

На правах рукописи



ТРУБИЦЫНА ДАРЬЯ АНАТОЛЬЕВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЫРАБОТКАХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Специальность: 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Кемерово – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Научный руководитель

Хорешок Алексей Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры горных машин и
комплексов ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет»

Официальные оппоненты

Николаев Александр Викторович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры горной
электромеханики ФГАОУ ВО
«Пермский национальный
политехнический университет»

Кобылкин Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
лаборатории геотехнологических
рисков при освоении газоносных
месторождений.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС», г. Москва

Защита состоится 6 марта 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.321.02 на базе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел.: +7(3842)39-63-68 e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте: <https://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан « » _____ 202 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М.А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Увеличение производительности добычи угля, связанное с внедрением современного, высокопроизводительного оборудования, сопровождается интенсивной эмиссией аэрозоля в атмосферу рабочей зоны. Разрушение массива горных пород способствует активному накоплению пылевоздушных смесей в протяженных горных выработках. В условиях усложняющихся факторов прогнозирования геомеханических и аэродинамических процессов, а также модернизации технологий добычи, вопрос обеспечения безопасности в горных выработках приобретает еще большую значимость. Тем не менее, комплексные исследования по установлению закономерностей формирования пылевоздушной смеси и реальной интенсивности пылеотложений в российских угольных шахтах не проводились на протяжении нескольких десятилетий.

Взрывы пыле-метановоздушной смеси являются основной причиной аварий на угольных шахтах России и мира, влекущих за собой гибель шахтеров. В период с 2001 по 2020 годы вследствие экспоненциального увеличения объемов добычи угля возросло и число смертельных случаев. Это подчеркивает важность учета всех параметров, влияющих на безопасность, включая дисперсный состав отложившейся пыли и интенсивность ее накопления по сети выработок. Несмотря на нормативные требования по обеспечению безопасности в угольных шахтах средствами непрерывного автоматизированного контроля рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений, в текущих системах контроля отсутствуют эффективные методы, позволяющие в рамках единой многофункциональной системы одновременно контролировать образование взрывоопасного состава пылевоздушной смеси и интенсивность пылеотложений.

Поэтому исследование, направленное на разработку комплексной автоматизированной системы для непрерывного контроля аэродинамических процессов образования взрывоопасного состава и концентрации пылевоздушной смеси в рудничной атмосфере, а также величины интенсивности пылеотложений, является весьма актуальным.

Степень разработанности темы исследования. В рамках исследования, направленного на разработку способов и средств автоматического контроля аэродинамических процессов образования взрывоопасного состава пылевоздушной смеси в горных выработках угольных шахт, необходимо отметить, что данная тема уже получила значительное внимание со стороны многих отечественных и зарубежных ученых. В частности, работы таких исследователей, как И.Г. Ищук, В.В. Кудряшов, Г.А. Поздняков, П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, А.М. Быков, Э.Н. Медведев, А.В. Николаев, А.А. Трубицын, А.С. Кобылкин, Л.Я. Лихачев, Е.И. Онтин, К.А. Лебецкий, С.Б. Романченко, охватывают

широкий спектр технико-технологических вопросов, связанных с процессами образования аэрозолей, аэродинамикой и организационными аспектами контроля параметров рудничной атмосферы для обеспечения взрывобезопасности горных выработок. Однако, несмотря на значительный объем проведенных исследований, существующие методики и способы контроля не в полной мере адаптированы к современным условиям высокопроизводительной добычи в угольных шахтах, а также к специфической аэродинамической обстановке шахтной атмосферы и требованиям современных нормативных документов. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего исследования и разработки новых подходов в данной области для обеспечения безопасности и эффективности горных работ.

Цель работы – обоснование закономерностей аэродинамических процессов пылевоздушной смеси в выработках угольных шахт.

Идея работы заключается в комплексном учете аэродинамических процессов шахтных аэрозолей на основе автоматизированного контроля пылеотложений в горных выработках.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ состояния и аэродинамики рудничных аэрозолей в горных выработках, методов и средств контроля запыленности рудничной атмосферы и пылевзрывобезопасности горных выработок, исследовать закономерности образования пылевых отложений в горных выработках в зависимости от дисперсного и марочного состава угля в непосредственной близости к источникам интенсивного пылевыделения в процессе ведения горных работ.

2. Разработать методику контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт в зависимости от факторов, оказывающих влияние на аэродинамические свойства шахтных аэрозолей; разработать алгоритм расчета интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт, в том числе в реальном времени.

3. Разработать многофункциональную систему непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и пылеотложений в горных выработках и провести её стендовые и промышленные испытания.

Научная новизна работы:

- впервые установлены зависимости интенсивности пылеотложения от запыленности рудничной атмосферы, распределения концентрации шахтного аэрозоля и интенсивности пылеотложения по длине выработки от марочного состава угля.

