

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»
(ФГБОУ ВО КузГТУ)

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»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Хорешок Алексей Алексеевич

Кемерово – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	10
1.1. Анализ состояния аэродинамических процессов и свойств рудничных аэрозолей.....	10
1.2. Методы и средства контроля пылевоздушной смеси в горных выработках.....	21
1.3. Методы измерения концентрации пыли.....	28
1.4. Выводы.....	31
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	33
2.1. Исследование закономерностей аэродинамических процессов распространения витающей угольной пыли в атмосфере сети горных выработок и пылеотложений	33
2.2. Исследование закономерностей процесса распространения витающей в атмосфере угольной пыли по сети горных выработок и пылеотложений.....	39
2.3. Исследование интенсивности и дисперсного состава пылеотложений по сети горных выработок угольных шахт	51
2.4. Анализ эмпирической модели пылеотложения.....	57
2.5. Влияние физических параметров и скорости потока воздуха на интенсивность пылеотложения.....	61
2.6. Разработка методики контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт по сети горных выработок.....	64
2.7. Выводы.....	73
3. ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ШАХТНОГО ВОЗДУХА	75
3.1 Обоснование методики контроля аэродинамических процессов шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений в горных выработках.....	75

3.2. Разработка многофункциональной системы непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и пылеотложений в горных выработках	80
3.3. Выводы	86
4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ И ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КАК ПОДСИСТЕМЫ МФСБ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ	88
4.1. Требования, предъявляемые к системе непрерывного автоматического контроля рудничной атмосферы	88
4.2. Принцип работы прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений	89
4.3. Испытания прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений в шахтных условиях.....	91
4.4. Результаты испытаний прибора СКИП	94
4.5. Средства измерений и структура передачи полученных сигналов	95
4.6. Выводы	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	102
Список литературы	107
Приложение А.....	123
Приложение Б	124

ВВЕДЕНИЕ

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 пылевыведения в процессе ведения горных работ.

2. Разработать методику контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт в зависимости 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 быть внедрены образовательными учреждениями горного профиля 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.

1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

1.1. Анализ состояния аэродинамических процессов и свойств рудничных аэрозолей

Уголь – широко распространенный источник энергии в мире, который остается непоколебимым в качестве основного источника несмотря на текущие призывы к использованию экологически чистой энергии. Согласно статистике, экономические потери из-за аварий на угольных шахтах составляют около 10 миллиардов рублей за десять лет с 2011 по 2021 год.

В настоящее время важнейшей проблемой при проведении подземных горных работ является обеспечение безопасности и предотвращение аварийных ситуаций. Ударная волна, возникающая при взрыве метана, движется впереди фронта пламени по горной выработке и взметывает отложившуюся угольную пыль, создавая в атмосфере взрывчатую концентрацию аэрозоля. Её величина, в зависимости от степени взрывчатости, изменяется для разных угольных пластов в широких диапазонах от 20 до 100 г/м³ и более [1]. Пылевзрывобезопасность горной выработки определяется количеством отложившейся угольной пыли в расчете на единицу объема горной выработки, способной перейти во взвешенное состояние при взрыве [2]. В соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утвержденных приказом Ростехнадзора от 8.12.2020 № 507, зарегистрированных Минюстом России 18.12.2020 № 61587 (далее – Правила безопасности в угольных шахтах), многофункциональная система безопасности (МФСБ) шахты должна содержать подсистему контроля запыленности воздуха и пылевых отложений [3,4].

С развитием и внедрением высокопроизводительной выемочной техники увеличивается скорость добычи угля, что приводит к увеличению выбросов газов и аэрозолей, ускорению воздушных потоков в шахтах и повышению уровня пыли в рудничной атмосфере [5]. Эффективные методы борьбы с опасными концентрациями аэрозолей в шахте играют основную роль в снижении возникновения взрывов. Увеличение коэффициента машинного времени работы механизированных комплексов в проходческих и очистных забоях сопровождается

значительным увеличением нагрузок на горный массив и увеличением пылевыведения в атмосферу. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность накопления пыли, а также повышает уровень смертельного травматизма [6 - 9].

Интенсивность пылевыведения из горного массива в шахте определяется разнообразием источников, которые действуют одновременно: как различные производственные процессы, так и разрушение угля [10, 11]. При этом состав рудничной пыли в атмосфере неоднороден, так как она состоит из угольных и породных частиц. Количественные соотношения компонентов зависят от технологических процессов и крепости пород, подвергающихся разрушению [12-15].

Улучшить контроль над уровнем запыленности шахтной атмосферы возможно с помощью трехмерных вычислительных моделей. В исследованиях [16-17] описывается создание такой модели на основе данных, полученных с пылемеров.

На шахтах в Китайской Народной Республике для контроля уровня запыленности рудничного воздуха и снижения воздействия угольной пыли на работников была создана модель облачного мониторинга. Благодаря непрерывному мониторингу формируется база данных, анализ которой позволяет сделать обоснованный вывод о наиболее опасных местах по пыли в шахте и сформировать рекомендации по улучшению условий труда [18-19].

Одним из основных опасных свойств аэрозоля является её взрывоопасность [20]. Угольная пыль, скапливающаяся в шахтных выработках и преобразующаяся в аэрозольное состояние в результате взрыва, способна значительно увеличить разрушительные последствия происшествия [21]. Анализ аварийности и травматизма на угольных шахтах показал, что возгорание метановоздушной смеси и угольной пыли представляет собой одну из основных опасностей при проведении горных работ. В нормативной документации Российской Федерации по безопасности проведения подземных горных работ предусмотрены обязательные требования к обеспыливанию рудничного воздуха, контроля параметров

концентрации аэрозоля в рудничной атмосфере и контролю пылевзрывобезопасности горных выработок.

Наиболее разрушительные катастрофы происходят в результате совпадения трех основных факторов во времени и пространстве [22]:

- наличие опасной концентрации метана определенного объема;
- наличие угольной пыли в горных выработках, способной перейти во взвешенное состояние с концентрацией, превышающей нижний предел взрываемости;
- наличие источника воспламенения метана (пожары, ведение взрывных работ, неисправное электрооборудование и др.).

Интенсификация очистных работ привела к изменению всех геомеханических и пылеаэродинамических процессов, происходящих в забое. По итогам 2023 года среднесуточная нагрузка на забой в российских шахтах составила более 10000 т/сут [22]. При этом следует отметить, что в Кузбассе количество забоев, добывающих более миллиона тонн угля в год, составляет уже более 50, что соответствует нагрузке на забой 8000–12000 т/сут. Основными факторами, влияющими на пылевзрывоопасное состояние горных выработок, являются интенсивность пылеотложения и дисперсный состав угольной пыли. При увеличении нагрузок на очистные забои эти факторы приобретают решающее значение, так как увеличивается общее поступление угольной пыли в атмосферу и, следовательно, интенсивность ее отложения по сети горных выработок. Кроме того, значительно увеличивается выделение тонких, наиболее взрывоопасных фракций [22-24].

При разрушении горного массива удельное пылевыведение играет важную роль в прогнозировании пылевой обстановки в забое. Этот показатель определяется тремя основными факторами: влажностью, мощностью пласта и способностью угля к измельчению для конкретного комбайна. На основании удельного пылевыведения принимаются меры по борьбе с аэрозолями. Регламентация этих мероприятий и предупреждение пылеобразования осуществляются в соответствии с Руководством по безопасности «Рекомендации по прогнозу и выбору мер,

направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах» (Ростехнадзор № 121 от 20.03.2023 г.) [25].

В связи с этим проблема исследования процессов распространения аэрозоля и осаждения частиц в горных выработках, совершенствование методов и способов обеспечения пылевзрывобезопасности в настоящее время является одной из актуальнейших [26].

Интенсивность осаждения определяется путем измерения изменения средней концентрации пыли в воздухе; обметанием пыли, осевшей на поверхности выработки; сбором осевшей пыли на подложках, а также с помощью расчетных методов. Методика и теоретические основы определения интенсивности осаждения пыли приведены в работах [24, 27, 28].

Приведенный метод не позволяет определить точное распределение частиц по системе горных выработок, так как значения скорости движения воздуха и уровня запыленности не являются постоянными величинами. Метод обметания осевшей пыли довольно трудоемкий и применяется редко. Метод сбора пыли на подложки позволяет определить пылеотложение только на почву выработки, требуя последующего пересчета для оценки общего пылевого накопления в выработке [29].

Для мониторинга загрязнения шахтного воздуха и снижения возможности взрыва в шахте возможно использование технологии дистанционного зондирования. Предварительные расчеты, приведенные в исследовании, доказывают её рентабельность, но все же проверка данного способа в реальных условиях необходима [30].

Метод контроля пылеотложений с помощью скрубберов. В исследовании [31] описан процесс, при котором частицы пыли под действием диффузионных и электростатических сил сталкиваются с мокрым сетчатым фильтром, установленном в скруббере. Скорость заполнения фильтра аэрозолями отражает загрязненность шахтной атмосферы. Этот метод имеет также ряд недостатков, в том числе частое техническое обслуживание, так как накопленные частицы

снижают производительность воздухоочистительной машины, что приводит к снижению улавливаемых частиц пыли.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время отсутствует методика определения интенсивности пылеотложения в горных выработках, которая была бы достаточно точной, эффективной и надежной одновременно.

