце XIX века, когда подобные устройства стали использоваться для ускорения перегрузочных операций в портовых и промышленных комплексах. В дальнейшем наибольшее распространение получили стационарные роторные установки, отличающиеся высокой производительностью и сравнительно низкими энергозатратами. Такие агрегаты обеспечивают разгрузку стандартных четырёх- и шестиосных полувагонов за счёт их поворота на углы порядка $170\text{--}175^\circ$, что гарантирует практически полное удаление транспортируемого материала.

По сравнению с альтернативными способами механизированной разгрузки роторные системы характеризуются высокой цикличностью работы и эффективностью использования приводных мощностей. Вместе с тем эксплуатация стационарных установок требует наличия специально оборудованных приёмных бункеров, зачастую заглублённого типа, а также развитой системы транспортных коммуникаций. Передвижные вагоноопрокидыватели, в свою очередь, обеспечивают большую гибкость технологического процесса, позволяя выполнять разгрузку в различных точках складских площадок и производственных территорий. Это конструктивное преимущество расширяет область их применения и повышает адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации.

Рациональная область применения вагоноопрокидывателей охватывает предприятия, на которых осуществляется интенсивная переработка значительных объёмов однотипных насыпных материалов. К числу таких объектов относятся коксохимические и металлургические производства, тепловые электростанции, крупные организации строительной индустрии и тяжёлого машиностроения, а также транспортно-перевалочные комплексы, включая морские и речные порты. Использование указанных установок является наиболее целесообразным при годовых объёмах выгрузки однородных грузов порядка 1 млн т и более, что обеспечивает экономическую эффективность и высокую степень механизации разгрузочных операций.

Развитие конструкций вагоноопрокидывателей сопровождалось расширением их функциональных возможностей. Начиная с 1970-х годов проводились работы по адаптации оборудования для обслуживания большегрузных восьмиосных вагонов, а также по внедрению вибрационных устройств, предназначенных для удаления остатков материала из кузовов. Одновременно совершенствовались технические решения, направленные на автоматизацию технологических операций, включая механизированную подачу вагонов, фиксацию, опрокидывание и возврат подвижного состава в исходное положение. Для разгрузки насыпных грузов из крытых

железнодорожных вагонов применяются специализированные инерционно-разгрузочные машины, реализующие иной принцип воздействия на перевозимый материал.

Конструктивные особенности современных моделей вагоноопрокидывателей обеспечивают более высокую эффективность разгрузки по сравнению с ранее применявшимися установками. Одним из существенных преимуществ является открытая верхняя часть рабочей зоны, что способствует полному удалению смерзшегося или уплотнённого угля из кузова. В устаревших конструкциях наличие закрытых элементов приводило к частичному удержанию груза на внутренних механизмах, вследствие чего при возврате вагона в исходное положение значительная доля материала могла оставаться в кузове. Это требовало многократного повторения цикла разгрузки и приводило к увеличению временных затрат.

Современные технические решения позволяют обеспечить практически полное опорожнение вагона за один цикл. При благоприятных условиях, например при разгрузке сухого угля, продолжительность операции составляет несколько минут. Исключение повторных опрокидываний положительно сказывается на производительности оборудования, снижает износ механизмов и повышает пропускную способность разгрузочного узла. В результате достигается рост эффективности транспортно-технологических операций и обеспечивается более стабильная работа складской и производственной инфраструктуры.

К числу ключевых эксплуатационных достоинств вагоноопрокидывателя относятся его универсальность, технологическая эффективность и высокая степень автоматизации. Конструктивные и функциональные решения оборудования обеспечивают возможность обслуживания широкого спектра железнодорожных полувагонов, что расширяет область его применения в условиях промышленных предприятий различного профиля.

Высокая интенсивность разгрузочных операций достигается за счёт

использования регулируемых электроприводов, оснащённых преобразователями частоты. Применение таких устройств позволяет адаптировать скоростные режимы отдельных стадий рабочего цикла, оптимизировать динамические нагрузки и повысить общую производительность установки, которая может достигать нескольких десятков вагонов в час.

Существенным преимуществом является высокий уровень автоматизации технологических процессов. Автоматизированные системы управления минимизируют необходимость непосредственного участия обслуживающего персонала, повышают стабильность работы агрегата и снижают вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Точность выполнения операций обеспечивается комплексом датчиков и контрольно-измерительных устройств, интегрированных в систему управления, что позволяет осуществлять непрерывный контроль параметров функционирования оборудования.

В сравнении с альтернативными методами механизированной разгрузки, включая грейферные схемы, рассматриваемые установки характеризуются более рациональным уровнем энергопотребления. Дополнительным эксплуатационным фактором является увеличенный расчётный срок службы, достигающий 25 лет, что обусловлено применением обоснованных инженерных решений, подтверждённых расчётами прочности и кинематических характеристик.

Оборудование сохраняет работоспособность в широком диапазоне температур окружающей среды, что достигается за счёт использования материалов и комплектующих, адаптированных к эксплуатации в условиях значительных климатических колебаний. В базовой конфигурации агрегаты комплектуются средствами дистанционного мониторинга, позволяющими в режиме реального времени отслеживать состояние узлов и механизмов, а также формировать диагностические сообщения при выявлении отклонений от нормативных режимов.

Конструкцией предусмотрено применение специализированного электрооборудования, допускающего эксплуатацию во взрывоопасных зонах, что соответствует требованиям промышленной безопасности. В зависимости от производственных задач вагоноопрокидыватель может дополнительно оснащаться системой электронного взвешивания, расширяющей его функциональные возможности и повышающей информативность технологического контроля.

Технические характеристики вагоноопрокидывателя ВРДС-100Л представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики вагоноопрокидывателя ВРДС-100Л

Параметры разгружаемых полувагонов типа ВРДС-100Л в АО «Qarmet»	
Грузоподъемность, т	до 100
Высота от уровня головки рельсов, мм	3274-4000
Ширина, мм	3130-3300
Длина по осям автосцепок, мм	13 920
Длина рамы кузова, мм	13 0940
Габаритные размеры вагоноопрокидывателя	
Высота (с учетом верхнего кронштейна токопровода), мм	9 310
Ширина (с учетом приводов вращения ротора), мм	9 810
Длина (размер по кронштейнам торцевых роликов), мм	17 470
Технологические параметры	
Теоретическое количество циклов полувагонов/час	до 25
Угол поворота ротора, градусов	165-175
Время разгрузки полувагона, прямой и обратный ход, с	75 с – 3 мин
Мощность привода, кВт	113 кВт
Напряжение, В	380
Производительность, т/час	1500
Климатические условия	
Температура эксплуатации	-45°C – + 45°C
Относительная влажность	до 90%

Стационарный роторный вагоноопрокидыватель ВРДС-100Л (рис. 4.1) конструктивно выполнен в виде подвижной платформы 1, которая посредством катков 2 опирается на металлическую ферменную конструкцию — ротор 3. Роторная часть агрегата воспринимает основные механические нагрузки и опирается через два цилиндрических обода 4 на четыре пары

катков 5, жёстко закреплённых на фундаментных основаниях 6. Приведение ротора во вращательное движение осуществляется системой канатов 7, соединённых с приводным механизмом 8.

В начальной фазе поворота ротора на кузов установленного вагона сверху воздействуют Г-образные фиксирующие элементы — прижимы 9. При достижении угла поворота порядка 5–10° указанные устройства вступают в контакт с кузовом и обеспечивают прижатие вагона к рельсовому пути, предотвращая его смещение и обеспечивая устойчивость в процессе дальнейшей разгрузки.

Платформа 1, на которой размещён вагон, перемещается по каткам 2 в направлении нижней части ротора 3 до момента соприкосновения боковой поверхности кузова с внешней поверхностью ротора. Контакт осуществляется через облицовочные деревянные брусья 10, выполняющие роль привалочных элементов и предназначенные для снижения динамических и ударных воздействий.

После фиксации вагона и достижения рабочего положения ротор 3 совместно с платформой 1 осуществляет поворот на угол 165–175°, в результате чего перевозимый материал (уголь) под действием силы тяжести выгружается в приёмные бункеры 11, суммарная вместимость которых составляет около 180 т. По завершении цикла разгрузки ротор получает обратное вращение, обеспечивая возврат вагона в исходное положение.

Выдача угля из бункеров 11 производится с использованием питателей 12, которые регулируют подачу материала на один или два ленточных конвейера 13. Далее транспортирование осуществляется системой последовательно расположенных конвейеров, обеспечивающих направление груза на складские площадки либо в соответствующие производственные подразделения.