- доказано, что марочный состав и степень метаморфизма угля влияют на дисперсность аэрозоля и плотность распределения пылевоздушной смеси при разрушении горного массива.

- определено, что дисперсный состав аэрозоля в диапазоне размеров частиц до 100 мкм каменных углей высокой стадии метаморфизма характеризуется мономодальным распределением с преимущественным содержанием фракций до 30 мкм. Угли марок Д и Г имеют полимодальное распределение с максимумом весовых долей фракций в диапазонах 30 и 60 мкм. Плотность распределения фракций зависит от марочного состава. С ростом степени метаморфизма угля плотность распределения пылевых фракций сдвигается на 20–25 % в сторону увеличения выхода мелких фракций пыли для углей марок К и Ж.

- научно обосновано использование спектрального показателя ослабления электромагнитной волны для определения и контроля концентрации аэрозоля в рудничной атмосфере и его дисперсного состава; решена задача рассеяния электромагнитной волны с заданным направлением на полидисперсные среды.

Теоретическая и практическая значимость состоит в следующем:

- получены закономерности распределения угольной пыли и интенсивности пылеотложений по длине горных выработок при добыче углей различной стадии метаморфизма на всех угольных шахтах Кузбасса;

- разработаны алгоритм и метод контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений в горной выработке в реальном времени;

- разработана подсистема многофункциональной системы безопасности шахты – система непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений на основе оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического излучения, расположенных под разными углами.

- разработанная система непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы может использоваться горнодобывающими предприятиями для соблюдения правил безопасности работников, а также для предотвращения появления аварийных ситуаций.

- результаты исследования могут использоваться проектными и научными организациями, а также образовательными учреждениями горного профиля для внедрения в учебный процесс.

Методология и методы исследования. В работе использован комплексный метод исследований, включающий обзор и анализ результатов исследований ученых и специалистов в области контроля аэродинамических процессов распределения пыли в горных выработках, лабораторные и шахтные исследования, моделирование и теоретический анализ физических и информационных процессов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Дисперсный состав и плотность распределения фракций пыли в пылевоздушной смеси горных выработок угольных шахт определяются степенью метаморфизма и марочным составом добываемого угля.

2. Измерение концентрации витающей в воздухе пыли и ее дисперсного состава возможно с помощью оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического излучения, расположенных под разными углами.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами метрологических испытаний прибора, полученных для внесения в Госреестр средств измерений и сравнительным анализом результатов расчетного метода и шахтных испытаний.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке методик и проведении комплекса лабораторных и шахтных исследований с целью выявления закономерностей распределения аэрозоля в рудничной атмосфере по сети горных выработок, распределения дисперсного состава отложившейся угольной пыли и интенсивности её отложения;

- в разработке метода непрерывного автоматического контроля концентрации аэрозоля в рудничной атмосфере и интенсивности пылеотложения по сети горных выработок в угольных шахтах;

- в разработке и испытаниях прибора непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и пылеотложения.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Тема диссертации соответствует пунктам 7, 11 паспорта специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»:

7) Создание на основе цифровых информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений.

11) Гидро-, аэро-, газо- и термодинамические процессы, методы и средства управления ими в массивах горных пород и грунтов, горных выработках и выработанном пространстве.

Реализация работы. Разработанный прибор непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений прошел процедуру испытаний по внесению в Госреестр средств измерений. Разработка документации для подготовки прибора к производству (глава 4) выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075–03–2021 138/3), (№ 075–03–2024–082–2). Результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО

«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Апробация работы. Основные положения докладывались на заседаниях Техсоветов Ростехнадзора; конференциях «Неделя горняка» (г. Москва, 2017-2018 гг.); на Российском Угольном Саммите (г. Москва, 2022 г.); на X Международном научном форуме Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие» (г. Донецк, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты исследования изложены в 18 научных работах, в том числе 11 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, а также получены 5 патентов РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, 2 приложения, изложена на 129 страницах машинописного текста, включая 44 рисунка, 7 таблиц, список использованных источников из 131 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, цели, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, научные положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

В первой главе приведен анализ состояния вопроса контроля запыленности атмосферы, прогноза пылеотложений и средств контроля пылевого режима в шахтах.

Пылеобразующая способность угольного массива является одной из важных характеристик, влияющей на аэрогазодинамические процессы в горных выработках. Технологические процессы добычи угля подземным способом неотъемлемо связаны с образованием угольной пыли в виде аэрозоля, его распространением по сети горных выработок, а также отложением. Пылеобразование зависит от большого числа как технологических, так и природных факторов и влияет на процесс переноса мелкодисперсных фракций угольной пыли в выработках.

К ключевым факторам относятся: рабочий режим комбайна и особенности конструкции его исполнительного механизма, параметры вентиляции, степень метаморфизма угля, уровень влажности угля, его прочностные характеристики, петрографический состав, наличие трещин, геологические нарушения и другие факторы.