На запыленность рудничной атмосферы влияют как природные, так и технологические факторы. Природные факторы, такие как вещественный состав угля, его степень метаморфизма, влажность, сопротивляемость разрушению, а также мощность пласта оказывают влияние на уровень разрушаемости угля. Технологические факторы: режим разрушения, скорость движения воздуха, а также конструктивные особенности комбайна влияют на переход пылевых частиц во взвешенное состояние.

Исследования, проведенные в МакНИИ и ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, показали, что при исключении влияния природных факторов режимы разрушения и конструктивные особенности исполнительного органа комбайна существенно влияют на содержание пыли в разрушенном угле [32, 33].

Увеличение скорости подачи комбайна снижает содержание пыли, причем наибольшее снижение наблюдается при скорости подачи до 0,04–0,06 м/с. Дальнейшее увеличение скорости подачи комбайна оказывает незначительное влияние на уровень пыли в раздробленном угле [34].

На выемочных комбайнах, где используются скорости резания в пределах от 2 до 4 м/с, изменение содержания пыли в угле можно рассматривать как пропорциональное скорости резания. Также прослеживается зависимость между числом резцов в линии резания и содержанием пыли в угле. Увеличение времени приложения усилий к резцам для отбойки угля в 1,8–2 раза позволяет сократить расход энергии на 1,3–1,6 раза, а также уменьшить образование пыли при равных условиях [34].

Эффективность процесса выдувания пыли из разрушаемой горной массы и её загрузки на конвейер напрямую зависит от особенностей конструкции выемочных

комбайнов. Эти особенности влияют на скорость движения вентиляционной струи, что в свою очередь определяет результативность удаления пыли.

Исследования, проведенные НЦ ВостНИИ [35-36], показали, что величина пылевыведения при работе выемочных комбайнов также зависит от различных природных и технологических факторов. Согласно представленным данным, увеличение естественной влажности угля существенно снижает запыленность воздуха, в то время как увеличение коэффициента крепости угля и мощности пласта приводит к увеличению пылевыведения (см. рисунок. 1.1).

Проведенные исследования показали, что оценка пылевой обстановки в очистном забое представляет собой сложную задачу из-за множества влияющих факторов. Для более точной оценки было предложено использовать удельное пылевыведение выемочных и проходческих комбайнов в процессе их работы [37-39]. Этот критерий является интегральным показателем, учитывающим как природные, так и технологические факторы в комплексе.

В работе [40] представлена зависимость между содержанием пыли в разрушенном угле и удельным пылевыведением (см. рисунок 1.2). Проведенные исследования запыленности воздуха и анализ содержания пыли в разрушенном угле в 64 очистных выработках, где использовались различные типы комбайнов (10 видов), показали, что от 1,7 % до 2,5 % образующейся пыли переходит во взвешенное состояние [41]. Кроме того, было установлено, что тип комбайна не оказывает существенного влияния на данный показатель.

Взрывчатость угольной пыли определяется несколькими ключевыми факторами, такими как размер частиц пыли, наличие летучих компонентов, содержание золы и влаги в составе [42].

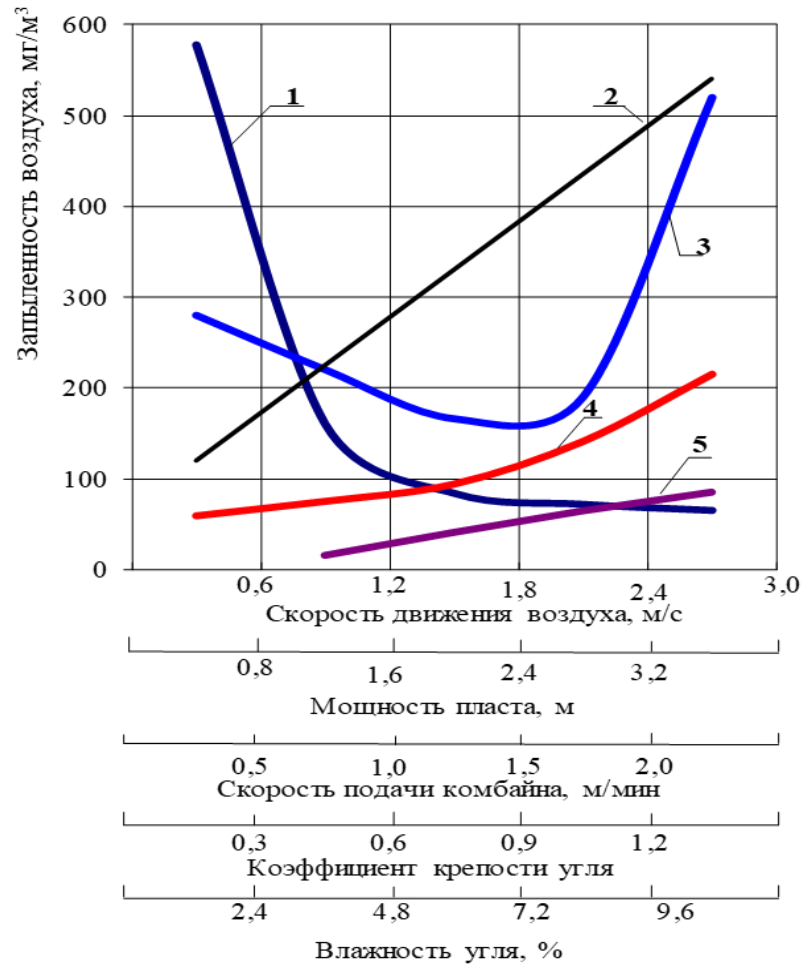


Рисунок 1.1 – Зависимость запыленности воздуха: 1 – от пластовой влажности угля, 2 – от мощности пласта, 3 – от скорости движения воздуха, 4 – от скорости подачи комбайна, 5 – от коэффициента крепости угля.

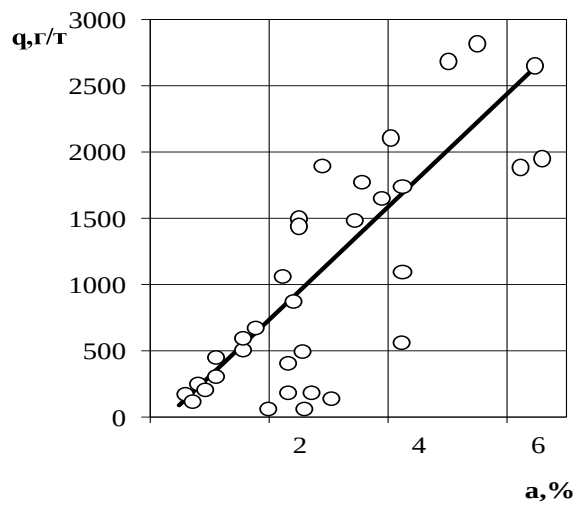


Рисунок 1.2 – Зависимость удельного пылевыведения q от содержания пылевых частиц в разрушенном угле a .

В рамках исследования [43] были установлены параметры дисперсии, приводящие к взрыву угольной пыли. В ходе моделирования турбулентной кинетической энергии, траектории вектора скорости пылевоздушной смеси и чистого воздуха было установлено, что частицы размером от 1 до 10 мкм оказывают минимальное влияние на силу сопротивления. В то же время частицы размером от 30 до 50 мкм влияют на эту силу, поскольку скорость возрастает с увеличением размера частиц. Таким образом, наиболее опасной зоной в вихре частиц является область, где скорость равна нулю.

В работе [44] представлены результаты эффективности применения поверхностно-активных веществ для снижения уровня запыленности. Было отмечено, что эффективность таких веществ снижается при уменьшении размера частиц. Эффективность подавления для частиц размером от 0,1 до 1,0 мкм была лишь вдвое меньше, чем для частиц пыли размером от 4 до 10 мкм. Основными факторами, влияющими на этот результат, являются шероховатость, удельная площадь поверхности, воздухопоглощаемость и количество частиц. Следовательно, размеры частиц влияют на эффективность пылеподавления. Это обусловлено тем, что большие размеры частиц угля обладают значительной поверхностной площадью, высокой адсорбционной способностью и небольшим количеством частиц.

Исследования, проведенные в Польше, также доказали, что взрывчатость пылевоздушной смеси зависит от дисперсности угля. Наибольшую опасность представляют частицы размером около 45 мкм. Дальнейшее измельчение снижает степень взрывоопасности, так как мелкие частицы имеют тенденцию образовывать агрегаты. Добавление небольшого количества крупных частиц к высокодисперсной угольной пыли существенно увеличивает взрывоопасность образующейся аэрозольной смеси благодаря их дезагрегирующему воздействию во время распыления [45].

Работы МакНИИ посвящены изучению влияния дисперсного состава угольной пыли на ее взрываемость [24, 46]. С увеличением степени дисперсности взрывчатость угольной пыли, начиная с фракции 75 мкм, увеличивается

относительно медленно и в отдельных случаях достигает максимума при фракции 10 мкм. Также было отмечено, что увеличение степени дисперсности почти не влияет на окисление, что не уменьшает взрывоопасность пыли. Таким образом, естественным фактором, снижающим взрывоопасность высокодисперсной пыли, является аутогенез частиц, а так как взрывчатость угольной пыли растет с увеличением степени дисперсности, то пылевзрывоопасные концентрации в угольных выработках по мере удаления от источника пылеобразования становятся потенциально более опасными.