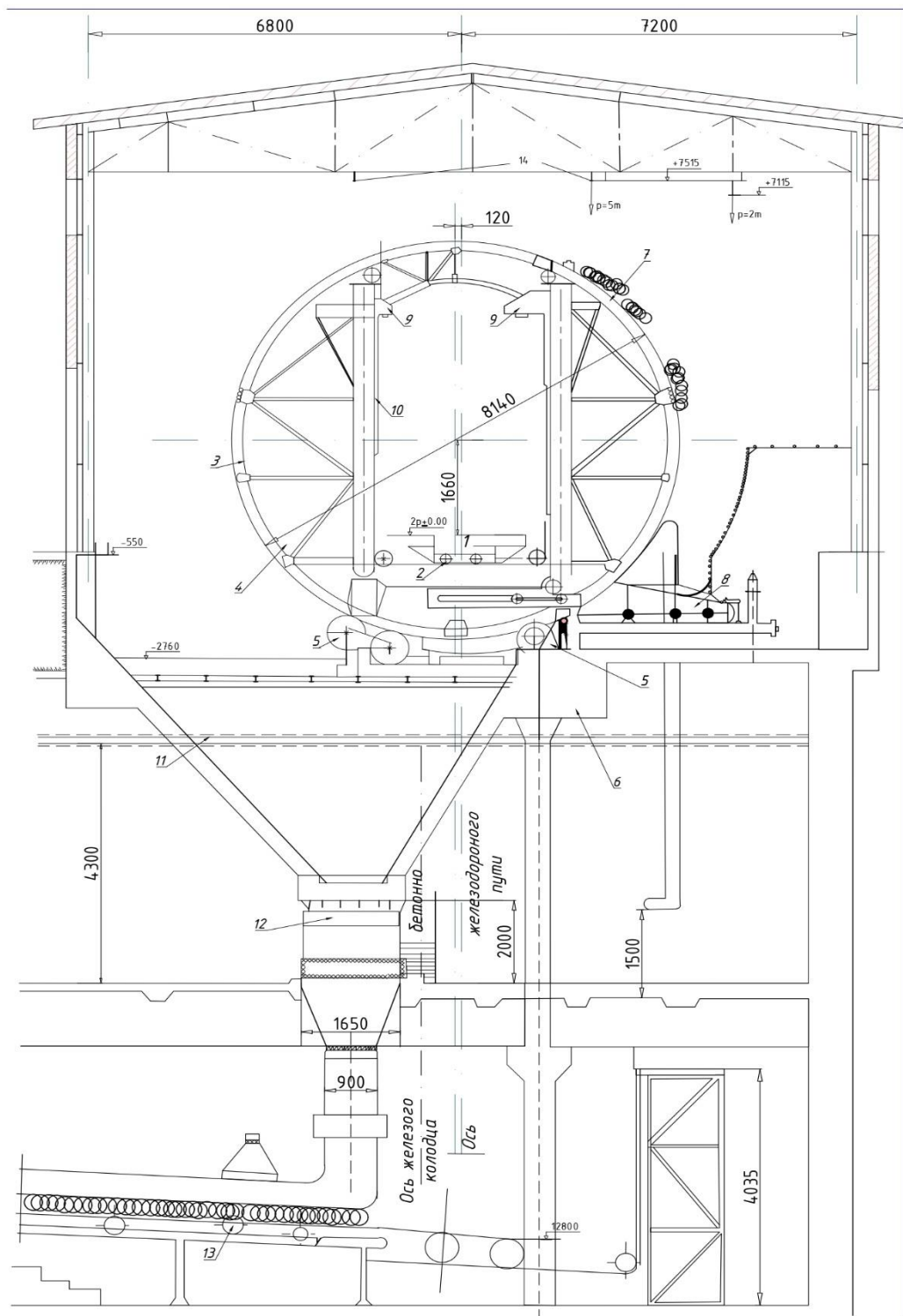


Рисунок 4.1 – Схема роторного вагоноопрокидывателя типа ВРДС-100Л

4.2 Рекомендации по снижению тонкодисперсных фракций в воздухе в местах работы вагоноопрокидывателей

Пыление в здании вагоноопрокидывателя — это одно из самых

первостепенных мест, где образуется большое количество пыли, где присутствуют люди, где работает технологический персонал и ремонтные бригады по обслуживанию самого вагоноопрокидывателя. Поэтому в таких местах здания вагоноопрокидывателя возникает необходимая потребность снизить концентрацию пыли в воздухе. В решении этих вопросов высокоэффективно применение технологии «сухой туман» в здании вагоноопрокидывателя.

В здании вагоноопрокидывателя при разгрузке вагонов в момент опрокидывания материал высыпается в бункер на решетке под вагон, и в этот момент вылетает большое количество пыли, которая поднимается над вагоноопрокидывателем и висит в здании вагоноопрокидывателя. Так как вагоноопрокидыватель является составной частью машин непрерывного транспорта, и он встроен технологическую цепочку, то практически циклы опрокидывания непрерывны.

Пыль вырывается с периодичностью раз в 2–3 минуты, накапливаясь за смену и переходит на следующую смену, оставаясь в воздухе самого здания. Существующие системы аспирации, которые расположены и под бочкой вагоноопрокидывателя, и рядом, при таком объеме выбросов пыли и объеме помещения, малоэффективны. Особенно возникают большие проблемы по пылеподавлению на нулевом уровне, где расположена сама бочка вагоноопрокидывателя. Особо острая проблема пыления возникает в зимний период у предприятий, работающих с перевалкой угля. Вымороженный уголь выделяет гораздо больше пыли по сравнению с не вымороженным.

После выгрузки вагона работают фрезерные машины, которые тоже выделяют большое количество пыли, поэтому проблема пыления присутствует и ниже нулевого уровня. Это на приемных решетках, в отделении дробления, в районе питателей, приемного стола. На этих уровнях присутствует также аспирация, но она не имеет большой эффективности.

Предлагается использовать технологию «сухой туман» которая основана на распылении воды с помощью сжатого воздуха, достигая размера

капли около 10 мкм. Большое количество и плотность этих капель гарантируют высокий эффект подавления пыли.

«Сухой туман» создают на каждом уровне, начиная с нулевого и до самого низа вагоноопрокидывателя. Для каждого уровня выбирается соответствующий тип форсунок, соответствующие их расположение, геометрия и технические решения в плане защиты, обогрева, утепления самих форсуночных модулей. Нулевой уровень является самым сложным, так как самое большое количество выбросов пыли происходит именно там. На нулевом уровне форсунки работают как завеса, затуманивая пространство под вагоном, подавая самое эффективное количество сухого тумана для обеспыливания воздуха и предотвращения выброса пыли вверх в само здание вагоноопрокидывателя.

На следующем уровне - уровне дробильных машин, располагаются форсунки соответствующей геометрии, в защищенных корпусах, так как в дробильном отделении очень часто при работе фрезерных машин разлетается материал и возможно механическое повреждение форсунок. Ниже, на питателях, также располагается форсунки, но уже другого типа со своеобразным размещением и укрытием для предотвращения возможных повреждений.

Последний уровень — это приемный стол, где реализовано стандартное решение. На всем протяжении укрытий размещаются свои форсунки для того, чтобы предотвратить выброс пыли. К форсунке подается сжатый воздух и вода. При зимней эксплуатации вода и сам форсуночный узел подогреваются. Температура воздуха изменяется от точки россы до минус 40°С, что, позволяет распылять воду до состояния сухого тумана и эффективно осаждают пыль на каждом участке (уровне), в каждой точке работы каждой форсунки.

Эффективность работы технологии «Сухой туман» составляет 80–90% за счет применения разных форсунок разной дальности и производительности сухого тумана. Особенно это важно для нулевого

уровня, при этом происходит низкое потребление воды, что обусловлено именно работой системы «Сухой туман».

Систему сухой туман и аспирацию можно применять одновременно при положительных температурах, при отрицательных температурах лучше замещать одну систему другой, то есть либо использовать аспирацию, либо - систему «Сухой туман». Практика показывает, что, аспирационная система имеет ниже эффективность по сравнению с системой «Сухой туман» и имеет большую затратную часть, так как эксплуатация аспирационного оборудования стоит больше денег, чем эксплуатация оборудования системы «Сухой туман».

Важное значение в системе эффективности пылеподавления занимает мониторинг с помощью датчиков, измеряющих запыленность воздуха на каждом уровне участка вагоноопрокидывания. В соответствии с показаниями датчиков запускается соответствующая система пылеподавления на каждом уровне. Выбираются места установки датчиков и в этих точках контролируется уровень запыленности.

Для пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями предлагается применять орошение с использованием туманообразователей. При применении туманообразователей имеет место седиментационное пылеулавливание.

Одним из эффективных методов локального подавления угольной пыли при погрузочно-разгрузочных работах на металлургических предприятиях является применение туманообразующих систем в сочетании с поверхностно-активными веществами. Особенно перспективным в данном направлении является использование отечественного реагента СП-01, предназначенного для образования устойчивой мелкодисперсной водной фазы, способной эффективно связывать витающие частицы пыли в воздухе рабочей зоны.

Механизм действия ПАВ СП-01 основан на снижении поверхностного натяжения воды и улучшении смачиваемости твёрдых частиц. Применение

раствора с оптимальной концентрацией позволяет существенно повысить эффективность взаимодействия аэрозольных капель с пылевыми фракциями, включая наиболее опасные респирабельные частицы диаметром менее 10 мкм. Образующиеся в результате распыла аэрозольные облака равномерно заполняют рабочий объём разгрузочной зоны (нулевого уровня) вагоноопрокидывателя, обеспечивая не только осаждение пыли, но и предотвращение её вторичного подъёма воздушными потоками.