Взрывчатая концентрация аэрозоля является одной из основных опасностей в угольных шахтах. При этом главную опасность представляют скопления отложившейся по сети горных выработок пыли. Если уровень концентрации, витающей в атмосфере выработок пыли, в последнее время

удалось существенно ограничить нормативно до 150–200 мг/м³ (что на два порядка меньше нижнего концентрационного предела взрываемости наиболее опасных пластов), то с пылеотложениями дело обстоит существенно сложнее. В призабойной зоне очистных и подготовительных выработок с исходящей вентиляционной струей опасные накопления отложившейся пыли могут образовываться за несколько часов или даже минут работы горной техники.

Анализ контроля запыленности в рудничной атмосфере и интенсивности пылеотложения в угольных шахтах показывает, что состояние пылевого режима не соответствует требованиям положений нормативных документов. В связи с этим требуется проведение исследований и установление закономерностей процесса распределения угольной пыли и пылеотложений по сети горных выработок в зависимости от марочного состава угля и комплекса технологических параметров, таких как нагрузка на забой, скорость вентиляции, а также поиск новых способов, средств, методов оценки и контроля концентрации угольной пыли в рудничной атмосфере и состояния пылевзрывобезопасности горных выработок.

Во второй главе на основании качественных и количественных результатов лабораторных и шахтных исследований разработан алгоритм расчета и контроля интенсивности пылеотложений. В результате проведенных комплексных исследований установлено, что дисперсный состав пыли, образующейся при разрушении каменных углей высокой стадии метаморфизма, характеризуется мономодальным распределением с преимущественным содержанием фракций до 37 мкм. Угли марок Д и Г имеют полимодальное распределение с максимумами весовых долей фракций соответственно в диапазонах 38–45 и 66–75 мкм.

Был проведен комплекс исследований дисперсного состава угольной пыли, образующейся при разрушении углей разной стадии метаморфизма и отложившейся в местах с наибольшей интенсивностью по сети горных выработок, который выполнялся по следующей методике.

Отбор проб отложившейся угольной пыли и угля для лабораторных исследований осуществлялся в соответствии с ГОСТ 21153.0-75.

Каждая пластовая проба делилась на части, одна из которых направлялась на определение влажности по ГОСТ Р 52911–2008 «Методы определения общей влаги», вторая проба массой 200–300 г разрушалась в приборе определения крепости ПОК и просеивалась через сито с сеткой № 05.

Определение гранулометрического состава образцов углей крупностью +0,1 мм проводили ситовым методом по ГОСТ 2093-82 «Топливо твердое. Ситовой метод определения гранулометрического состава», крупностью менее 0,1 мм – лазерным методом на дифракционном микроанализаторе размера частиц «Analyzette 22 СОМРАСТ».

Результаты исследований показали, что выход фракций пыли для каждой марки угля и в каждой точке отбора проб имеет специфические

закономерности. В образцах проб из продуктов разрушения из-под прибора определения крепости (ПОК) угля и комбайна характер распределения дисперсного состава с увеличением стадии метаморфизма угля изменяется с бимодального (угли марок Д и Г) к одномодальному (марки Ж, К, СС и Т). В средних значениях для углей марок Д и Г моды плотности распределения приходятся на частицы размером 37 и 72 (73) мкм, марок Ж и К – 37 мкм и 33 мкм соответственно. Как следует из данных, приведенных на рисунке 1 и в таблице 1, доля мелкодисперсных фракций с ростом стадии метаморфизма увеличивается в обеих пробах.

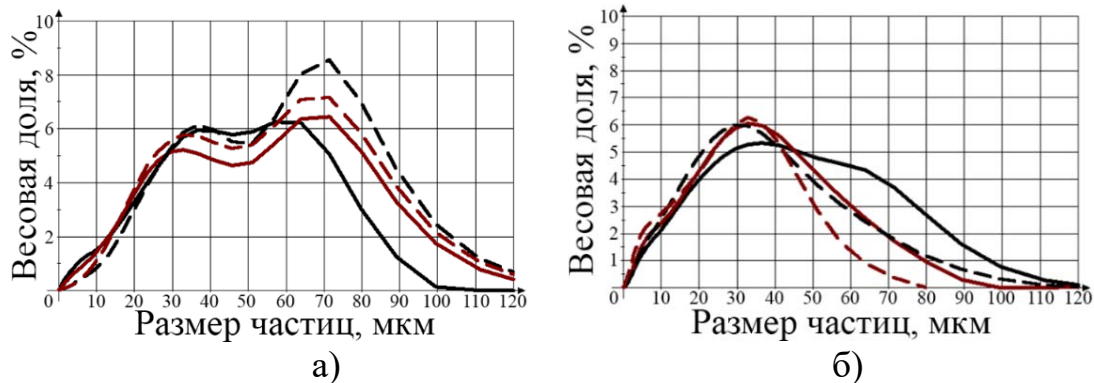


Рисунок 1 – Распределения дисперсного состава проб пыли угля, взятые из-под комбайна и ПОК: а) марки Г: соответственно сплошные (–) и штриховые (– – –) линии черные – Разрез Инской, к/ш 601; красная – ш. Заречная, лава 13-09; б) марки Ж: соответственно сплошные (–) и штриховые (– – –) линии черные – ш. Чертинская-Коксовая, лава 347; красная – ш. Юбилейная, к/ш 50-25