Взрыв аэрозоля происходит лишь в присутствии летучих веществ. Уменьшение выделения летучих веществ приводит к снижению взрывоопасности угольной пыли.

При содержании летучих веществ на уровне 10–15 % угольная пыль обладает небольшой взрывоопасностью, а при более чем 15 % риск взрыва заметно увеличивается [47].

Решение этой проблемы предложено в исследовании [48]. Один из способов снижения выхода летучих веществ из угля – это увеличение объема добавки CaCO_3 .

Воздействие влаги на снижение взрывоопасности угольной пыли является двойственным. С одной стороны, влага может действовать как инертное добавление, уменьшая тепловой баланс системы. Учитывая, что удельная теплоемкость воды превышает удельную теплоемкость инертной пыли в 5 раз, можно сделать вывод, что вода, как инертное добавление, должна быть в 5 раз эффективнее инертной пыли. Эксперименты, проведенные в особых условиях подготовки пыли, показали, что угольная пыль с содержанием летучих веществ на уровне 35 % не проявляла взрывоопасности при наличии влаги в объеме 6,5%.

Влажность играет важную роль в процессе объединения мелких частиц в более крупные. Это приводит к уменьшению общей поверхности пыли и уменьшению возможности возникновения взрывов. При наличии влажной угольной пыли на поверхностях шахтных выработок ее способность образовывать

взвешенные облака и накапливать опасные концентрации снижается. Необходимо отметить, что содержание влаги в осевшей пыли должно составлять не менее 12 %.

На поддержание уровня влажности пыли влияет расстояние между форсунками. В статье [49] установлено, что последовательность установки форсунок по длине лавы должна быть не более $1/5-1/7$ длины падения мини-капли, т. е. если взвешенная мини-капля падает 6–8 с, то при скорости 2,5 м/с она пролетает 15–20 м, следовательно, форсунки нужно установить через каждые 12–15 м.

В горных выработках взрывоопасное облако может возникнуть до возникновения источника воспламенения во время добычи угля или из-за перехода угольной пыли во взвешенное состояние под действием ударной волны, что создает условия для взрыва.

Взрыв угольной пыли происходит в газовой фазе, и для его возникновения требуется определенная концентрация продуктов пиролиза во взрывном объеме. Эта концентрация соответствует нижнему пределу взрывчатости газовой смеси.

В рамках исследуемой гаммы углей нижний предел взрывоопасности газовой смеси составляет 4,23 % с коэффициентом вариации 5,6 %. Это означает, что минимальная взрывоопасная концентрация газовых продуктов пиролиза практически постоянна и не зависит от содержания летучих веществ [42]. Для достижения взрывоопасной концентрации газовых продуктов, составляющей 4,23 % от общего объема, требуется значительное количество угольной пыли, превышающее установленные экспериментально пороговые значения. Например, при содержании летучих веществ на уровне 20 %, минимальная опасная концентрация угольной пыли составляет 210 г/м^3 , при условии, что все выделенные летучие вещества участвуют во взрыве. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что взрыв пыли с присутствием летучих веществ может произойти при более низкой концентрации, чем ожидалось. Это различие между теоретическими расчетами и практическими результатами экспериментов объясняется тем, что взрывоопасная смесь газов, образующаяся вокруг частицы, не заполняет полностью газовую оболочку.

Различные исследователи представляют данные о минимальных концентрациях взрывоопасности угольной пыли для различных видов угля, которая варьируется от 50 до 300 г/м³ [50, 51].

Универсальный показатель степени пылевзрывоопасности выработок – это время накопления взрывоопасного количества пыли T_n . Это период накопления пыли, достигающего нижнего предела взрывчатости отложившейся угольной пыли $\delta_{отл}$, (г/м³), при котором не наступает возможность распространения взрыва [4, 52- 54].

В условиях шахтного поля нижний предел взрываемости может изменяться более чем в 2 раза в зависимости от содержания метана. Время накопления взрывоопасного количества пыли в основном зависит от интенсивности её оседания. Для различных выработок интенсивность оседания угольной пыли может колебаться от 0,04 до 8000 г/(м³·сут) [24].

В горной практике наиболее важными являются показатели массы угольной пыли, оседающей в единице объема горной выработки, и массы угольной пыли, оседающей в единицу времени в этой же выработке. Второй показатель характеризует скорость накопления пыли в объеме выработки и определяет частоту проведения противопылевых мероприятий [41].

Исследование функции плотности распределения пыли по размерам в воздушном потоке выявило, что она зависит от различных факторов, таких как скорость и турбулентность потока, дисперсность и заряд частиц пыли.

Анализ исследований [53] показал, что по мере удаления от источника образования пыли происходит изменение формы распределения от логнормальной к нормальной. В начале этого процесса медианный размер аэрозоля увеличивается с 3 мкм до 11 мкм, а затем стабилизируется на значительном удалении от источника (в вентиляционном штреке) [55].

В конвейерных выработках изменение дисперсности пылевого облака существенно зависит от соотношения скоростей ленты и вентиляционной струи, а также от влажности транспортируемого материала. Из-за интенсивной турбулентности вентиляционного потока процесс осаждения пыли имеет

случайный характер. Вследствие этого, в большинстве случаев сложно определить основной физический показатель пылевзрывобезопасности, который представляет собой массу пыли, осевшую на поверхность за определенный период времени [55].

1.2. Методы и средства контроля пылевоздушной смеси в горных выработках

Контроль пылевзрывобезопасности горных выработок должен производиться специальными приборами или аппаратурой непрерывного действия [54]. Борьба со взрывами пыли в горных выработках не может быть эффективной в связи с отсутствием четких количественных критериев для определения взрывчатой концентрации пыли и не будет разработана специальная аппаратура для непрерывного мониторинга, контроль пылевзрывобезопасности можно осуществлять только визуальными и лабораторно-аналитическими методами [4, 53, 56].

Проверка шахт Кузбасса показала, что основным мероприятием по предупреждению взрывов угольной пыли все еще остается сланцевая пылевзрывозащита.

При высокой интенсивности пыленакопления практически в любой момент времени поверх инертной пыли накапливается слой угольной пыли. В этих условиях взрывозащитные свойства инертной пыли резко снижаются, а в случае накопления взрывоопасного количества угольной пыли полностью аннулируются [57, 58].

Процесс накопления пыли в горных выработках носит случайный или случайно-стационарный характер. Это обусловлено нестационарностью процессов пылеобразования, выноса и распространения пыли, а также региональной и локальной неустойчивостью параметров проветривания горных выработок.

Исследования показали, что коэффициент вариации взвешенной в воздухе пыли при установившихся процессах угледобычи может составлять более 50 % [59, 60]. В связи с этим обстоятельством для повышения уровня пылевзрывозащиты необходим объективный инструментальный способ контроля пылевзрывобезопасности выработок, характеризующийся высокой

оперативностью и небольшой трудоемкостью. Наиболее приемлемым в этом аспекте представляется способ дистанционного автоматизированного инструментального контроля интенсивности пылеотложения с возможностью определения взрывоопасного отложения пыли, позволяющий выработать и принять оперативные меры для нейтрализации нарушений пылевого режима [60, 61].

Для обеспечения инструментального контроля наличия взрывоопасного количества отложившейся угольной пыли в горных выработках ВостНИИ разработана приставка к прибору ДПВ-1, принцип действия которой основан на срыве отложившейся пыли струей воздуха, выходящей с большой скоростью из сопла, с последующим засасыванием образовавшегося запыленного воздуха на фильтр, снятием показаний шкалы и расчетом величины пылеотложения на единицу поверхности [24]. Прибор имеет следующие недостатки: низкая точность, так как площадь контролируемой поверхности ограничена (15 мм²); недостаточная эргономичность; продолжительный замер. На сегодняшний день прибор не выпускается.

С целью устранения вышеупомянутых недостатков и оптимизации процесса контроля были разработаны автоматические переносные приборы ППР-1 и ППР-2 для мониторинга уровня пыли и содержания золы, способные определять степень запыленности воздуха (включая респирабельные фракции), осаждение пыли (в том числе и на стенках выработки), содержание негорючих веществ, скорость оседания пыли, дисперсный состав пыли и процентное содержание негорючих веществ в пылевидных смесях [51]. Эти устройства позволяют проводить комплексную оценку пылевзрывоопасности выработок в шахтах (Y), опираясь на отношение концентрации пыли в воздухе ($C_в$), которая может возникнуть при взрыве, к нижнему пределу взрываемости отложившейся пыли ($\delta_{в.отл}$). Пылевзрывобезопасной выработка считается при $Y \geq 1$ [62]. Недостатки: продолжительность замеров, малая представительность пробы, поскольку поверхность ее отбора осталась такой же, как у прибора ДПВ-1

(около 15 мм^2); ограниченный верхний предел измерения пылеотложения (менее 99 г/м^2) [62].

Для контроля наличия взрывоопасного количества отложившейся угольной пыли в горных выработках в МакНИИ был разработан переносной радиоизотопный прибор КПП-1М [63]. Основой работы прибора КПП-1М является измерение потока отраженного бета-излучения. Принцип действия: бета-частицы, отраженные от породы, покрытой угольной пылью, или от смеси угольной и инертной пыли, генерируют в ионизационной камере ток, пропорциональный толщине пылевого слоя или составу негорючих и горючих веществ в смеси.