Лабораторные испытания показали, что применение ПАВ СП-01 в составе туманообразующих систем позволяет снизить содержание пыли в воздухе в 1,6–2,2 раза по сравнению с обычным водяным орошением. При этом достигается значительное уменьшение содержания фракций размером менее 5 мкм, которые представляют наибольшую опасность для органов дыхания работников.

Отдельным преимуществом применения СП-01 является его экологическая безопасность, стабильность в условиях температур от –15 до +40 °С, отсутствие коррозионного действия на металлические элементы и минимальная пенообразующая способность при низких концентрациях. Это позволяет использовать реагент без необходимости в дополнительных системах водоотделения или антипенной защиты, что особенно важно для действующих производственных участков с ограниченным пространством.

При реализации туманообразующего пылеподавления на участках вагоноопрокидывания угля на коксохимических заводах рекомендуется использовать установки высокого давления (до 5–6 МПа) с многосопловыми форсунками, образующими туман с каплями диаметром 20–50 мкм. Для повышения равномерности покрытия зон пылеобразования распыл осуществляется под углом 30–60° к горизонту, в направлении поступления воздушных потоков, способствующих распространению пыли. Наиболее рациональными точками установки распыляющих устройств являются зоны загрузки, сброса угля из полувагонов, а также места ударного контакта угольной массы с приёмным бункером.

Для обеспечения стабильного качества раствора СП-01 необходимо использовать дозирующие насосы с точностью подачи не менее $\pm 5\%$, а также фильтрующие элементы во избежание засорения форсунок. Контроль за качеством орошения проводится с использованием пылемеров, фиксирующих уровни содержания аэрозольных частиц до и после применения системы, что позволяет оперативно корректировать параметры работы установки.

Применения технологии «сухой туман» и высокодисперсного орошения на металлургических предприятиях, в том числе на участках вагонопрокидывания угля, является эффективным методом подавления пыли, позволяющим локализовать и осаждавать тонкодисперсные фракции непосредственно в зоне их образования. Данный способ основан на создании аэрозольного облака, содержащего водяные капли диаметром менее 100 мкм, что обеспечивает высокую вероятность столкновения капель с пылинками размером от 0,1 до 50 мкм, находящимися во взвешенном состоянии в воздухе рабочей зоны.

Высокодисперсное орошение осуществляется с применением специализированных распыляющих систем, работающих под давлением до 4–6 МПа. Такие системы формируют облако капель с размером, сопоставимым с респираторной пылью, благодаря чему эффективность пылеподавления достигает 70–85 % при сравнительно малом расходе воды. В отличие от традиционного струйного или дождевального полива, высокодисперсное орошение не вызывает переувлажнения поверхности, не образует луж и не препятствует технологическому процессу перемещения угля.

Одним из существенных факторов, определяющих эффективность высокодисперсного орошения, является равномерность распыла и стабильность параметров каплеобразования. На практике для обеспечения этих условий применяются форсунки вихревого и импульсного типа с узким спектром размеров капель. Регулярная проверка состояния форсунок,

отсутствие засорения и правильная настройка угла распыла позволяют достигать стабильного уровня пылеподавления в наиболее пыльных зонах. В условиях вагоноопрокидывания это особенно важно, поскольку наиболее интенсивное пылеобразование наблюдается в момент падения и удара угольной массы о приёмную поверхность.

Использование системы высокодисперсного орошения эффективно в составе обеспыливающего комплекса, включающего пылеулавливающие укрытия, локальные аспирационные установки, и барьерные водяные завесы. Кроме того, при необходимости высокодисперсное орошение может сочетаться с применением поверхностно-активных веществ, усиливающих смачиваемость частиц и ускоряющих их осаждение. Такая интеграция повышает общую эффективность пылеподавления и позволяет добиться требуемых санитарно-гигиенических показателей в зоне работы персонала.

Система пылеподавления в зоне вагоноопрокидывателя представляет собой многоуровневую систему, в которой на каждом уровне применяется наиболее эффективное пылеподавление, соответствующее распределению дисперсного состава пыли. На нулевом уровне применяется технология «сухой туман» для предотвращения подъема респираторной пыли. На уровне работы дробильно-фрезерных машин, где образуются торакальная и грубая пыль, предлагаем использовать высоконапорное орошение с применением смачивателя СП-01, концентрацией, установленной в результате лабораторных опытов, а именно 0,1-0,2%.

Одним из действенных методов подавления пылеобразования при разгрузке угля с помощью вагоноопрокидывателей является применение систем туманообразования с добавлением смачивающих веществ, в частности поверхностно-активного вещества СП-01. Проведенные лабораторные испытания показали, что использование СП-01 позволяет не только повысить степень смачивания угольной пыли, но и значительно сократить количество витающих частиц в воздухе рабочей зоны, включая фракции размером до 10 мкм. За счёт снижения поверхностного натяжения капель рабочего раствора

обеспечивается более плотный контакт с пылевыми частицами, что способствует их укрупнению и последующему осаждению. Растворы на основе СП-01 эффективны в концентрациях 0,02–0,5 % в зависимости от условий пылеобразования и типа угля.

При этом эффективность туманообразования возрастает при использовании высокодисперсных форсунок с диаметром капель 10–100 мкм, что способствует оптимальному взаимодействию с частицами пыли аналогичных размеров. Также рекомендуется синхронизация системы орошения с началом цикла разгрузки, что позволяет обеспечить предвключение туманообразования и предупредить выброс пыли в окружающую среду.

Отдельное внимание следует уделить условиям дозирования смачивающего раствора. Оптимизация концентрации СП-01 должна производиться на основе экспериментальных данных, полученных при учете конкретных свойств угля марки, в том числе его гигроскопичности, склонности к пылеобразованию, фракционного состава и влажности. При недостаточной концентрации смачивающего компонента возможно образование непродуктивных аэрозолей, не способных эффективно взаимодействовать с пылью. При избыточной дозировке – перерасход реагента и переувлажнение материала. Баланс между этими факторами должен обеспечиваться системой автоматического контроля концентрации раствора и его подачи в зону разгрузки.

Лабораторными исследованиями, выполненными в данной работе, установлено, что при седиментационном пылеулавливании частиц пыли в диапазоне от 1 до 500 мкм применение раствора смачивателя с концентрацией выше концентрации мицеллообразования приводит к снижению времени седиментации: респирабельной фракции пыли до 4 раз, торакальной - до 6 раз, грубой - до 7 раз, что повышает эффективность связывания и осаждения тонкодисперсных фракций угольной пыли в зоне работы вагоноопрокидывателя.

Таким образом, для эффективного пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями необходимо создать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрации смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 4-5 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применения смачивателя СП-01 0,2%.

4.3 Разработка рекомендаций по учету содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле при оценке пылевых нагрузок на работников

В условиях металлургических производств, в частности на участках разгрузки угля с использованием вагоноопрокидывателей, пылевая нагрузка на работников остается одним из наиболее значимых факторов производственной среды. Особенно остро стоит вопрос воздействия на организм работников тонкодисперсных фракций пыли, размер которых не превышает 10 мкм, способной проникать глубоко в дыхательные пути. Наибольшую обеспокоенность вызывает пыль, образующаяся при разгрузке коксующего угля марки Ж, отличающегося повышенной склонностью к пылеобразованию вследствие своей структуры и влажностных характеристик. Особенности технологического процесса, включая механическое воздействие на уголь при его выемке и разгрузке, создают условия для активного образования и распространения аэрозоля, содержащего значительное количество тонкодисперсных частиц.

Сложность оценки пылевой нагрузки заключается не только в определении запыленности воздуха, но и в необходимости учитывать долю наиболее опасных фракций. Витаящая пыль с размером частиц до 10 мкм обладает высокой проникающей способностью и может оказывать выраженное фиброгенное и токсикологическое воздействие на органы

дыхания. Современные методики производственного контроля, как правило, ограничиваются измерением общей запыленности, без выделения респирабельной или торакальной доли, что не позволяет объективно оценить степень риска и не способствует разработке эффективных мер защиты. В связи с этим возникает необходимость разработки и внедрения специализированных рекомендаций по учёту содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле при проведении специальной оценки условий труда.

Основой таких рекомендаций является организация выборочного и регулярного мониторинга пылевого состава на участке вагоноопрокидывания, особенно частиц, размером менее 10 мкм. Для этого должны использоваться пылеанализаторы, способные выполнять фракционный анализ аэрозоля, с выделением респирабельной доли. При невозможности выполнения непрерывного контроля допускается применение расчётных методик оценки распределения фракционного состава на основании репрезентативных замеров, выполненных в типовых условиях работы.