Результаты анализа проб продуктов разрушения из-под ПОК и комбайна подтверждают, что угли марок Д и Г имеют бимодальное распределение. С повышением стадии метаморфизма угля характер плотности распределения меняется на одномодальный. Кроме того, и в тех и других пробах характерной чертой является смещение максимума весовой доли частиц с 43 мкм до 34 мкм для угля марки К при увеличении весовой доли этих фракций. Высоко метаморфизованные угли характеризуются более высоким выходом тонких фракций, которые распространяются на значительные расстояния от источника пылеобразования. Максимумы плотности распределения размеров частиц для углей с выходом летучих веществ более 37% приходится на 43-44,5 мкм, 66-75 мкм и 38,7-51,4 мкм, 66-69,5 мкм (для марок Д и Г, соответственно). Для углей марок Ж – 37 мкм и К – 34,3-35,4 мкм. При этом в соответствующих максимумах весовая доля этих фракций увеличивается (с ростом метаморфизма) с 50,4–58,6% до 69–42,9%.

Анализ средних значений плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 50, 300 и 500 метрах от забоя показывает, что дисперсный состав пыли существенно зависит от марочного состава угля. С увеличением стадии метаморфизма выход мелких фракций угольной пыли значительно

увеличивается. Максимальное значение дисперсного состава смещается от низко- к высоко метаморфизованным углям с 41 мкм до 33 мкм, т. е. в среднем на 25 %.

Таблица 1 – Распределение дисперсного состава в пробах, отобранных из-под ПОК и комбайна (средние значения)

Марка угля	Максимальный размер частиц, мкм (1), весовая доля фракции, % (2), суммарная весовая доля фракций, % (3), в пробах					
	ПОК			Из-под комбайна		
	1	2	3	1	2	3
Д	43	6,21	50,4	44,5	6,1	58,6
	74,7	8,0	81,8	66,3	6,1	86,9
Г	38,7	6,2	51,4	39,8	5,8	60,3
	69,5	7,7	79,7	66	6,8	82,7
Ж	37	7,6	72,9	37	7,6	60,4
К	35,4	6,5	69	34,3	5,8	70,4

Таким образом, дисперсный состав и плотность распределения фракций пыли в пылевоздушной смеси горных выработок угольных шахт определяются степенью метаморфизма и марочным составом добываемого угля. В связи с этим требуется пересмотр норм осланцевания и качества пылевзрывозащитных мероприятий.

С увеличением степени дисперсности взрывчатость угольной пыли непрерывно возрастает; основным носителем взрывчатых свойств угольной пыли являются фракции размером менее 75 мкм. Максимум взрывчатости наблюдается при диаметре фракции < 10 мкм. По мере удаления от источника образования риск взрыва пыли возрастает, поскольку увеличивается степень ее дисперсности, что подтверждается данными, приведенными на графиках распределений угольной пыли по фракциям при разной удаленности места отбора проб от источника пылевыделения (рисунок 2). При удалении от забоя в пробах пылеотложений преобладают тонкие фракции.

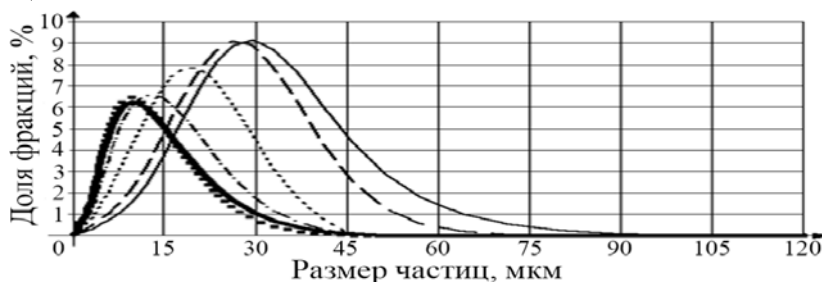


Рисунок 2 – Изменение дисперсного состава пылеотложений в зависимости от удаления от лавы шахты Заречная:

тонкие линии: сплошная (—) – расстояние от лавы 20 м; штриховая (---) – 50 м; точечная (···) – 100 м; штрихпунктирная (-·-·-) – 310 м; толстые линии: сплошная (—) – 510 м; точечная (···) – 710 м

В результате проведенных шахтных исследований установлено, что при современных нагрузках на очистные забои резко возрастают общее поступление тонких фракций в атмосферу и интенсивность отложения в

горных выработках угольной пыли. При этом интенсивность пылеотложений по длине выработки уменьшается с удалением от лавы, а максимум пылеотложений ($50\text{--}120 \text{ г/м}^3\cdot\text{сут}$) находится на расстоянии до 100 м от лавы, и далее происходит равномерное снижение пылеотложения до $8\text{--}20 \text{ г/м}^3\cdot\text{сут}$. При таких значениях интенсивности пылеотложений выработка переходит во взрывоопасное состояние уже через несколько часов работы по выемке угля.