Для измерения количества осевшей угольной пыли обычно используют подложки, представляющие собой куски породы. Подложками могут служить образцы любых боковых пород, кроме известняка, так как он может исказить результаты.

В Польше был разработан портативный анализатор «Инфлабар», предназначенный для быстрого и точного определения содержания негорючих веществ в образцах пыли, взятых с поверхности осланцованных горных выработок. Принцип работы этого устройства подобен устройству КПП-1М и основан на анализе интенсивности рассеянного бета-излучения, которое зависит от концентрации более тяжелых элементов [51].

В МакНИИ был спроектирован и протестирован радиоизотопный прибор для контроля качества осланцевания КОР-1. Этот прибор отличается от «Инфлабара» более высокой надежностью, легкостью настройки и регулировки при сохранении компактности и точности [30, 64, 65].

Источником излучения в данном случае являются радионуклиды $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, при этом на поверхности доза излучения не превышает $0,5 \text{ мР/ч}$. Недостаток прибора – невозможность точного определения количества угольной пыли, осевшей поверх инертной. Следовательно, в этом аспекте прибор уступает своим предшественникам, включая прибор КПП-1, а также упомянутые ранее приборы ППП-1 и ППП-2.

Необходимо отметить, что на данный момент существует ограниченное количество переносных приборов, предназначенных для контроля уровня пылевзрывобезопасности выработок. Исследования, направленные на разработку таких приборов до стадии серийного выпуска или экспериментальных образцов, показали, что существующие инструменты контроля наличия взрывоопасного отложения угольной пыли имеют низкую надежность и не пригодны для точного определения уровня угольной пыли, осевшей поверх инертного материала (при наличии сланцевой защиты). В связи с этим использование этих приборов не позволяет дать однозначную оценку пылевзрывобезопасности выработки.

Кроме того, они неэффективны в контексте гидропылевзрывозащиты угольных шахт [66]. Проведенный обзор исследований показал, что большее внимание уделяется контролю за осевшей угольной пылью, содержанием инертной пыли и что основное внимание уделяется разработке приборов для оценки содержания негорючих веществ в образце пыли [24, 51, 64, 65, 67–69].

В процессе анализа данных было обнаружено, что все имеющиеся методы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок опираются на измерение процентного соотношения взрывчатой и инертной фракций пылеотложений, а также примечательно то, что все эти методы основаны на косвенных измерениях.

В последние годы наблюдается рост использования систем дистанционного контроля концентрации пыли в шахте с передачей данных на диспетчерский пункт. При этом делаются попытки по измерению средней концентрации витающей в воздухе пыли, чтобы судить о взрывоопасности выработок. Такая система должна состоять из датчиков запыленности воздуха, блоков сбора и передачи информации на диспетчерский пункт. Программное обеспечение должно проводить обработку и представление результатов в читаемом и понятном для диспетчера виде. В будущем программное обеспечение будет включать в себя и интеллектуальные системы борьбы с пылью [70, 71], но все же основным элементом этой системы является датчик замера запыленности воздуха или отложившейся пыли. Весь опыт пылевого контроля в угольных шахтах свидетельствует о том, что датчики

запыленности в автоматических системах могут быть двух видов: оптические или радиоизотопные [72, 73].

Традиционный радиоизотопный метод измерения основан на поглощении радиоактивного (альфа или бета) излучения пылевым осадком. С использованием этого метода был разработан ряд радиоизотопных экспресс-пылемеров и станций пылевого контроля. ПРИз, РКП-5, ИКАР-ФБ-01, Прима – в России; в США: Mass Monitor RDM; в Германии: Beta-Staubmetr, Staubmonitor, FH-62A; во Франции: MPS1-100 (Environnement); в Голландии: бета-монитор пыли мод. 9700 (Phillips); в Италии: MPS 100 (ELRKOS SpA) [74, 75].

Однако все они имеют один недостаток – это невозможность создания непрерывного потока точных и надежных данных о массовой концентрации пыли [76]. Без значительной модификации метода, который объединяет процедуру отбора пробы на фильтр и измерения поверхностной плотности препарата на фильтре в одно время, радиоизотопный метод не может быть использован для непрерывного контроля уровня запыленности в рудничной атмосфере [56, 77, 78].

Оптический метод в этом ключе имеет несомненное преимущество. Он основан на определении оптической плотности или измерении интенсивности света [79]. Физико-механическим институтом имени Г.В. Карпенко и МакНИИ была разработана система оперативного автоматического дистанционного контроля степени запыленности воздуха (АДКЗ), основанная на фотоэлектрическом принципе: фотодатчик регистрирует изменение интенсивности светового луча, проходящего через запыленный воздух при изменении концентрации пыли [56, 80- 82].

В настоящее время данная система не соответствует гигиеническим требованиям на угольных предприятиях, а также принципам построения компьютерных систем мониторинга.

Фирмой «Хельмут Хунд ГмбХ» (Вецлар, Германия) разработан стационарный оптический измеритель тонкодисперсной пыли «FMA-TMS-1», который может быть использован в автоматических системах контроля запыленности [83]. Стационарная оптическая система для измерения

тонкодисперсной пыли «FMA-TMS-1» работает по тому же принципу, что и другие приборы серии ТМ. Измерительная система состоит из измерительной камеры (датчика) и обрабатывающего устройства, разработанного в виде стационарной установки для автоматического измерения и самодиагностики. Основным преимуществом этой концепции является простота установки, низкие расходы на обслуживание и экономичность при продолжительной работе.

В Польше разработан пылемер PL-1, который предназначен для контроля вдыхаемых фракций пыли в рудничном воздухе. Работа прибора осуществляется совместно с цифровым концентратом ССД и вакуумным затвором VAt. Принцип работы основан на рассеивании света. Проведенные сравнительные испытания показали, что стационарный прибор PL-1 превосходит аналоги, однако для определения общей массы витающей пыли все же требуется установка коэффициентов пересчета для каждой конкретной выработки [84-86].

Изменчивость параметров определяет методическую погрешность оптических методов на 30 %. При значительной изменчивости крупности и удельного веса пыли погрешность может достигать 70 % и более [97]. У существующих приборов контроля пылевзрывобезопасности недостаток в том, что аэрозоль может иметь различную оптическую плотность в зависимости от крупности частиц.

Для достижения точности измерений оптическим и радиоизотопным методами необходимо анализировать дисперсный состав угольной пыли и проводить калибровку прибора. Многие авторы указывают на неприемлемость контроля пылеотложения по изменению концентраций взвешенной пыли как в теоретическом, так и в практическом плане [52, 63, 87–89].

Оба способа, рекомендованные нормативными документами [4, 56], не могут дать фактических величин интенсивности пылеотложения. Первый способ приемлем только при точечном источнике пыли, т. е. при условиях отсутствия дополнительных источников и равномерном распределении концентрации по выработке. Второй способ малоэффективен особенно при

высокой интенсивности пылеотложения, так как требует расположения специальных подложек, сбор их и определение привеса в лабораторных условиях.

Приведенные исследования свидетельствуют о том, что приемлемыми являются способы контроля пылевзрывобезопасности, основанные на определении пылеотложений на приемные устройства.

Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин был предложен Институтом проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН [90]. Совместно с учеными из МакНИИ был разработан радиоволновый датчик пылеотложения, основанный на высокочастотном методе измерения неэлектрических величин. Датчик работает путем измерения частоты колебаний электромагнитного поля, изменяющейся при наличии пыли. Эта методика использования высокочастотной электромагнитной системы с распределенными параметрами позволяет выявить резонансную частоту колебаний. Однако, из-за конструктивных недостатков датчик не был внедрен в промышленное использование [91].

Метод радиоизотопного измерения пылеотложения опирается на свойство радиоактивного излучения, поглощаемого частицами пыли. Масса осажденной пыли определяется через ослабление радиоактивного излучения при его прохождении через пылевой осадок. Датчик способен измерять количество угольной пыли в диапазоне 10–100 г/м² беззольной массы. Точность определения зависит от химического состава угля, особенно содержания железа. Погрешность измерения плотности пыли составляет $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95. Принцип радиоизотопного прибора заключается в регистрации электрических импульсов, преобразованных узлом детектора от бета-частиц, рассеянных от пыли на экране. Частота импульсов обратно пропорциональна количеству пыли, что позволяет оценить её уровень. Полученные данные передаются в блок обработки информации для анализа и последующей передачи в блок сбора данных.

Вышеописанные испытания показали принципиальную возможность создания системы дистанционного автоматического контроля пылевзрывобезопасности горных выработок, однако, из-за ряда выявленных

конструктивных и схмотехнических недостатков она не вышла из стадии экспериментальных работ [92].

1.3. Методы измерения концентрации пыли

Методы измерения концентрации пыли в рудничной атмосфере можно разделить на две группы: 1) с осаждением частиц и анализом осадка; 2) без осаждения [93]. Методы первой группы позволяют измерять массовую концентрацию пыли, однако, они обладают высокой трудоемкостью, низкой чувствительностью при измерении малых концентраций и циклический характер изменения.

Методы второй группы позволяют проводить прямые измерения в потоке пыли без использования пробоотборных устройств. Они характеризуются непрерывностью измерений, высокой чувствительностью и возможностью автоматизации процесса измерений.