Следующим важным шагом является интеграция полученных данных в систему оценки условий труда. Согласно методике, утвержденной приказом Минтруда России от 31.12.2020 № 988н, оценка условий труда по вредным производственным факторам должна учитывать не только превышение допустимых концентраций, но и потенциальную опасность воздействия фиброгенных аэрозолей. Учитывая, что на коксохимических предприятиях концентрации общей пыли могут не выходить за пределы ПДК, при этом доля тонкодисперсных частиц способна превышать 40–50 %, необходимо пересмотреть подходы к гигиенической классификации условий труда на таких рабочих местах.

На практике это означает, что оценка условий труда работников участка вагоноопрокидывания должна сопровождаться следующими мероприятиями:

1. Проведение фракционного анализа витающей пыли с определением массовой доли частиц размером до 10 мкм и выделением респирабельной фракции.

2. Расчет удельной пылевой нагрузки на органы дыхания с учетом массы вдыхаемой пыли за рабочую смену и времени пребывания работника в зоне загрязнения.

3. Корректировка гигиенической оценки условий труда на основании концентрации респираторной пыли, даже при отсутствии превышения ПДК по общей массе.

4. Разработка локальных нормативов допустимого содержания тонкодисперсной пыли на рабочих местах, с учетом специфики перерабатываемого сырья, особенностей технологического оборудования и эффективности применяемых методов пылеподавления.

Для полноценного внедрения учета тонкодисперсных частиц в производственный контроль также целесообразно пересмотреть систему санитарно-гигиенического мониторинга на металлургических предприятиях. В частности, можно рекомендовать включение в перечень обязательных параметров анализа доли респираторной фракции, а также проведение СУОТ с учетом воздействия аэрозолей преимущественно фиброгенного действия. В этом направлении может быть использован опыт зарубежных предприятий, где нормирование условий труда осуществляется с обязательным выделением фракций PM10 и PM2.5, а мероприятия по снижению пыли направлены на достижение максимально допустимых концентраций именно этих фракций.

Учет содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле при оценке условий труда работников участка вагоноопрокидывания является необходимым элементом системы охраны труда на металлургических предприятиях. Это позволит повысить точность оценки пылевой нагрузки, обоснованно разрабатывать мероприятия по её снижению и снизить риски развития профессиональных заболеваний органов дыхания у работников, занятых на пылеопасных участках. Внедрение систем туманообразования с ПАВ СП-01, оптимизация дозирования растворов и регулярный фракционный контроль запыленности должны стать обязательными элементами современной технологии разгрузки угля, направленной на обеспечение

безопасных условий труда.

Выводы по четвертой главе

1. При седиментационном пылеулавливании частиц пыли в диапазоне от 1 до 500 мкм применение раствора смачивателя с концентрацией выше концентрации мицеллообразования приводит к снижению времени седиментации: респирабельной фракции пыли до 4 раз, торакальной - до 6 раз, грубой - до 7 раз, что повышает эффективность связывания и осаждения тонкодисперсных фракций угольной пыли в зоне работы вагонопрокидывателя.

2. Для эффективного пылеподавления при разгрузке угля вагонопрокидывателями рекомендуется создавать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрации смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 4-5 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применения смачивателя СП-01 0,2%.

3. Внедрение систем туманообразования с ПАВ СП-01, оптимизация дозирования растворов и регулярный фракционный контроль запыленности должны стать обязательными элементами современной технологии разгрузки угля, направленной на обеспечение безопасных условий труда.

4. Важное значение в системе эффективности пылеподавления занимает мониторинг с помощью датчиков, измеряющих запыленность воздуха на каждом уровне участка вагонопрокидывания. В соответствии с показаниями датчиков запускается соответствующая система пылеподавления на каждом уровне. Выбираются места установки датчиков и в этих точках контролируется уровень запыленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научной квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной для металлургической отрасли задачи снижения запыленности воздуха в углеподготовительных цехах коксохимических заводов путем использования высоконапорного гидрообеспыливания с использованием туманообразователей на основе установленных зависимостей скорости седиментации частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01 и зависимостей коэффициента захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью с целью улучшения условий труда работников горно-металлургических предприятий.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Исследованиями по смачиваемости пыли марок ЗБВ, ГЖ, Ж установлено, что время осаждения пыли бурых углей меньше, чем для пыли каменных – от 2-х до 5 раз, причем, если время осаждения пыли бурых углей уменьшается в 1,5 раза при увеличении концентрации смачивателя от 0,3% до 1,0 %, то для пыли каменных углей уменьшение этого времени равно 2,5 раз, то есть действия смачивателя более эффективно для каменных углей.

2. Установлено, что поверхностное натяжение рабочей жидкости в диапазоне температур от 5 до 60 °С снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя.

3. Химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается для углей различных стадий метаморфизма. Образцы углей низкой стадии метаморфизма имеют повышенное содержание атомов

кислорода. Образцы углей высокой стадии метаморфизма содержат больше углерода. Повышенное содержание кислорода в низкометаморфизованных углях, обуславливает лучшую смачиваемость бурых углей по сравнению с углями средней стадии метаморфизма.

4. Установлено, что для крупных фракций пыли (из диапазона $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$) резкое изменение времени осаждения частиц происходит при концентрации смачивателя 0,1%. Среднее время осаждения этих фракций пыли равно 162 с. Для более мелких фракций пыли ($x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$) время осаждения больше и составляет в среднем 600 с, что 3,7 раз больше, чем для крупных частиц пыли.

5. Установлено, что сила седиментации для частиц радиусом менее 71 мкм на 3–4 порядка меньше силы седиментации для частиц радиусом 250 мкм, что объясняет увеличение времени седиментации мелких частиц в 3,7 раза по сравнению со временем седиментации более крупных частиц. При концентрации смачивателя 0,1% происходит резкое снижение времени седиментации для всех фракций пыли, следовательно, в диапазоне концентраций 0,07–0,1% находится критическая концентрация мицеллообразования для смачивателя СП-01.

6. Результаты теоретических исследований зависимости коэффициента захвата пылевых частиц каплями жидкости показывают выраженную зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли. При фиксированном диаметре капли 100 мкм увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата примерно от 0,21 до 0,88 (примерно в 4,2 раза). Это объясняется прежде всего увеличением числа Стокса и резким усилением инерционного механизма улавливания. Для PM2.5 вклад броуновской диффузии и перехвата остаётся сравнительно малым, тогда как для PM10 доминирует инерционное соударение.

7. Установлено, что соотношение размеров пыли и жидкости играет существенную роль в процессе захвата пыли жидкостью при орошении,

причем для размеров пыли от 1 до 3 мкм наблюдается область минимальной эффективности улавливания, связанная с переходом между доминирующими механизмами: с броуновской диффузии на инерционное соударение. Для частицы пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра пыли к диаметру капли не должно превышать 2. Для частицы пыли диаметром 10 мкм это соотношение равно 4-5.

8. Применение смачивателя СП-01 расширяет диапазон эффективного пылеулавливания для частицы пыли размером 2,5 мкм с 2 до 6 раз (размер капли 15 мкм). Для частицы пыли размером 10 мкм диапазон эффективного пылеулавливания увеличивается с 4 до 20 раз.

9. Для уменьшения доли респираторной фракции пыли рекомендуется создавать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрации смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 4-5 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применения смачивателя СП-01 0,1%.

10. Разработана методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли РМ10 и РМ2,5 путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов K_1 и K_2 , отражающих увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций РМ10 и РМ2,5. Если фракция РМ2,5 отсутствует, но вся масса пыли состоит из фракций РМ10, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,25 раз. Если фракция пыли РМ10 отсутствует, и вся масса пыли состоит из фракций РМ2,5, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,5 раза. При отсутствии фракций РМ10 и РМ2,5 пылевая нагрузка рассчитывается по стандартной формуле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловцев С.В., Воробьева О.В. Анализ состояния безопасности в угольной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S17. – С. 3-10. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-3-10.
2. Бурмак Ю.Г. Механизмы развития заболеваний внутренних органов у рабочих коксохимического производства и возможные пути их профилактики: автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. 14.00.05 «Внутренние болезни». Санкт-Петербург, 1996.
3. ГОСТ 25163-82: Поверхностно-активные вещества (ПАВ). Метод определения свободных полиэтиленгликолей и активного вещества в неионогенных ПАВ.
4. Вентцель, Е.С. Теория вероятности и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. М.: Наука, 1988. – 480 с.
5. Всемирный банк (World Bank). *Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action* [Электронный ресурс]. World Bank, без указания года на странице. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>.
6. Всемирная ассоциация производителей стали (World Steel Association). *World Steel in Figures 2025* [Электронный ресурс]. World Steel Association, 2025. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>.
7. Гаврилов Д.В., Соболев В.В., Шадрин А.В. и др. // Актуальность аудита системы управления охраной труда и промышленной безопасностью в угольной промышленности РФ / Уголь. 2024;(10):74-78. dOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-74-78.
8. Геологическая служба США (U.S. Geological Survey). *The Mineral Industry of Russia in 2022* (2022 Minerals Yearbook. Area Reports: International)

[Электронный ресурс]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2025. URL: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2022/myb3-2022-russia.pdf>

9. Глебов А.Ф. Смачиватель для подавления угольной пыли: Патент №2495250 Рос. Федерация: МПК E21F 5/06 / А.Ф. Глебов; заявитель и патентообладатель: - 2012116211/03; заявл. 23.04.2012; опубл. 10.10.2013, –4 с.