Сравнение расчетных значений интенсивности пылеотложений, данных, полученных по подложкам и по результатам пересчета концентрации витающей пыли с помощью двух датчиков ИЗСТ-01 в соответствии с «Методикой (метод) измерения количества отложившейся пыли с использованием измерителей запыленности стационарных ИЗСТ-01» (свидетельство об аттестации № 28/RA.RU..RU.10473/2017) показало хорошую сходимость результатов шахтных испытаний и теоретических расчетов (погрешность находилась в диапазоне $\pm (16\div 24) \%$ в зависимости от диапазона). Таким образом, анализ результатов проведенного комплекса лабораторных и шахтных исследований показал, что для определения основного показателя уровня пылевзрывоопасности горных выработок в угольных шахтах необходимо определить величину интенсивности пылеотложения от одного источника пылевыделения до следующего, которое следует проводить на основе измерения концентрации витающей пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры и скорости движения воздуха. Для различных скоростей движения воздуха наблюдается общий характер максимальной интенсивности пылеотложений в 100 м от источника пылеобразования.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований оптического метода регистрации частиц в аэрозоле и сформулированы основные физические принципы для создания прибора непрерывного контроля запыленности воздуха и интенсивности пылеотложений, которые заключены в следующем научном положении: **измерение концентрации витающей в воздухе пыли и ее дисперсного состава возможно с помощью оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического излучения, расположенных под разными углами.**

В настоящее время методы определения концентрации в сочетании с определением дисперсного состава частиц, находящихся в свободном (взвешенном) состоянии в воздухе атмосферы можно разделить на два типа: контактные и бесконтактные. К контактным методам можно отнести методы пробоотбора, а к бесконтактным методам можно отнести оптические и частично трибоэлектрические.

Оптический метод измерения дисперсного состава и концентрации аэрозоля не воздействует на частицы, находящиеся в потоке, скорость измерения позволяет проводить измерения в режиме реального времени.

Функция распределения частиц для полидисперсной системы:

$$\int_0^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (1)$$

При этом определим $df(x) = f(x)dx$ как долю частиц из диапазона размеров $(x, x + dx)$.

Порядки момента определяются через следующую формулу:

$$x_{mn} = \left[\frac{\int_0^{\infty} x^m f(x)dx}{\int_0^{\infty} x^n f(x)dx} \right]^{\frac{1}{m-n}}, \quad (2)$$

где n, m – обозначения порядка момента функции распределения.

Основные порядки моментов: x_{10} – среднесчетный, x_{30} – среднеобъемный, x_{43} – среднемассовый.

Анализ литературных данных показал, что описания различных гранулометрических систем с унимодальным распределением можно применять следующие обобщенные законы распределения: гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение, нормальное распределение.

Частица, находящаяся в поле электромагнитного излучения, взаимодействует с ним и переизлучает попадающее на неё излучение в иных направлениях, чем первоначальное поле.

В то же время первоначальный поток излучения ослабляется за счет поглощения излучения самой частицей, а также за счет рассеяния излучения на частице. Введем количественные параметры оценки влияния частицы на поле излучения:

$$Z_{\text{ослабления}} = Z_{\text{рассеяния}} + Z_{\text{поглощения}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{рассеяния}}$ – доля излучения, ушедшего из рассматриваемого пучка; $Z_{\text{поглощения}}$ – доля излучения, поглощённого из пучка.

Оценка взаимодействия частиц с излучением через коэффициенты с учетом площади поверхности частиц с попадающим либо рассеиваемым излучением:

$$K_x = \frac{\pi D^2}{4} Z_x, \quad (4)$$

где Z_x – соответствующая оценка излучения, D – приведенный диаметр частицы.

Индикатриса рассеяния выражается как функция отношения интенсивности светового потока, отраженного в каждое значение угла θ , к полному потоку излучения, направленного на частицу. Данная функция является безразмерной от угла рассеяния θ , а сумма ее значений (интеграл) по углу рассеяния равен единице. Количественные характеристики для идеальных частиц – однородных и сферической формы, определяются двумя параметрами – показателем преломления материала, составляющего частицу, и безразмерным параметром дифракции α :

$$m = n - in', \quad (5)$$

где n – показатель преломления, n' – показатель поглощения, i – комплексный показатель, мнимая единица;

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (6)$$

λ – длина волны зондирующего излучения.