Во время измерений поток не подвергается аэродинамическому искажению. Однако, методы измерения второй группы чувствительны к изменениям дисперсного состава и других свойств пыли.

Вторая группа методов промышленного мониторинга эффективнее обеспечивает непрерывную информацию о концентрации пыли в потоке и её изменениях. Это позволяет автоматически регулировать работу пылеуловителей, сигнализировать о превышении допустимых уровней пыли и останавливать производственные процессы в аварийных ситуациях.

Применение методов второй группы на практике может ограничиваться высокой чувствительностью к нестационарным флуктуациям, вызванным внешними и внутренними факторами, такими как температура, влажность окружающей среды и параметры источника питания прибора.

Массовая концентрация пыли измеряется методом осаждения частиц, известным как весовой метод. Этот метод позволяет измерить массовую концентрацию пыли, не учитывая ее дисперсный состав, форму частицы, оптические или электрические свойства пыли. В рамках рассмотрения методов, удовлетворяющих непрерывному пылевому контролю, весовой метод

не обеспечивает непрерывное измерение, необходимое для надлежащего мониторинга. Общая погрешность такого метода составляет 10 % [94].

Также разработаны и другие методы пылевого контроля, основанные на изучении осажденного слоя пыли.

Денситометрический метод основывается на измерении оптической плотности пылевого осадка на фильтре в зависимости от содержания пыли. Метод включает этапы весового метода, исключая взвешивание пробы, заменяя его фотометрическим анализом. Оптическую плотность осадка измеряют через поглощение или рассеяние света. Главный недостаток метода – зависимость результатов от оптических свойств пыли [95].

Используя пьезоэлектрический метод, возможно определить массовую концентрацию пыли в пылегазовом аэрозоле и оценить численную концентрацию частиц. Для расчёта массовой концентрации используется изменение частоты колебаний пьезоэлектрического кристалла при осаждении частиц пыли на него. Этот метод является перспективным, однако, для повышения эффективности необходимо работать над увеличением силы захвата частиц кристаллом и разработкой системы периодической очистки его поверхности от осевшей пыли [93].

Депремометрический метод измерения массовой концентрации пыли в пылегазовом потоке основан на измерении перепада давления на фильтре. Для этого происходит прокачивание порции пылегазового потока через фильтр, после чего измеряется разность давлений на входе и выходе фильтра. Этот метод отличается относительной простотой его реализации, однако, требует строгой стабилизации основных параметров пылегазового потока, таких как скорость и температура [94].

Электрические методы измерения концентрации пыли основаны на контактно-электрическом принципе, где пылевые частицы электризуются при контакте с контактно-активным материалом и передают заряд токопроводящим элементам. Устройство состоит из электризатора, заряжающего частицы, и токосъемного электрода. Электризация частиц пылегазового потока зависит от

их дисперсности, влажности и температуры [94, 95]. Практическое применение метода ограничивается его недостатком – при увеличении влажности происходит залипание проходного отверстия электризатора.

Метод акустического контроля концентрации пыли основан на измерении параметров акустического поля в зазоре между источником и приемником звука. Потери звуковой энергии в этом процессе пропорциональны объемной концентрации пыли. Недостатком данного метода является сложность его аппаратного оформления, что затрудняет его промышленное применение [94 - 96].

Оптические методы измерения концентрации пыли, основанные на явлениях поглощения и рассеяния света движущимися частицами, являются важными для непрерывного контроля пылевых выбросов в промышленности. Точность и достоверность результатов контроля зависят от стабильности свойств частиц пыли, что требует учета дисперсного состава. Промышленные пылемеры, созданные на основе оптических методов, широко используются для мониторинга выбросов в различных отраслях производства, включая цементные заводы и тепловые электростанции.

Используя явление поглощения, разработаны оптические абсорбционные пылемеры, а на основе явления рассеяния созданы оптические пылемеры светорассеяния. Первые применяются для измерения концентрации пыли до нескольких граммов на кубический метр, вторые – для измерения низких концентраций.

Мировой опыт разработки приборов контроля пыли в горнодобывающей отрасли применяются три основных принципа: оптический, радиоизотопный и гравиметрический. Они основаны на косвенных методах измерения, требующих калибровки приборов для каждого места измерения. Для установления концентрации пыли в воздухе на месте измерения требуется разработка альтернативных технических решений.

1.4. Выводы

Анализ исследований и практики по изучению аэродинамических процессов пылеобразования и контроля пылевзрывоопасности в горных выработках на угольных шахтах позволил решить задачу анализа текущего вопроса состояния и аэродинамики рудничных аэрозолей в горных выработках, методов и средств контроля запыленности рудничной атмосферы и пылевзрывобезопасности горных выработок и выявить следующее:

1. Влияние высоких объемов добываемого угля в высокопроизводительных очистных забоях в условиях газообильных угольных пластов на образование, выделение и отложение пыли из угольных пластов по сети горных выработок в должной мере не изучен, что сдерживает создание способов и средств контроля запыленности рудничной атмосферы и пылевзрывоопасности.

2. Существующие методы и способы пылевого контроля в угольных шахтах не пригодны для контроля опасных по взрывчатости величин пылеотложений. Современные переносные приборы и системы дистанционного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок не вышли из стадии поиска, сложны и трудоемки при применении для оперативного контроля пылевзрывоопасности горных выработок.

3. Требованиями нормативных документов установлена необходимость системы автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений в угольных шахтах как подсистемы МФСБ шахты. Однако, в настоящее время отсутствуют эффективные системы и методы осуществления этого контроля. Необходимо проведение научных исследований и разработка методик по учету способности пыли к взметыванию и распределению отложившейся пыли, а также разработка прибора автоматического и непрерывного контроля запыленности рудничной атмосферы и величины интенсивности пылеотложений как подсистемы МФСБ. При решении этих вопросов необходимо ориентироваться на оперативный производственный экспресс-контроль за накоплением взрывоопасных отложений угольной пыли по сети горных выработок.

В связи с этим целью работы является обоснование закономерностей аэродинамических процессов пылевоздушной смеси в выработках угольных шахт.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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

2. Разработать методику контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт в зависимости от свойств и параметров, а также 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.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

2.1. Исследование закономерностей аэродинамических процессов распространения витающей угольной пыли в атмосфере сети горных выработок и пылеотложений

Основной фактор, влияющий на пылевзрывоопасность в шахте – это пылеотложение. Процесс пылеотложения характеризуется массой угольной пыли, образовавшейся из угольного массива:

- осевшей в единице объема горной выработки – $P_v, \text{г/м}^3$;
- осевшей в единицу времени в единице объема выработки – $P, \text{г/}(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;
- осевшей на единице длины выработки – $P_l, \text{г/м}$;
- осевшей на единице поверхности выработки – $P_s, \text{г/м}^2$.

В горнодобывающей практике чаще используются P_v и P . Первый из них отражает условную концентрацию пыли, то есть плотность пылевого облака, которая образуется при условии, что вся осевшая пыль будет находиться во взвешенном состоянии. Этот показатель полезен для расчета необходимого количества инертной пыли для предотвращения возгораний. Второй показатель описывает скорость накопления пыли в рабочем пространстве и помогает определить, как часто нужно проводить противопылевые мероприятия. Показатель P , называемый интенсивностью пылеотложения, является ключевым параметром для оценки взрывоопасности пыли и выражается [107, 108]:

$$P = P_u / t = P_t / (t \cdot S) = P_s \cdot \Pi / (t \cdot S), \quad (2.1)$$

где P_t – масса пыли, осевшей на единице длины выработки, г/м;

t – время пылеотложения, сут;

S – поперечное сечение выработки, м²;

Π – периметр выработки, м.

Пылеотложение по длине выработки может быть определено по изменению концентрации пыли в воздухе.

При выборе двух сечений в горной выработке, содержащей источник пылеобразования, среднее пылеотложение на участке между этими сечениями

может быть определено как разность концентраций пыли, присутствующей в воздухе [108, 109]:

$$P_i = \frac{c_1 - c_2}{l_1 - l_2} q_v, \quad (2.2)$$

где N_1, N_2 – запыленность воздуха соответственно в I и II сечениях, г/м³,
 l_1, l_2 – расстояния от источника пылеобразования соответственно до I и II сечений, м;

q_v – количество прошедшего воздуха, м³.

Продифференцировав формулу (2.2), получим:

$$Pl = - \frac{dN}{dl} q_v,$$

так как

$$Pl = PS_{vt}$$

и количество воздуха, прошедшего за сутки, равно:

$$q_v = 86\,400 v S_v,$$

где v – скорость движения воздуха, м/с

следовательно,

$$Pl = 86\,400 v \frac{dN}{dl}, \quad (2.3)$$

Из формулы (2.3) следует, что для выработок, вмещающих неподвижный источник пылеобразования, интенсивность пылеотложения определяется функцией вида:

$$N = f(l)$$

При турбулентном движении воздуха существует как поле осредненных скоростей, так и поле пульсационных скоростей. Наличие пульсаций способствует не только диффузионному осаждению пыли, но одновременно препятствует ее осаждению под воздействием силы тяжести.