10. Голоскоков С.И. Метод определения смачивающей способности угольной, углепородной пыли растворами поверхностно-активных веществ / С.И. Голоскоков, Н.М. Недосекина, М.С. Сазонов, Е.И. Голоскоков, Н.А. Терентьева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 99-102.

11. ГОСТ 12.1.005–88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны" (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 29.09.1988 N 3388) (ред. от 20.06.2000).

12. ГОСТ 32509-2013 «Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде» – М.: Стандартинформ, 2014, 25 с.

13. ГОСТ Р ИСО 7708-2006 «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле» Дата введения 01.11.2006 – М.: «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – 2006. – 16 с.

14. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / пер. с англ. Л., 1969. 428 с.

15. Гриневич Г.П. Комплексная механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте.- М.:Транспорт, 1981.- 342с..

16. Ерохин С.Ю., Дремов В.И. Способ аэрогидродинамического обеспыливания очистного забоя. Каталог научно-технических разработок. – М.: МГГУ. - 1999.

17. Кабанов Е.И., Коршунов Г.И., Корнев А.В., Мяков В.В. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005-2019 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 18-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.

18. Киряева Т.А., Опарин В.Н., Яценко Д.А. Микро-наноструктурный анализ особенностей в строении угольного вещества в зависимости от стадий его метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 5–23. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_5.

19. Кобылкин А.С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6–1. – С. 65–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73.

20. Кобылкин С.С., Тимченко А.Н. Классификация систем снижения уровня запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10–1. – С. 112-123. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_112.

21. Корнев А. В., Ледяев Н. В., Кабанов Е. И., Корнева М. В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

22. Корнев А.В., Ледяев Н.В., Кабанов Е.И., Корнева М.В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

23. Корнева М.В. Разработка и обоснование мероприятий по снижению концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле угольных шахт [Текст] / М.В. Корнева // Санкт-Петербург: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. 2020.

24. Коршунов Г.И., Спицын А.А., Онегов Н.А., Фитерман С.И. Применение метода снижения запыленности в угольных шахтах // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 250-255.

25. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Подсевалов В.С. Анализ различных способов борьбы с мелкодисперсной респирабельной фракцией пыли на горнодобывающих предприятиях // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 1. – С. 190-199. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-190-199.

26. Кудряшов В.В., Воронина Л.Д., Шуринова М.К., Воронина Ю.В., Большаков В.А. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах. – М.: Наука. – 1979. –196 с.

27. Кудряшов В.В., Кобылкин А.С. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10–1. – С. 29-44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_29.

28. Кузнецов, Д.А. Оптимизация параметров орошения при различных производственных процессах, сопровождающихся пылевыведением, в зависимости от свойств выделяющейся в рудничную атмосферу пыли / Д.А. Кузнецов, К.В. Кузнецова, Р.Р. Минибаев, И.А. Артюшин, О.А. Сергеев, С.Н. Мусинов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 74-82.

29. Левин Л.Ю., Исаевич А.И., Сёмин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 43-55. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.

30. Лежнев Е.А., Мохначук И.И., Соболев В.В. Эволюция развития угольной отрасли и обеспечение безопасного труда // Уголь. 2025;(11):24-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-24-30.

31. Мамаев В.И., Ибраев Ж.А., Лигай В.А. и др. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей. – М.: Недра. – 1990. – 159 с.

32. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. – 2024. – № 3. – С. 18-29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.

33. Международное энергетическое агентство (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2024. Market review* [Электронный ресурс]. IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024/market-review>.

34. МУК 4.1.2468-09.4.1. «Методы контроля. Химические факторы. Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности. Методические указания»; Введен 29.04.2009 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора 2009 – 24 с.

35. МУК 4436-87 «Измерение концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия» УТВЕРЖДЕНЫ Заместителем Главного государственного санитарного врача СССР А.М.Скляровым 18 ноября 1987 г. № 4436-87.

36. МУК 4.1.4155-25. Методика измерения массовой концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия в воздухе рабочей зоны гравиметрическим методом. (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 25 июля 2025 г.)

37. Мясников И.О., Кизеев А.Н. Риски развития профессиональных и производственно-обусловленных заболеваний у работников горно-металлургических предприятий в российской Арктике // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 3. С. 26–42. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-3-26-42. EDN: CWMKRC.

38. Национальный доклад о состоянии промышленности Республики Казахстан за 2023 год. Доклад о состоянии промышленности Республики Казахстан за 2023 год подготовлен Министерством промышленности и строительства Республики Казахстан, 2024 год -216 с.

39. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад.– М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025– 424 с.

40. Пернебек Б.П. Эффективность захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью при гидрообеспыливания на горно-металлургических предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 3 (специальный выпуск 9). — С. 3–14. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_9_3

41. Пернебек Б.П., Рассолова М.А., Серянина А.В. К вопросу обеспыливания воздуха при погрузке и транспортировании угля // Уголь. – 2024. – № 5. – С. 107-110. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-107-110.

42. Пернебек Б.П., Рыбичев А.А., Федоткин И.О., Оразхан А.А., Мадмарова А. Исследование критической концентрации мицеллообразования при смачивании пыли бурых углей // Уголь. – 2025. – № 3. – С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-27-32.

43. Пернебек Б.П., Семенов Ю.В., Рыбичев А.А., Козлова Л.О. Оценка эффективности смачиваемости угольной пыли при разных температурах растворов // Уголь. – 2024. – № 1. – С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.

44. Пернебек Б.П., Федоткин И.О., Рассолова М.А., Серянина А.В., Андреев А.А., Степанов Е.А., Чикалин Н.М., Нежелская Д.А. Исследование процесса седиментации частиц бурого угля // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-70-75.

45. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2021 год // Уголь. – 2022. – № 3. – С. 9-23. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-9-23.

46. Проект нормативных эмиссии в части выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду за 2024 год для СД АО «Qarmet» 2024-167 с.

47. Поздняков, Г.А. Требования к смачивателям для пылеподавления в угольной и горнорудной промышленности / Г.А. Поздняков, А.В. Третьяков, В.Ю. Гаравин, А.И. Новосельцев // Безопасность труда в промышленности.– 2013. – № 10. – С. 36-39.

48. Постановление Главного государственного санитарного врача от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”» (введено в действие с 01.03.2021)

49. Приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.11.2023 №76179) и приложений к Методике.

50. Приказ Минтруда России N 988н, Минздрава России №1420н от 31.12.2020 "Об утверждении перечня вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные медицинские осмотры при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62278).

51. Приказ Ростехнадзора от 20.03.2023 г. № 121 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по прогнозу и выбору мер, направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах».

52. Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р (ред. от 13.10.2022) «Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года».

53. РД 52.04.830-2015 «Массовая концентрация взвешенных частиц РМ 10 и РМ 2.5 в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом». Санкт-Петербург: Росгидромет. – 2015. – 41 с.

54. Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2023 году: Доклад о результатах мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2023 году подготовлен Министерством труда и социальной защиты Российской Федерации при участии ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России, 2024–304 с.

55. Романченко С.Б., Коршунов Г.И., Тимченко А.Н. Практика применения схем проветривания подготовительных выработок с системами пылеудаления // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – №4. – С. 6-16.

56. Романченко С.Б., Соболев В.В. Перспективные решения в области обеспечения пылевзрывобезопасности шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 1. – С. 6-13.

57. Романченко С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах /С.Б. Романченко, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко; [Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК)]. -Москва: Горное дело, 2011. - 255 с.

58. Рыбичев А.А., Пернебек Б.П. Оценка эффективности пылеподавления с использованием смачивающих растворов // Уголь. – 2023. – №. 12. – С. 60-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-60-63.

59. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» <https://rkc56.ru/documents/4538>

60. Скопинцева О.В., Пернебек Б.П., Федоткин И.О. Повышение эффективности пылеподавления тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле цехов углеподготовки // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 12. С. 61–66. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-12-61-66.

61. Скопинцева О.В., Вертинский А.С., Иляхин С.В., Савельев Д.И., Прокопович А.Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей

обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. – 2014. – №5. – С. 17-20.

62. Скопинцева О.В. Обеспыливающая обработка угольного массива газонаполненными растворами ПАВ / О.В. Скопинцева, С.В. Иляхин, Д.И. Савельев, А.Ю. Прокопович // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № ОВ 7. – С. 367-370.

63. Скопинцева О.В., Ганова С.Д., Демин Н.В., Папичев В.И. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 97-100. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18.

64. Скопинцева О.В. Влияние температуры и концентрации смачивателя «Неолас» на снижение поверхностного натяжения жидкости / О.В. Скопинцева, А.Ю. Прокопович, Д.И. Савельев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 12. – С. 44-46.