В качестве частиц, на которых происходит рассеяние излучения, могут выступать частицы с размерами от молекулы до витающих частиц угля размерами десятки микрометров, а также различные оптические неоднородности. Если размер частицы менее $\lambda/15$, то наблюдается рэлеевское рассеяние. При значениях более $\lambda/15$ – рассеяние Ми, при размерах частицы, сопоставимых с длиной волны λ – преобладает дифракционное рассеяние. Также теория Рэля имеет еще ряд существенных ограничений для применения при измерениях реальных пылевых аэрозолей, так как теория Рэля применима лишь при выполнении ряда условий: если среда, в которой распространяется зондирующее излучение, и частицы не содержат свободные заряды; если магнитная проницаемость среды и частицы одинакова; если размер рассеивающей частицы не более 10 % длины волны; если интенсивность рассеянного света вычисляется для точек весьма удалённых от возмущающей частицы (в дальней зоне $kr \gg 1$).

Для работы с частицами, не подчиняющимися рэлеевскому закону рассеяния, применима теория рассеяния Ми, которая показывает трансформацию индикатрис рассеяния при возрастании размеров рассеивателей. Теория Ми основана на разложении уравнений переизлучения электромагнитной волны (7). Также в теории Ми индикатрисы теряют свою симметричность – рассеяние вперед может быть значительно больше, чем рассеивание назад, и индикатриса рассеяния становятся многолепестковой. Кроме того, снижается частотная зависимость интенсивности рассеяния по отношению к закону Рэля.

Аналитическое решение проблем эффективности рассеяния и получения индикатрисы рассеяния было получено в результате решения задачи рассеяния электромагнитной волны с заданным направлением на однородной частице сферической формы.

Ослабление зондирующего пучка в монодисперсной среде с частицами диаметром D и количеством C_n , при толщине слоя l , описывается законом Бугера. Этот закон позволяет анализировать взаимодействие света с аэрозольными частицами.

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (7)$$

где $I(l)$ – интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной l ; k_λ – спектральный показатель ослабления, зависящий от длины волны зондирующего пучка, при условии нахождения частиц, независимо рассеивающих пучок.

Спектральный показатель преломления определяется как:

$$k_{\lambda} = \frac{\pi D^2}{4} C_n Q(\alpha, m) \quad (8)$$

где $Q(\alpha, m)$ – фактор эффективности ослабления с параметром дифракции и комплексным показателем преломления (для угля $m = 1,54 - 0,5i$).

Характеристики излучения для монодисперсной среды получаются суммированием результатов одиночных взаимодействий с каждой частицей.

При переходе к работе с полидисперсными средами сохраняется предположение, что частицы имеют сферическую форму, и рассеяние света на частицах происходит независимо друг от друга. Также слой аэрозоля рассматривается как достаточно тонкий, чтобы исключить влияние рассеивания второго и более высоких порядков.

Переход от счетной концентрации к массовой, используя (1):

$$C_m = C_n \frac{\pi \rho_k C_n^2}{6} \int_0^{\infty} D^3 f(D) dD, \quad (9)$$

Спектральный показатель ослабления полидисперсной системы для массовой концентрации:

$$k_{\lambda} = \frac{\pi C_m \int_0^{\infty} Q(\alpha, m) D^2 f(D) dD}{2 \rho_k \int_0^{\infty} D^3 f(D) dD}, \quad (10)$$

где ρ_k – плотность частиц.

Этот показатель определяет дисперсность пылевых частиц в атмосфере шахты. Показатели дисперсного состава пыли и ее влажность являются существенными, т.к. оказывают влияние на интенсивность пылеотложений. Дисперсный состав пыли и влажность оказывают существенное влияние на сдуваемость пыли. Если пыль сухая, то скорость, при которой начинается ее сдувание, гораздо ниже. Одновременно, по мере продвижения запыленного воздуха по горным выработкам его дисперсный состав изменяется. Это происходит за счет того, что выпадают наиболее крупные фракции пыли.

Интенсивность пылеотложения, полученная по результатам проведенных лабораторных и шахтных исследований, определяется по формуле:

$$P_t = 86,4 \cdot \frac{f(r) v l^B}{S(W+W_B)}, \quad \text{г/м}^3 \cdot \text{сут}, \quad (11)$$

где v – скорость движения воздуха по выработке, м/с; l – расстояние от источника пылеобразования, м; S – сечение выработки, м²; B – коэффициент, учитывающий влияние степени метаморфизма угля; $f(r)$ – суммарное значение функции распределения частиц по размеру в момент измерения концентрации, мг/м³; W – естественная влажность угля, %; W_B – относительная влажность воздуха в горной выработке, %.

Проведенные теоретические исследования позволили разработать систему непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений на основе оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического

излучения, расположенных под разными углами. Это позволило с минимальной погрешностью измерения не только регистрировать концентрацию витающей пыли, но и увеличить видимый спектр размеров частиц до диапазона 0–150 мкм, что дало возможность для практического осуществления мгновенного анализа дисперсного состава витающей пыли, необходимого для расчета интенсивности пылеотложений до следующего источника интенсивного пылевыделения.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных и шахтных испытаний по внесению в Госреестр прибора СКИП.