При соблюдении условия:

$$r = \frac{0,3 \cdot 10^5}{\sqrt[3]{\rho_n}} \quad (2.4)$$

где ρ_n – плотность вещества частицы, кг/м³;

r – радиус частиц; частица будет находиться во взвешенном состоянии, если:

$$v_B \leq \sqrt{v_1^2}, \quad (2.5)$$

где v_B – скорость витания частицы, м/с;

$\sqrt{v_1^2}$ – среднеквадратичное значение поперечной скорости пульсации, м/с.

Для частиц размером 2–100 мкм скорость витания можно определить по формуле:

$$v_B = 1,5 \cdot 10^{-2} r^2 \rho, \quad (2.6)$$

При определении значений $\sqrt{v_1^2}$ (для случая горной выработки) можно воспользоваться выражением:

$$\sqrt{v_1^2} = 0,1 \cdot v \left[1 + 1,72 \left(\frac{y^2 + z^2}{R_3} \right) \right] \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}, \quad (2.7)$$

где y, z – координаты точки сечения, м;

R_3 – гидравлический или эквивалентный радиус выработки, м.

На основании формул (2.4–2.6) определяется условие выноса частиц пыли определенного размера:

$$v > 4,8 \cdot 10^{-3} \frac{r^2 N}{\sqrt{\alpha}}, \quad (2.8)$$

где α – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, Н/(с²·м⁴).

Для случая гравитационного осаждения используется формула, описывающая динамику изменения запыленности воздуха с расстоянием:

$$N = N_0 \exp\left(-k_T \frac{lv_B}{hv}\right), \quad (2.9)$$

где N_0 – начальная запыленность, г/м³;

k_m – коэффициент, учитывающий турбулентное перемещение;

v_B – скорость витания частицы, м/с; h – средняя высота выработки, м.

Изменение концентрации взвешенной в воздухе пыли, вызванного адгезией частиц на поверхности выработки описывается формулой (2.9):

$$N = N_0 \exp\left(-0,02_m \cdot \frac{P_B l}{SR_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_n q_b r^2}{4S_b d_c}}\right), \quad (2.10)$$

где m – вероятность адгезии ударившейся об стойку пылинки;

R_1 – продольный калибр, м;

d_c – диаметр стойки крепления, м.

Согласно последним исследованиям, изменение концентрации пыли в зависимости от длины выработки может быть описано следующей формулой:

$$N_i = \sum N_{0i} \exp \left[-\frac{1}{R_3} \left(a + b \frac{v_{bi}}{v} \right) \right], \quad (2.11)$$

где N_{0i} – начальная концентрация i -й фракции, г/м³;

v_{bi} – скорость витания частицы i -й фракции, м/с;

a, b – постоянные.

Формулы (2.8–2.10) не учитывают перехода частиц пыли в аэрозольное состояние. Между тем в горных выработках происходит выдувание пыли из отбитого угля и сдувание её со стенок выработок [110]. В первом случае увеличение концентрации пыли связано со скоростью движения воздуха квадратичной зависимостью, во втором – экспоненциальной с разностью:

$$v - v_{кр},$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость, при которой начинается процесс сдувания пыли со стенок выработки, м/с.

Величина критической скорости зависит от площади поперечного сечения выработки и составляет:

$$v_{кр} \geq \frac{10,1}{S_B}, \quad (2.12)$$

В шахтных условиях (для очистных забоев) критическая скорость изменяется в пределах от 2 до 5 м/с.

Формулы (2.8–2.10) предоставляют правильное описание процесса изменения концентрации пыли в шахтной атмосфере и имеют большое значение для теоретического анализа, моделирования динамики аэрозолей и связанных с ними процессов. Однако, их применение для расчета пылеотложения и запыленности воздуха затруднено из-за необходимости экспериментального определения некоторых констант.

Поэтому применение эмпирических формул является более целесообразным. Так, в условиях шахт Донбасса динамика запыленности воздуха в вентиляционных штреках достаточно точно описывается формулой:

$$N = \frac{N_0}{1+0,03l}, \quad (2.13)$$

Из формул (2.2) и (2.12) следует:

$$P_l = \frac{0,03N_0q}{(1+0,03l)^2}, \quad (2.14)$$

Для условий Кузбасса удовлетворительную сходимость с экспериментом дает формула:

$$N = N_0(0,875e^{-0,025l} + 0,125e^{-0,00125l}), \quad (2.15)$$

Первый член правой части этого выражения учитывает гравитационное осаждение (в основном выпадение крупных фракций пыли), второй – диффузионное осаждение [41].

Из формулы (2.7) радиус r частицы, не выпадающей под действием гравитационных сил при заданной скорости потока v , м/с, должен быть:

$$r \leq \sqrt{\frac{4\sqrt{\alpha}}{3\rho_n}}, \quad (2.16)$$

Обозначив $\sqrt{\frac{4\sqrt{\alpha}}{3\rho_n}}$, через a ($a=45\div 100$), получим:

$$r \leq a\sqrt{v}.$$

Масса пыли, не участвующая в выпадении под действием силы тяжести, будет равна:

$$M = N_0 \int_0^{a\sqrt{v}} m(r)dr, \quad (2.17)$$

где $m(r)$ – плотность распределения частиц пыли по размерам, а её массовая доля определяется по формуле:

$$\varepsilon_M = \frac{N_0 \int_0^{a\sqrt{v}} m(r)dr}{N_0 \int_0^{\infty} m(r)dr} = \int_0^{a\sqrt{v}} m(r)dr, \quad (2.18)$$

Принимая распределение частиц по размерам, подчиняющимся логарифмически нормальному закону, и делая следующую подстановку в формулу:

$$n_{(r)} = \frac{1}{\sqrt{\pi \ln \beta r}} \exp \left[\frac{(\ln r - \ln r_a)^2}{2 \ln^2 \beta} \right];$$

$$\frac{\ln r - \ln r_a}{\ln \beta} = t; d(\ln r) = \ln \beta dt,$$

изменив соответственно пределы интегрирования,

$$\varepsilon_M = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln a \sqrt{v} - \ln r_a}{\ln \beta}} e^{-t^2} dt, \quad (2.19)$$

откуда

$$\varepsilon_M = \Phi \left(\frac{\ln a \sqrt{v} - \ln r_a}{\ln \beta} \right), \quad (2.20)$$

где Φ – нормальная функция распределения.

Подставляя в формулу (2.20) значение постоянной a из формулы (2.16), окончательно получим:

$$\varepsilon_M = \Phi \left(\frac{\ln \sqrt{3\rho_n^{4\sqrt{\alpha}} v - \ln r_\alpha}}{\ln \beta} \right), \quad (2.21)$$

В соответствии с основными свойствами нормальной функции распределения из формулы (2.20) следует, что массовая доля пыли, не осаждающейся под действием гравитационных сил, увеличивается с ростом скорости движения воздуха, коэффициента аэродинамического сопротивления выработки и уменьшается при увеличении удельного веса угля, среднегеометрического размера частицы и степени полидисперсности пыли.

С другой стороны, при увеличении скорости движения воздуха увеличивается доля менее избирательного (в отношении размеров частиц) диффузионного осаждения. Поэтому с ростом скорости движения воздуха пылеотложение более равномерно распределяется по длине вентиляционной выработки, что приводит к увеличению протяженности участка интенсивного пылеотложения.

Размер участка интенсивного пылеотложения при различных скоростях воздушного движения может быть описан эмпирическим уравнением:

$$l_{\text{нит}} = 410v - 250, \quad (2.22)$$

Уравнение справедливо для участков длиной 100–400 м.

2.2. Исследование закономерностей процесса распространения витающей в атмосфере угольной пыли по сети горных выработок и пылеотложений.

Необходимость пересмотра методов пылевзрывозащиты горных выработок угольных шахт обусловлена увеличением нагрузок на очистные и проходческие забои, а также недостаточным уровнем подготовки сотрудников. Однако, катастрофические последствия аварий нельзя свести только к этим факторам. Кроме этого, списывать повышенный уровень пыли в шахте только на низкое качество проведенных профилактических работ по пылевзрывобезопасности горных выработок в настоящий момент уже не представляется возможным.

По мнению автора работы в первую очередь необходимо пересмотреть закономерности процесса пылевыведения, распространения и пылеотложений витающей угольной пыли, которые в настоящий момент не соответствуют реальной ситуации в шахтах. И только после их анализа можно разработать и внедрить эффективные профилактические мероприятия по пылевзрывозащите горных выработок угольных шахт [111].

Решение данной проблемы необходимо разделить на два этапа. Первый относится к проведению исследований и установлению закономерностей процесса распространения и пылеотложений витающей угольной пыли по сети горных выработок в зависимости от марочного состава угля и комплекса технологических параметров, таких как нагрузка на забои, скорость вентиляции и пр. Второй этап предполагает поиск новых способов, методов и средств контроля запыленности шахтной атмосферы и пылевзрывобезопасности угольных шахт. Данные исследования позволят разработать также технические решения для их реализации.

Если уровень концентрации, витающей в атмосфере выработок пыли, удалось в последнее время нормативно существенно ограничить 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 [111].

Проведение практических исследований дисперсного состава угольной пыли, отложившейся по сети горных выработок в местах с наибольшей интенсивностью, выполнялись по следующей методике.