65. Скопинцева О. В., Рыбичев А. А., Баловцев С. В. Исследования формы и структуры пылевых частиц угля средней стадии метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-2-0-5.

66. Старк С.Б. - Пылеулавливание и очистка газов в металлургии //«Металлургия», 1977. 328 с.

67. Сюрин С.А., Горбанев С.А. Условия труда и профессиональная патология горняков Кольского Заполярья // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 7. С. 456–461. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-7-456-461.

68. Соболев В. В., Овчинникова Т. И., Тертычная С. В., Колесникова Л. А. О проблеме загрязнения аэрозолями на объектах горно-металлургической промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12 (специальный выпуск 35). — С. 3–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_35_3.

69. Иванов П.Н., Блохин Д.И., Загоршменный И.М. Экспериментальное исследование изменения физико-механических свойств антрацита при температурном воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 4-1. С. 41-51.

70. Измеров Н.Ф., Монаенкова А.М., Тарасова Л.А. и др. Профессиональные заболевания. Руководство для врачей. Т.1-2. /.; под ред. Н.Ф. Измерова.-М.: Медицина, 1996.

71. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах», утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.09.2018 № 462. Серия 05. Выпуск 44. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019. – 64 с.

72. Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда». Официальное опубликование: Официальный интернет-портал правовой информации. Электронный ресурс https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156555/(дата обращения: 12.11.2025).

73. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник для вузов. / Ю.Г. Фролов. М.: ООО ТИД «Альянс». – 2004. – 464 с.

74. Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А., Овчинникова Т.И., Колесников А.С. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 67-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

75. Курносов И.Ю., Филин А.Э., Тертычная С.В. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата. Безопасность техногенных и природных систем. 2024;(1):41-49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49>.

76. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 352 с.
77. Фукс Н.А. Успехи Механики аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 160 с.
78. Харитонов И.Л., Терёшкин А.И., Корнев А.В., Коршунов Г.И., Корнева М.В. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 53-59. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-53-59.
79. Чашин В.П., Сюрин С.А., Гудков А.Б., Попова О.Н., Воронин А.Ю. Воздействие промышленных загрязнений атмосферного воздуха на организм работников, выполняющих трудовые операции на открытом воздухе в условиях холода // Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 9. С. 20–26.
80. Чеботарёв А.Г., Семенцова Д.Д. Комплексная оценка условий труда и состояния профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий. Горная промышленность. 2021;(1):114–119. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-114-119.
81. Чеботарев А. Г. Состояние условий труда и профессиональной заболеваемости работников горнодобывающих предприятий. Горная промышленность. 2018; 1 (137): 92–95. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2018-1-137-92-95>.
82. Чеботарёв А.Г. Риски развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии у работников горнорудных предприятий // Горная промышленность. 2018. № 3 (139). С. 66–70. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-3-139-66-70.
83. Симонян. Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А. и др. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // Изв. Вуз. Чёрная металлургия. 2010 № 11. С. 68-75.

84. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М.Я. Юдашкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
85. Pope, C.A. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution / C.A. Pope, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, G.D. Thurston // JAMA – 2002 – №287(9) – P. 1132-1141.
86. Colinet, J.F. Best Practices for Dust Control in Coal Mining / J.F. Colinet, J.P. Rider, J.M. Listak, J.A. Organiscak, A.L. Wolfe // DHHS (NIOSH) Publication – 2010–110 –70 p
87. Gendler S.G., Rudakov M.L., Kuznetsov V.S. Evaluation Principles of the Dust Influence of Mining Enterprises on the Environment. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2019, vol. 56, iss. 3, pp. 62-69. DOI: 10.2478/lpts-2019-0020/.
88. Ma Q., Nie W., Yang S., Xu C., Peng H., Liu Z., Guo C. Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation. Environmental Pollution. 2020, article no. 114717.
89. Mamaev V.I., Ibraev Zh.A., Ligay V.A. and etc. Prevention of explosions of dust-methane-air mixtures. – М.: Nedra, 1990, 159 p. (In Russ.).
90. Wang, T., Liu, J., Wang, S., Jin L., Lin M., Ou Sh. Enhancement of the wettability of a coal seam during water injection: effect and mechanism of surfactant concentrations above the CMC. Environmental Science and Pollution Research. 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-25036-8.
91. Jung C.H., Lee K.W. Collection of aerosol particles by raindrops. Aerosol Science and Technology.
92. Zheng H., Jiang B., Wang H., Zheng Y. Experimental and numerical simulation study on forced ventilation and dust removal of coal mine heading surface. International Journal of Coal Science & Technology. 2024, vol. 11, article 13. DOI: 10.1007/s40789-024-00667-z.

93. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and Control Model for Coal Mine Gas and Coal Dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020, vol. 56, pp. 504–515. DOI: 10.1007/s10553-020-01161-3.

94. International Agency for Research on Cancer (IARC). *Press Release No. 359: Global lung cancer incidence according to subtype: new study highlights rising adenocarcinoma rates linked to air pollution* [Online]. IARC, 2025. Available at: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2025/02/pr359_E.pdf.

95. Health Effects Institute (HEI). *State of Global Air 2024: A Report from the State of Global Air Initiative* (GBD 2021 estimates) [Online]. HEI, 2024. Available at: https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/documents/2024-06/soga-2024-report_0.pdf.

96. Hinds W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. – New York: Wiley, 1999

97. World Health Organization (WHO). *88888888Air pollution* [Internet]. WHO, n.d. Available at: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС,

проф., д.т.н.

М.Р. Филонов



« 14 » *декабря* 2025г.

**МЕТОДИКА
ОЦЕНКИ ПЫЛЕВОЙ НАГРУЗКИ НА ОРГАНЫ ДЫХАНИЯ РАБОЧИХ
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА
ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ**

Москва 2025

Настоящая методика является результатом исследований, проводимых в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» по проблемам борьбы с пылью на горно-металлургических предприятиях.

Методика составлена проф., д.т.н. О.В. Скопинцевой (НИТУ МИСИС), доц., д.т.н. С.В. Баловцевым (НИТУ МИСИС) и аспирантом Б.П. Пернебеком (НИТУ МИСИС).

Методика одобрена и утверждена в «Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» (НИТУ МИСИС) и предназначена для оценки условий труда при воздействии на органы дыхания рабочих тонкодисперсной пыли с аэродинамическим диаметром частиц менее 10 мкм (PM10) и менее 2,5 мкм (PM2,5), а также для обоснования применения рациональных концентраций растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) с целью повышения эффективности пылеподавления и улучшения санитарно-гигиенических условий труда работников горно-металлургической отрасли. Методика ориентирована на снижение концентрации тонкодисперсных фракций пыли при выполнении погрузочно-разгрузочных работ.

Методика может применяться службами охраны труда и промышленной безопасности на горно-металлургических предприятиях при проведении оценки санитарно-гигиенических условий труда, а также при планировании мероприятий по снижению пылевой нагрузки на персонал.

ИСПОЛНИТЕЛИ:

проф., д.т.н. О. В. Скопинцева _____

доц., д.т.н. С. В. Баловцев _____

асп. Б.П. Пернебек _____

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В соответствии с Правилами безопасности в угольных шахтах и Общих правил безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств для уменьшения пылеобразования при погрузочных и разгрузочных работах должны применяться способы пылеподавления и пылеулавливания (орошение, пылеотсос, аспирация, туманообразование и др.), чтобы содержание пыли в воздухе рабочей зоны не превышало предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных действующими стандартами.

Особенностью разработанной методики является оценка пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли PM10 и PM2,5 в рабочей зоне при разгрузке угля вагоноопрокидывателями на коксохимических заводах, а также – на предприятиях по транспортировке и погрузке угля, на углеобогатительных фабриках и угольных терминалах.

Один из основных механизмов токсического действия микрочастиц PM10 и PM2,5 связан с их способностью индуцировать образование реакционноспособных видов кислорода (ROS). Увеличение уровней ROS снижает клеточную антиоксидантную способность, разрушает систему антиоксидантной защиты клеток и приводит к развитию окислительного стресса. Окислительный стресс вызывает прямое или косвенное повреждение ключевых клеточных компонентов, таких как липиды, белки и нуклеиновые кислоты, а также ингибирует восстановление ДНК.

В Методике использованы следующие обозначения:

$K_{\text{общий}}$ - массовая концентрация пыли в воздухе рабочей зоны, мг/м³.

D_{10} , $D_{2.5}$ - массовые доли PM10 и PM2,5 по фракционному анализу, %.

K_{PM10} , $K_{\text{PM2.5}}$ - концентрации фракций PM10 и PM2,5, мг/м³.

Q - объем легочной вентиляции за смену, м³/смена (N - смен/год, T – лет).

$ПН$ - пылевая нагрузка, мг или г.

$ПДК_{\text{сс}}$ - ПДК среднесменная, мг/м³.

$КПН$ - контрольная пылевая нагрузка.

η - эффективность снижения концентрации, 0-1.

$K_{\text{ПАВ}}$ - концентрация ПАВ, %.