Испытания проведены в соответствии с разработанной методикой и ГОСТ Р 54776-2011 с целью утверждения типа средства измерения прибора СКИП. Измерение интенсивности пылеотложения осуществляется через измерение массовой концентрации пыли и ее дисперсного состава. Основные метрологические характеристики прибора СКИП: количество отложившейся пыли до $150 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$; массовая концентрация витающей пыли от 0 до 3000 мг/м^3 ; скорость движения воздушного потока от 0,1 до 20 м /с; температура воздушного потока от -40 до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность воздушного потока от 20 до 90 % (при $+20^\circ\text{C}$); диапазон диаметров частиц от 0 до 150 мкм.

На рис. 3 представлена схема установки прибора СКИП и подложек в горных выработках, а результаты испытаний приведены на рис.4.



Рисунок 3 – Схема установки прибора СКИП и пластмассовых или металлических подложек в горной выработке

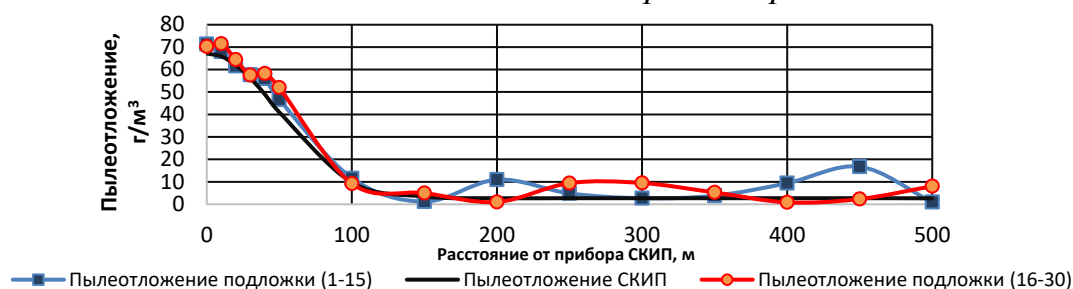


Рисунок 4 – Результаты сравнительного анализа измерения интенсивности пылеотложений с помощью СКИП и расчетным методом с помощью подложек

Проведенный комплекс лабораторных и шахтных исследований разработанного прибора СКИП подтвердил правильность физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-технической задачи автоматического контроля аэродинамических процессов пылевоздушной смеси в выработках угольных шахт.

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

1. В результате проведенного комплекса лабораторных и шахтных исследований на 40 шахтопластах Кузбасса изучены закономерности распределения угольной пыли в рудничной атмосфере и интенсивности пылеотложений по сети горных выработок в угольных шахтах Кузбасса.

2. Установлено, что дисперсный состав отложившейся угольной пыли в диапазоне размеров частиц до 100 мкм каменных углей высокой стадии метаморфизма характеризуется мономодальным распределением с преимущественным содержанием фракций до 30 мкм. Угли марок Д и Г имеют полимодальное распределение с максимумом весовых долей фракций в диапазонах 30 и 60 мкм. Также установлено, что на участке горной выработки от источника пылевыделения до отметки 50–70 м характер пылеотложений определяется интегральной плотностью распределения фракций более 20 мкм и описывается гиперболической зависимостью. Далее по выработке характер распределения пылеотложений носит линейный характер и определяется суммарной плотностью распределения фракций до 20 мкм.

3. Установлено, что определение величины интенсивности пылеотложения от первого источника интенсивного пылевыделения до следующего следует проводить на основе нахождения концентрации в рудничной атмосфере, витающей вблизи источника интенсивного пылевыделения пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха.

4. Проведенные теоретические исследования позволили разработать метод и систему непрерывного автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений на основе оптического метода малых углов рассеяния с применением нескольких приемников оптического излучения, расположенных под разными углами. Это позволило с минимальной погрешностью измерения не только регистрировать концентрацию витающей пыли, но и увеличить видимый спектр размеров частиц до диапазона 0–150 мкм, что дало возможность для практического осуществления мгновенного анализа дисперсного состава витающей пыли, необходимого для расчета интенсивности пылеотложений до следующего источника интенсивного пылевыделения.

5. Проведенный комплекс лабораторных и шахтных исследований разработанной системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений подтвердил правильность

разработанной физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт.

6. Разработанный прибор непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений СКИП прошел испытания по установлению типа средства измерения и процедуру внесения в Госреестр средств измерений.

Рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы:

Результаты, полученные в исследовании, рекомендованы для применения в области машинного зрения для эффективного позиционирования в беспилотных проектах. Данные, полученные с помощью разработанного прибора, рекомендуется использовать для корректировки работы вентиляционных установок с целью снижения потребления электроэнергии в часы пиковой нагрузки, а также для прогнозирования угроз и оптимизации мер по управлению аэродинамическими процессами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Трубицына Д.А. Умные системы непрерывного автоматического контроля отложений пыли по сети горных выработок угольных шахт / С.Н. Подображин, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – вып. 3. – С. 6–17.