Отбор проб отложившейся угольной пыли и угля для лабораторных исследований осуществлялся в соответствии с ГОСТ 21153.0–75. Для хранения и транспортировки пробы упаковывались в водонепроницаемую пленку вместе с этикеткой, в которой указывались название предприятия, дата отбора пробы, место отбора, пласт, выработка и марка угля.

Места и объемы отбора проб были установлены следующим образом:

- отложившаяся угольная пыль в 50 м от забоя (комбайна) по ходу движения вентиляционной струи массой 200–300 г;
- отложившаяся угольная пыль в 250–300 м от забоя по ходу движения вентиляционной струи массой 200–300 г;
- отложившаяся угольная пыль в 450–500 м от забоя по ходу движения вентиляционной струи массой 200–300 г;
- проба разрушенного угля из-под комбайна массой 2–3 кг;
- пластовая проба угля массой 5–10 кг.

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

Определение гранулометрического состава образцов углей крупностью более 0,1 мм проводится 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 COMPACT».

Перед рассевом пробу угля путем многократной сушки при температуре 65°C и взвешивания доводят до постоянного веса. Взвешивание было произведено на электронных весах специального класса точности ВР221S. Рассев проводился на встряхивателе ВП-С/220 в наборе, состоящем из пяти стандартных сит (диаметром 200 мм и высотой 50 мм) с номерами сеток: 1, 075, 05, 0315, 02 и 01. Время рассева составляет 25 минут. После этого сетку каждого сита подвергают контрольному ручному рассеву в течение 1 минуты. Полученные при расसेве классы крупности отдельно взвешивают и определяют выход классов. Результаты вычислений округлены до первого десятичного знака.

Определение распределения размеров частиц угля класса крупностью менее 0,1 мм, прошедших через набор сит и собранных в поддоне, осуществлено на приборе «Analyzette 22 COMPACT», использующим физический принцип дифракции электромагнитных волн, при котором параллельный свет лазера рассеивается под фиксированными пространственными углами, зависящими от размера и оптических свойств частиц. Линзы фокусируют рассеянный концентрический свет на фокусную плоскость, где детектор измеряет спектр Фурье (распределение световой энергии). Программное обеспечение позволяет вычислять распределение размеров частиц с помощью комплекса математических методов в соответствии с теорией Фраунгофера. Основным устройством прибора является измерительный блок, который содержит лазер (длина волны 635 нм, мощность < 1мВ), многоэлементный детектор, состоящий из 31 ячеек, ванну из нержавеющей стали для проб, измерительную ячейку, соединенную с ванной гибкими шлангами и установленную на перемешивающее устройство, позволяющее ячейке перемещаться в оба крайних положения. Ванна снабжена ультразвуком, механической мешалкой и центробежным насосом для высокой скорости потока измеряемой суспензии из ванны в измерительную ячейку и обратно.

Перед измерением гранулометрических характеристик порошка угля для предотвращения образования агрегатов его частиц под влиянием молекулярного взаимодействия и электростатических сил навеску порошка смачивают этиловым спиртом и добавляют 1–2 мл раствора пиррофосфата натрия. Навеска измеряемого

образца задается с учетом плотности светового луча и регистрируется на табло прибора в пределах 7–10 %.

Прибор «Analyzette 22 COMPACT» отъюстирован на заводе-изготовителе, поверен с помощью калибровочной системы ASTM и соответствует требованиям DIN EN ISO 900. Поверяется прибор регулярно с помощью внутреннего стандартного испытательного порошка фирмы Fritsch №648025, а также калибровочного материала BCR №69. Порошки сертифицированы.

В соответствии с приведенной методикой на шахтах Кузбасса было отобрано более 200 проб отложившейся угольной пыли на исходящих очистных и подготовительных забоев, а также пластовые пробы и пробы разрушенного угля из-под комбайна в каждом обследуемом забое.

Результаты исследований показали, что выход фракций пыли различного диаметра для каждой марки угля имеет специфические закономерности. Далее приведены данные, полученные в результате обработки проб.

Марка Д.

Характер среднего распределения дисперсного состава проб из-под комбайна и ПОК бимодальный: максимум весовой доли наблюдается для размеров частиц 41 мкм (6,3 и 5,8 % соответственно) и 57 мкм в пробах из-под комбайна (5,9 %) и 65 мкм в пробах ПОК (7,3 %). При этом суммарная весовая доля фракций до 41 мкм в пробах из-под комбайна составляет 61 %, до 57 мкм – 79 %, в пробах ПОК 46 % (до 41 мкм) и 74 % (до 65 мкм) соответственно (рисунок 2.1.). Начиная с расстояния 50 м от забоя, характер распределения меняется и имеет только одну моду: максимум весовой доли в 50 м от комбайна приходится на размер частиц 42 мкм (6,3 %), 300 и 500 м от забоя наблюдается для размеров частиц 33 мкм (6,3 и 6,0 % соответственно). Суммарная весовая доля фракций в пробах пыли отобранных на расстоянии 50 м от забоя (диапазон размеров частиц 0–42 мкм), а на 300 и 500 м (диапазон размеров частиц 0–33 мкм), составляет 67 %. Содержание тонких фракций (до 10 мкм) в пробах из-под комбайна составляет 17 %, для остальных точек 18–23 %. В пробах, отобранных из разных шахтопластов Кузбасса для углей марки Д, вариации характера распределения имеют определенные отличия, в

основном обусловленные их поли- либо мономодальностью. Коротко приведем описание особенностей распределения по каждому забою.

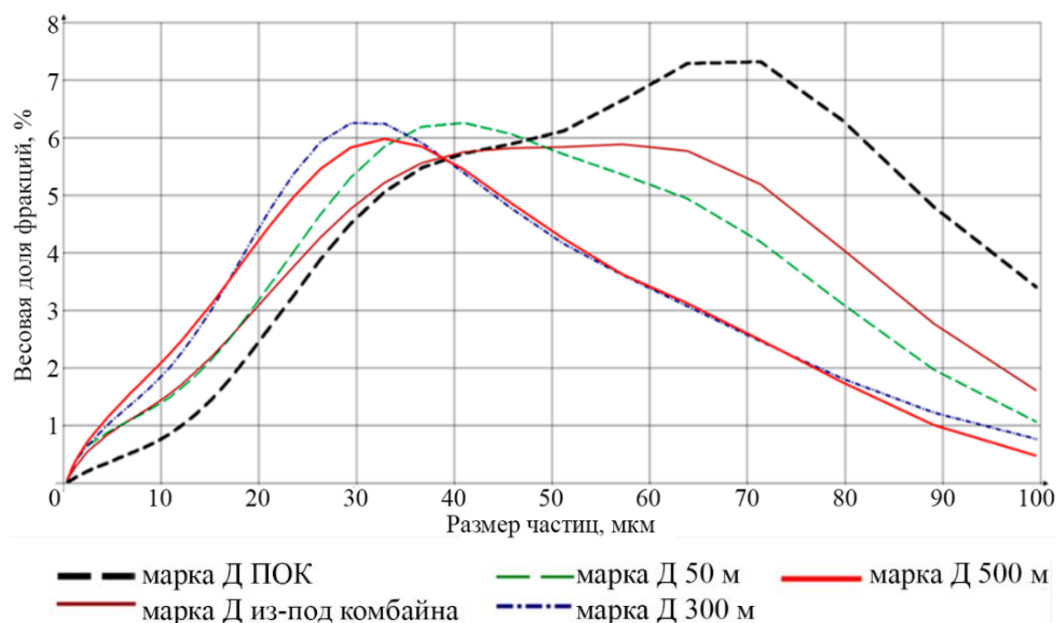


Рисунок 2.1 – Среднее распределение дисперсного состава проб пыли угля марки Д.

Шахта Колмогоровская-2, пласт Полысаевский П, конвейерный штрек № 6, уголь марки ДВ (пробы №№ 7.1–7.5). Естественная влажность угля в отобранных пробах составляла 5,0 %, средняя мощность пласта – 6,7 м [68]. Горные работы в забое велись комбайном КП-21 с заводской системой орошения, скорость движения воздуха в забое в среднем составляла 0,52 м/с, количество подаваемого воздуха – 584 м³/мин. Гранулометрический состав проб, полученный в результате ситового анализа, представлен в таблице 2.1.

Максимальное количество частиц менее 100 мкм получено в пробе, отобранной в 50 м от комбайна, минимальное – в пробе из-под комбайна. Детальный анализ подрешетного продукта сита 100 мкм показал бимодальность распределения дисперсного состава в пробах, отобранных из-под комбайна, ПОК и при удалении от забоя на 50 м. В пробах ПОК и из-под комбайна наблюдается совпадение (в пределах погрешности измерений) характера и параметров распределения: две моды для размеров частиц 37 и 71 мкм весовая доля фракций 5,8 и 7,8 %, суммарная весовая доля 49 и 87 % соответственно [111].