$i = \text{PM}_{10}, \text{PM}_{2.5}$ – индекс учитываемой пылевой фракции.

Пылевая нагрузка (экспозиция) — средневзвешенная концентрация пыли за рабочую смену для конкретного работника или группы, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Коэффициент пылеподавления (η) — доля уменьшения концентрации (безразмерный, 0...1) при применении ПАВ: $\eta = (K_{\text{до}} - K_{\text{после}}) / K_{\text{до}}$.

ПАВ — поверхностно-активное вещество.

АПДФ – аэрозоли преимущественно фиброгенного действия.

Эффективность пылеподавления зависит от физико-химического состава и размеров частиц угольной пыли, концентрации ПАВ, параметров туманообразования (диаметра форсунок, расхода воды, давления водовоздушной смеси, схемы расстановки форсунок) и др., поэтому параметры пылеподавления должны устанавливаться экспериментально и адаптироваться при существенных изменениях физических, механических свойств и структурных особенностей орошаемой пыли.

2. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ РЕСПИРАБЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ ПЫЛИ PM_{10} И $\text{PM}_{2,5}$

Воздействие пыли на организм работника определяется как функцией концентрации аэрозоля во вдыхаемом воздухе, так и временем пребывания в запылённой среде. При этом респирабельные фракции (PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$) обладают наибольшей биологической активностью, поскольку способны проникать в нижние дыхательные пути и оказывать фиброгенное воздействие.

Данная методика включает расчет рабочих параметров пылевой нагрузки на органы дыхания персонала с выделением респирабельных фракций PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ в воздухе рабочей зоны и оценки влияния применения растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) на снижение экспозиции.

Исходные данные формируются по результатам производственного контроля и (или) специальной оценки условий труда. Для расчетов

рекомендуется использовать среднесменные значения концентраций и фракционного состава пыли.

Таблица 1 – Параметры расчета пылевой нагрузки на рабочего

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Источник получения данных
1	Среднесменная концентрация пыли	K_{cc}	мг/м ³	гравиметрия/прибор
2	Доля PM10	D_{10}	%	фракционный анализ
3	Доля PM2.5	$D_{2.5}$	%	фракционный анализ
4	Число смен в году	N	смен/год	график работы
5	Длительность контакта	T	лет	Стаж работы (количество лет контакта с АПФД)
6	Легочная вентиляция за смену	Q	м ³ /смена	категория труда
7	ПДК среднесменная	$ПДК_{cc}$	мг/м ³	нормативы
8	Концентрация ПАВ	$K_{ПАВ}$	%	0,1-02 (предлагаемая концентрация)

Оценку пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли PM10 и PM2,5 в рабочей зоне предлагается осуществлять путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов, увеличивающих общую пылевую нагрузку, если в массе витающей пыли присутствуют фракции PM10 и PM2,5.

Введем коэффициент K_i - коэффициент учета фракционного состава респирабельной пыли PM10 и PM2,5

$$K_i = \frac{D_i}{100}, \quad (1)$$

где D - процентное содержание фракции пыли;

$i = 1$ – фракция пыли PM2,5;

$i = 2$ – фракция пыли PM10.

Коэффициент K_i изменяется от 0 до 1: значение $K_i = 0$, если данная фракция отсутствует в общей массе пыли; $K_i = 1$, если вся масса пыли состоит из данной фракции.

Расчет пылевой нагрузки (ПН) на органы дыхания рабочего (или группы рабочих, если они выполняют аналогичную работу в одинаковых условиях) рассчитывается исходя из фактических среднесменных концентраций АПФД

в воздухе рабочей зоны, объема легочной вентиляции (зависящего от тяжести труда) и продолжительности контакта с пылью:

$$ПН = K_{cc}NTQ, \quad (2)$$

где K_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м³;

N – число рабочих смен в календарном году;

T – количество лет контакта с АПДФ;

Q – объем легочной вентиляции за смену, м³.

С учетом коэффициентов K_1 и K_2 формула (2) примет вид:

$$ПН_{10+2.5} = K_{cc}NTQ(1 + 0,5K_1 + 0,25K_2). \quad (3)$$

В формуле (3) коэффициент K_1 и K_2 отражают увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций РМ10 и РМ2,5. Если фракция РМ2,5 отсутствует, но вся масса пыли состоит из фракций РМ10, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,25 раз. Если фракция пыли РМ10 отсутствует, и вся масса пыли состоит из фракций РМ2,5, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,5 раза. При отсутствии фракций РМ10 и РМ2,5 пылевая нагрузка рассчитывается по стандартной формуле (2).

Полученные значения фактической ПН сравнивают с величиной контрольной пылевой нагрузкой, значение которой рассчитывают в зависимости от фактического или предполагаемого стажа работы, предельно допустимой концентрации пыли и категории работ.

Среднесменная концентрация (K_{cc}) — средневзвешенная концентрация пыли за всю рабочую смену, рассчитывается по формуле:

$$K_{cc} = \frac{K_1 \cdot t_1 + K_2 \cdot t_2 + \dots + K_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (4)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — концентрации пыли;

t_1, t_2, \dots, t_n — время отбора пробы.

Расчет контрольного уровня пылевой нагрузки. Контрольный уровень пылевой нагрузки (КПП) — это пылевая нагрузка, сформировавшаяся при

условии соблюдения среднесменной ПДК пыли в течение всего периода профессионального контакта с фактором:

$$КПН = ПДК \cdot N \cdot T \cdot Q, \quad (5)$$

где ПДК—среднесменная предельно допустимая концентрация пыли в зоне дыхания работника (равна 1 мг/м³ для респирабельной пыли, принята на основе зарубежного опыта).

При соответствии фактической пылевой нагрузки контрольному уровню условия труда относят к допустимому классу и подтверждается безопасность продолжения работы в тех же условиях.

Защита временем. При превышении контрольных пылевых нагрузок рекомендуется использовать способ «защита временем», т.е. необходимо рассчитать стаж работы (T_1), при котором ПН не будет превышать КПН. При этом КПН рекомендуется определять за средний рабочий стаж, равный 25 годам. В тех случаях, когда продолжительность работы более 25 лет, расчет следует производить исходя из реального стажа работы

$$T_1 = \frac{КПН_{25}}{K_{cc} \cdot N \cdot Q}, \quad (6)$$

где T_1 – допустимый стаж работы в данных условиях;

$КПН_{25}$ – контрольная пылевая нагрузка за 25 лет работы в условиях соблюдения ПДК. Рассчитывается по формуле (6) при $T=25$ лет.

В случае изменения уровней запыленности воздуха рабочей зоны или категории работ (объема легочной вентиляции за смену) фактическая пылевая нагрузка рассчитывается как сумма фактических пылевых нагрузок за каждый период, когда указанные показатели были постоянными. При расчете контрольной пылевой нагрузки также учитывается изменение категории работ в различные периоды времени.

Способ «защита временем» является экстенсивным способом, учитывающим накопительную функцию пылевой нагрузки на органы дыхания и дальнейший контроль пылевой нагрузки. Более перспективным способом является непосредственное осаждение витающей в воздухе

тонкодисперсной пыли и недопущение повторного ее взметывания. К таким способам можно отнести высоконапорное орошение, пневмогидроорошение, туманообразование.

3. МЕХАНИЗМ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ПРИ ОРОШЕНИИ ФОРСУНКАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАВ

Сложность оценки пылевой нагрузки заключается не только в определении запыленности воздуха, но и в необходимости учитывать долю наиболее опасных фракций. Витаящая пыль с размером частиц до 10 мкм обладает высокой проникающей способностью и может оказывать выраженное фиброгенное и токсикологическое воздействие на органы дыхания. Современные методики производственного контроля, как правило, ограничиваются измерением общей запыленности, без выделения респирабельной или торакальной доли, что не позволяет объективно оценить степень риска заболевания пылевой этиологии и не способствует разработке эффективных мер защиты. В данной методике предложена формула для учета пылевых фракций PM10 и PM2,5 в общей пылевой нагрузке (формула (3)), что актуально для производственных цехов углеподготовки, обогатительных фабрик, помещений угольных терминалов.

Для повышения эффективности орошения, когда пыль уже витает в вентиляционном потоке, необходимо уменьшить размеры капель жидкости, увеличить плотность потока капель, обеспечить более близкое к монодисперсному дробление капель, повысить влажность воздуха в зоне улавливания пыли и увеличить скорость полета капель. Этим требованиям в наибольшей степени отвечает орошение по технологии «сухой туман».

Пылеподавление по технологии «сухой туман» основано на формировании в рабочем объеме устойчивого аэрозольного облака, состоящего из капель воды с размером от 10 до 200 мкм. Мелкодисперсные капли обладают низкой скоростью осаждения и длительно удерживаются в зоне пылеобразования, что обеспечивает пространственное заполнение разгрузочной камеры и создание барьерного слоя, ограничивающего вынос

пыли воздушными потоками в объём здания углеподготовки (вагоноопрокидывателя). При этом достигается высокая вероятность взаимодействия капель с респирабельными фракциями угольной пыли, в первую очередь PM10 и PM2,5, за счёт сопоставимости аэродинамических размеров объектов взаимодействия и высокой численной концентрации капель.