2. Трубицына Д.А. Исследование интенсивности пылеотложений в угольных шахтах / Д.А. Трубицына, Д.С. Хлудов, Н.В. Трубицына // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 62–67.

3. Трубицына Д.А. Разработка системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложения как подсистемы многофункциональной системы безопасной угольной шахты / Д.А. Трубицына // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – вып. 12. – С. 58–64.

4. Trubitsyna D.A., Khoreshok A.A., Dolbnya O.V., Ermakov A.N., Varnavskiy K.A. Artificial intelligence use for increasing the efficiency of automatic control of aerodynamic processes in mine workings of coal mines // Journal of Mining and Geotechnical Engineering. – 2024. – №3(26). – pp. 43-61. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-3-43-61

5. Голоскоков С.И. Состояние и основные направления снижения крупных аварий на угольных шахтах / С.И. Голоскоков, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 1. – С. 122–130.

6. Романченко С.Б. Производственный мониторинг взрывоопасных аэрозолей в шахтах: актуальность, испытания, перспективы / С.Б. Романченко, А.А. Трубицын, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра

по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – вып. 4. – С. 42–51.

7. Трубицына Д.А. Исследование дисперсного состава отложившейся пыли углей различной стадии метаморфизма / Д.А. Трубицына, Д.С. Хлудов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 13–23.

8. Трубицына Д.А. Результаты шахтных исследований интенсивности пылеотложений по сети горных выработок / Д.А. Трубицына, А.А. Анисимов, Д.С. Хлудов, С.В. Оленников, Н.В. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 68–74.

9. Трубицын А.А. Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха / А.А. Трубицын, С.Н. Подображин, В.В. Скатов, Я.С. Ворошилов, С.Н. Мусинов, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 6–13.

10. Трубицын А.А. Формирование системы автоматизированного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, С.В. Оленников, С.Н. Мусинов, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 6–14.

11. Ворошилов Я.С. Разработка метода и системы контроля интенсивности пылеотложений для повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт / Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – вып. 4. – С. 28–41.

Прочие публикации:

12. Трубицына Д.А. Разработка инновационной методики и системы мониторинга уровня пылеосаждений для усиления мер безопасности против пылевых взрывов на угольных шахтах РФ / Д.А. Трубицына, А.А. Хорешок // Материалы X Международная научно-практическая «Инновационные перспективы», Донецк: Донецкий национальный технический университет. – 29 мая 2024. – С. 115-121.

13. Трубицына Д.А. Разработка прибора для контроля запыленности и интенсивности пылеотложения в угольных шахтах / Д.А. Трубицына, Р.Д. Козлов // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России». – Прокопьевск. – 26 апреля 2024. – С. 119-122.

Патенты

14. Патент на полезную модель № RU 61347 U1. Устройство для измерения скорости воздуха в горных выработках / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, С.П. Ворошилов, В.Е. Седельников, Д.С.

Хлудов, Д.А. Трубицына. – № RU 61347 U1. Заявка: 2006137460/22, 23.10.2006, Опубликовано: 27.02.2007.

15. Патент на полезную модель № 72547 U1. Устройство для измерения концентрации пыли в шахтной атмосфере / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Д.А. Трубицына [и др.] – № 72547 U1. Заявка: 2007149462/22, 27.12.2007, Опубликовано: 20.04.2008.

16. Патент на полезную модель № RU 80502 U1. Прибор для измерения концентрации пыли / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, Попов М.С., Седельников В.Е. / – № RU 80502 U1. Заявка: 2008139395/22, 03.10.2008, Опубликовано: 10.02.2009.

17. Патент на полезную модель № 80503 U1. Датчик для измерения концентрации пыли / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Я.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, М.С. Попов, В.Е. Седельников. – № 80503 U1. Заявка: 29.09.2008, Опубликовано: 10.02.2009.

18. Патент на изобретение № 2608009 С. Способ определения интенсивности пылеотложения и устройство для его осуществления / Д.А. Трубицына, А.А. Трубицын, Н.П. Пинчук, Я.С. Ворошилов. – № 2608009 Заявка: 2015133725, 11.08.2015, Опубликовано: 11.01.2017.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1-4], [7], [8], [12], [13] – разработка основных теоретических положений, выполнение моделирования и анализа полученных результатов, формулирование выводов, проведение испытаний, обобщение результатов испытаний, написание основного объёма статьи;

[5, 9] – обработка, описание и визуализация данных, формулирование выводов, написание основного объёма статьи;

[10] – описание разработанной модели;

[4], [6] – координация работы соавторов, анализ и описание полученных результатов;

[11] – написание основного объёма статьи по предоставленным расчётным результатам;

[14-18] – разработка полезной модели или изобретения в соавторстве, тестирование основных результатов, подготовка сопроводительных документов для заявки.