Захват пылевых частиц аэрозольными каплями реализуется совокупностью механизмов. Для частиц диапазона PM10 определяющими являются инерционное соударение и перехват, при которых частица вследствие инерции отклоняется от линий тока и сталкивается с каплей или контактирует с ней при обтекании. Для более мелких частиц, включая PM2,5, возрастает вклад диффузионного переноса, обусловленного броуновским движением, что повышает вероятность контакта с каплей в условиях турбулентности и неоднородных скоростных полей. В результате столкновения формируются агрегаты «частица–капля» и «частица–капля–частица», что приводит к укрупнению дисперсной фазы и росту эффективной массы частиц.

Для эффективного пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями необходимо создать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрация смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 5-6 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена до 95-98% при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применении смачивателя СП-01 0,2%.

Применение поверхностно-активных веществ в указанных концентрациях усиливает эффективность пылеподавления за счёт снижения поверхностного натяжения воды и повышения смачиваемости углеродистой поверхности угля и минеральных включений. ПАВ обеспечивают быстрое разрушение гидрофобных свойств угольной пыли, уменьшают краевой угол

смачивания и повышают вероятность закрепления капли на частице при первичном контакте. Дополнительным эффектом является снижение склонности к «отскоку» частиц от капель и уменьшение времени формирования устойчивого жидкостного мостика, что ускоряет коагуляцию и перевод частицы из взвешенного состояния в осаждаемое. За счёт формирования более стабильной тонкой водной плёнки на поверхности пылевых частиц уменьшается вероятность вторичного пыления при повторном воздействии воздушных потоков.

Совмещённое применение форсунок, формирующих капли диаметром от 10 до 200 мкм, а также использование растворов ПАВ, обеспечивает повышение вероятности столкновения капля–частица, рост эффективности захвата респирабельных фракций, ускорение агломерации и последующего осаждения пыли. В частности, для участка вагоноопрокидывания это проявляется в локализации пылевого выброса непосредственно в момент разгрузки, снижении концентраций PM10 и PM2,5 в зоне дыхания персонала, а также в повышении стабильности санитарно-гигиенических показателей на протяжении смены.

4. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИИ ТУМАНООБРАЗОВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАВ

4.1. Меры безопасности при пылеподавлении по технологии «сухой туман»

Работы по эксплуатации системы «сухой туман» и высокодисперсного орошения выполняют персоналом, прошедшим вводный и первичный инструктажи, обучение безопасным методам работ и допущенным к обслуживанию оборудования высокого давления, пневмосистем и дозирующих узлов. Перед началом работ проверяют исправность форсуночных модулей, трубопроводов воды и сжатого воздуха, запорной арматуры, предохранительных клапанов, манометров, фильтров, а также наличие и работоспособность дренажа и устройств сброса давления.

Запрещается эксплуатация при утечках, повреждениях рукавов, отсутствии ограждений и при неисправной блокировке.

При работе форсуночных систем исключают нахождение персонала в зоне прямого факела распыла и в зоне возможного разрушения фитингов и рукавов. Любые работы по разборке, замене форсунок, фильтров и арматуры выполняют только после полной остановки установки, перекрытия подачи воды и воздуха и гарантированного сброса давления из магистралей. Запрещается устранять течи и подтягивать резьбовые соединения под давлением.

При применении ПАВ дозирование выполняют в закрытой таре и (при наличии) в вентилируемом шкафу или на оборудованном посту. Не допускается приготовление раствора в пищевой таре и использование неидентифицированных емкостей. Раствор готовят с соблюдением инструкции производителя ПАВ и паспорта безопасности, исключая смешивание с несовместимыми реагентами. Проливы раствора немедленно локализуют и удаляют, поскольку ПАВ повышают скользкость пола. Участок пролива ограждают и обозначают предупреждающими знаками.

В зимний период необходимо предотвращать обмерзание форсуночных модулей и трубопроводов. При наличии подогрева контролируют целостность теплоизоляции, исправность терморегуляторов и отсутствие перегрева. При туманообразовании учитывают риск ухудшения видимости. В местах прохода персонала предусматривают локальное ограничение подачи тумана и организационные меры, исключающие снижение безопасности перемещений.

Средства индивидуальной защиты выбирают с учётом пылевого фактора и аэрозоля раствора. Рекомендуется применение защитных очков или лицевых щитков, перчаток химстойкого исполнения при работе с раствором ПАВ, спецодежды, а также средств защиты органов дыхания по результатам оценки риска (как минимум фильтрующие полумаски при повышенной запыленности). После работ выполняют гигиеническую

обработку рук и открытых участков кожи. При возникновении признаков раздражения дыхательных путей или глаз работник выводится из зоны воздействия и направляется к медицинскому работнику предприятия.

4.2. Первая помощь пострадавшим

При попадании аэрозоля или раствора ПАВ в глаза выполняют промывание чистой водой в течение 10–15 минут при открытых веках, после чего пострадавшего направляют в медпункт. При попадании на кожу раствор удаляют салфеткой без растирания и промывают участок водой с нейтральным мылом, при сохранении раздражения обращаются за медицинской помощью. При вдыхании аэрозоля в высокой концентрации пострадавшего выводят на свежий воздух, обеспечивают покой и тепло, при затруднении дыхания вызывают медицинского работника и скорую помощь по установленному на предприятии порядку.

При травмах, связанных с оборудованием высокого давления (удары, разрывы рукавов, механические повреждения), немедленно прекращают работу установки, обеспечивают безопасность зоны, вызывают ответственное лицо и медицинского работника. При кровотечении накладывают давящую повязку, при подозрении на переломы выполняют иммобилизацию. При потере сознания контролируют дыхание и пульс, обеспечивают устойчивое боковое положение и вызывают скорую помощь. Дальнейшие действия выполняют согласно корпоративному стандарту первой помощи и инструкциям по охране труда.

4.3. Меры безопасности при работе с контрольно-измерительной аппаратурой

Контрольно-измерительную аппаратуру (пылемеры, пробоотборники, анемометры, термогигрометры, манометры, расходомеры) допускается применять при наличии поверки или калибровки в установленные сроки и при сохранности пломб. Перед измерениями проверяют заряд, целостность кабелей, исправность датчиков и отсутствие конденсата в измерительных каналах. Приборы размещают так, чтобы исключить их прямое воздействие факелом распыла и попадание капель в воздухозабор, поскольку это

приводит к завышению показаний и риску повреждения датчиков. При необходимости используют защитные насадки и каплеуловители, а точки отбора выбирают вне зоны прямого орошения.

Работы с электрооборудованием и приборами проводят с соблюдением требований электробезопасности. Запрещается эксплуатация приборов с поврежденной изоляцией, использование во влажной зоне без соответствующей степени защиты, а также подключение к нештатным источникам питания. При переносе приборов по площадке учитывают повышенную скользкость покрытий при наличии ПАВ и тумана. Приборы устанавливают на устойчивых штативах, исключая падение и удар. После измерений выполняют очистку внешних поверхностей, просушку (при необходимости) и корректное хранение в штатном футляре. Данные измерений фиксируют в журнале с указанием условий измерений, точки, времени, режима работы системы и статуса поверки прибора.



Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности» (АНО ДПО «ИПБ»)

Россия, 115193, г. Москва, ул. Петра Романова, дом 7, строение 1.
Тел. +74959700733 Эл. почта: info@tex-m.ru, ano-ipb@mail.ru

Орган по сертификации продукции: Номер в РАЛ: RA.RU.11ПБ98
Лицензия: ДЭ-00-013491 от 18 мая 2012 года
Лицензия: ПМ-00-016693 от 27 июня 2017 года

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

ПЕРНЕБЕКА Бектура Пернебекулы

на тему:

«РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.3 - «Безопасность труда»

Профессиональные заболевания, связанные с воздействием промышленных аэрозолей на человека, в частности угольной пыли, являются одними из наиболее распространённых. Они занимают третье место в общем списке профессиональных заболеваний после заболеваний, связанных с воздействием физических факторов, физических перегрузок и перенапряжения

При оценке условий труда работников на предприятии АНО ДПО «ИПБ» использованы результаты диссертационной работы Пернебека Б.П., обладающие научной и практической значимостью:

1. Анализ дисперсного состава пыли, улавливаемой аспирационной системой в зоне вогиноопакидывателей; дифференциальные и интегральные кривые распределения частиц пыли в зоне вогиноопакидывателей.
2. Химический состав органической массы углей различных стадий метаморфизма. Зависимость коэффициента атомного отношения кислорода к углероду от марки угля.
3. Исследование зависимостей времени осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя; зависимость скорости седиментации от размера пылевых частиц.

Считается, что применение результатов диссертационной работы является крайне актуальным и необходимым для улучшения условий труда работников в зоне вогиноопакидывателей на предприятии АНО ДПО «ИПБ».

Ректор
доц., к.т.н.



(Handwritten signature)

/А.А. Шилов/

22.12.2025г.