Таблица 2.1 – Гранулометрический состав проб, отобранных на ш. Колмогоровская-2 в конвейерном штреке № 6

№ пробы	Содержание частиц меньше 1 мм, %	Размер частиц, мм					
		Над решетный продукт, %					Подрешетный продукт, %
		+0,75	+0,5	0,315	+0,2	+0,1	-0,1
7-1	100	0,0	0,1	18,7	21,2	28,8	31,2
7-2	31,6	15,9	23,0	21,9	17,2	13,7	8,3
7-3	100	3,3	1,0	1,3	2,6	9,9	81,9
7-4	68,0	5,3	7,8	8,2	8,3	14,2	56,3
7-5	85,6	3,3	6,7	8,7	10,0	15,8	55,4

Анализ проб, отобранных в лаве № 4 шахты Колмогоровская-2, показал аналогичные результаты (таблица 2.2). Минимальное количество фракций менее 100 мкм наблюдалось в пробе из-под комбайна, максимальное – в пробах с удалением от забоя по контрольным точкам.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав проб, отобранных в ш. Колмогоровская-2 в лаве № 4

№ пробы	Содержание частиц меньше 1 мм, %	Размер частиц, мм					
		Над решетный продукт, %					Подрешетный продукт, %
		+0,75	+0,5	0,315	+0,2	+0,1	-0,1
8-1	100	0,0	0,0	20,6	21,3	27,5	30,7
8-2	34,1	12,7	18,5	17,5	14,9	18,4	18,0
8-3	92,3	1,5	3,7	3,1	3,2	14,3	74,1
8-4	79,7	3,0	4,4	4,4	4,1	10,7	73,3
8-5	82,6	2,4	3,8	4,1	3,9	10,3	75,4

Марка Г.

Характер распределения дисперсного состава проб из-под комбайна и ПОК бимодальный: максимум весовой доли наблюдается для размеров частиц 35 мкм (5,7 и 6,2 % соответственно) и 63 мкм (5,8 и 7,7 % соответственно). При этом суммарная весовая доля фракций до 35 мкм в пробах из-под комбайна составляет 65 %, до 63 мкм – 84 %, в пробах ПОК 45 и 78 % соответственно (рисунок 2.2).

Начиная с расстояния 50 м от забоя, характер распределения меняется и имеет только одну моду: максимум весовой доли в 50 м и 300 м от забоя наблюдается для размеров частиц 33 мкм (6,7 и 6,2 % соответственно). С дальнейшим увеличением расстояния от забоя максимум распределения

сдвигается в сторону уменьшения размера частиц и приходится на размеры частиц 28–29 мкм (5,4 %).

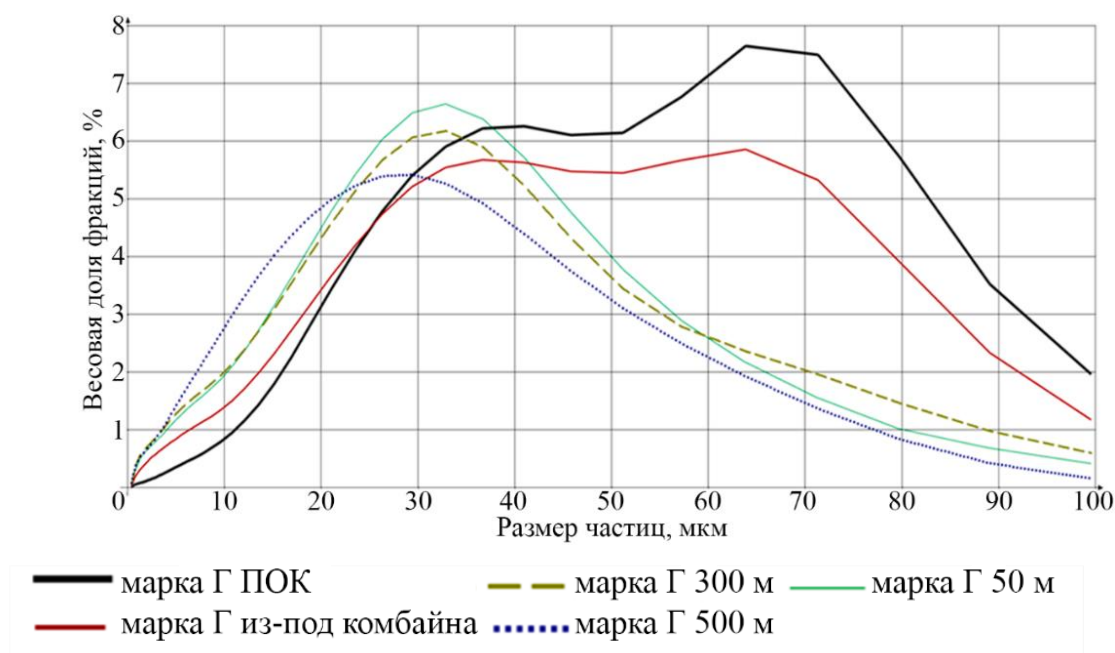


Рисунок 2.2 – Среднее распределение дисперсного состава проб пыли угля марки Г.

Суммарная весовая доля фракций для расстояний 50 и 300 м (диапазон размеров частиц 0–33 мкм), 500 м (диапазон 0–29 мкм) составляет 70 %. Содержание тонких фракций (до 10 мкм) в пробах из-под комбайна составляет 15 %, для остальных точек 23–28 %. Содержание частиц размером более 50 мкм с удалением от забоя на 50 м и далее составляет менее 10 %.

Марка Ж.

Характер распределения дисперсного состава всех проб кроме пробы, отобранной из-под комбайна, бимодальный. При этом максимумы распределения первой и второй моды совпадают во всех пробах. Кроме того, максимум одномодального распределения пробы из-под комбайна совпадает с первой модой остальных проб и приходится на размер частиц 37 мкм: 5,9 %, 5,7 %, 4,9 % соответственно для проб ПОК и из-под комбайна на расстоянии 50 м и 4,5 % в пробах, отобранных на расстоянии 300 и 500 м (рисунок 2.3.).

Максимум второй моды приходится на размер частиц 63–64 мкм: в пробах ПОК и 50 м составляет 6,2 %, 300 м – 5,4 %, 500 м – 5,2 %.

Суммарная весовая доля фракций до 37 мкм в пробах ПОК составляет 46 %, из-под комбайна – 70 %, 50 м – 56 %, 300 м – 62 %, 500 м – 65 %. Фракций 63 мкм в пробах ПОК 76 %, 50 м и 300 м от забоя – 85 %, 500 м 90 %.

Содержание тонких фракций (до 10 мкм) во всех пробах составляет 18–27%.

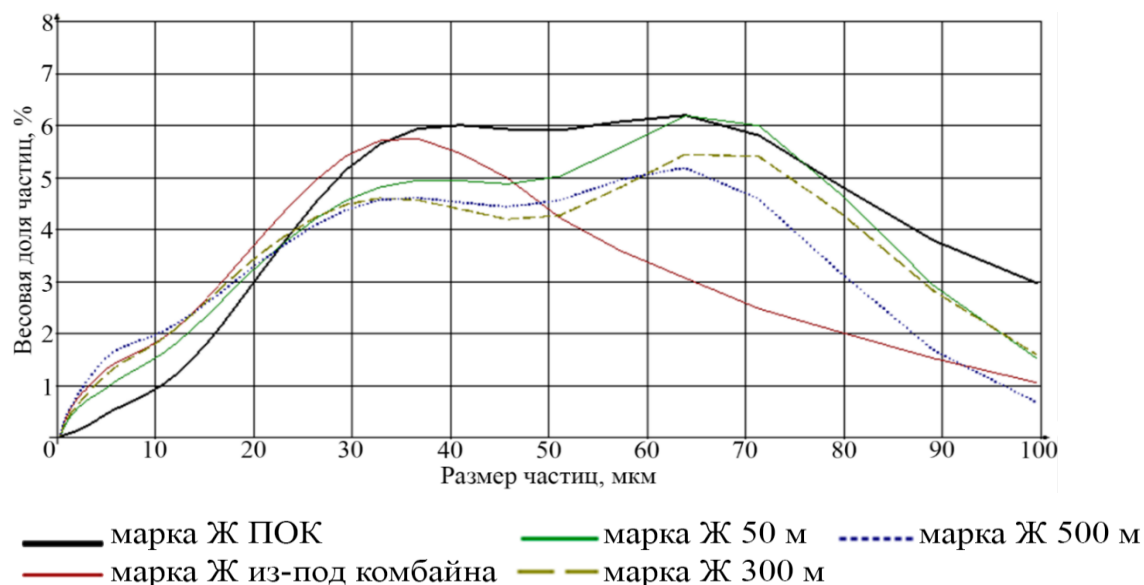


Рисунок 2.3 – Среднее распределение дисперсного состава проб пыли угля марки Ж.

Марка К.

Характер распределения дисперсного состава всех проб одномодальный. При этом в пробах ПОК, из-под комбайна и на расстоянии 50 м максимум распределения приходится на размер частиц 33 мкм: 5,6 %, 5,8 %, 5,9 % соответственно. Для проб, отобранных на расстоянии 300 и 500 м, максимум приходится на размер частиц 30 мкм и составляет 4,9–5,0 % (рисунок 2.4).

Суммарная весовая доля фракций до 33 мкм в пробах ПОК составляет 57 %, из-под комбайна – 63 %, 50 м – 67 %, фракций до 30 мкм в пробах 300 и 500 м от забоя составляет 70 %.

Содержание тонких фракций (до 10 мкм) в пробах ПОК, из-под комбайна и на расстоянии 50 м от забоя составляет 17–21 %, в 300 и 500 м от забоя – 30 %.

Характеристика распределений пыли в пробах, отобранных в различных местах в 40 выработках угольных шахт Кузбасса, приведена в таблице Б.1.

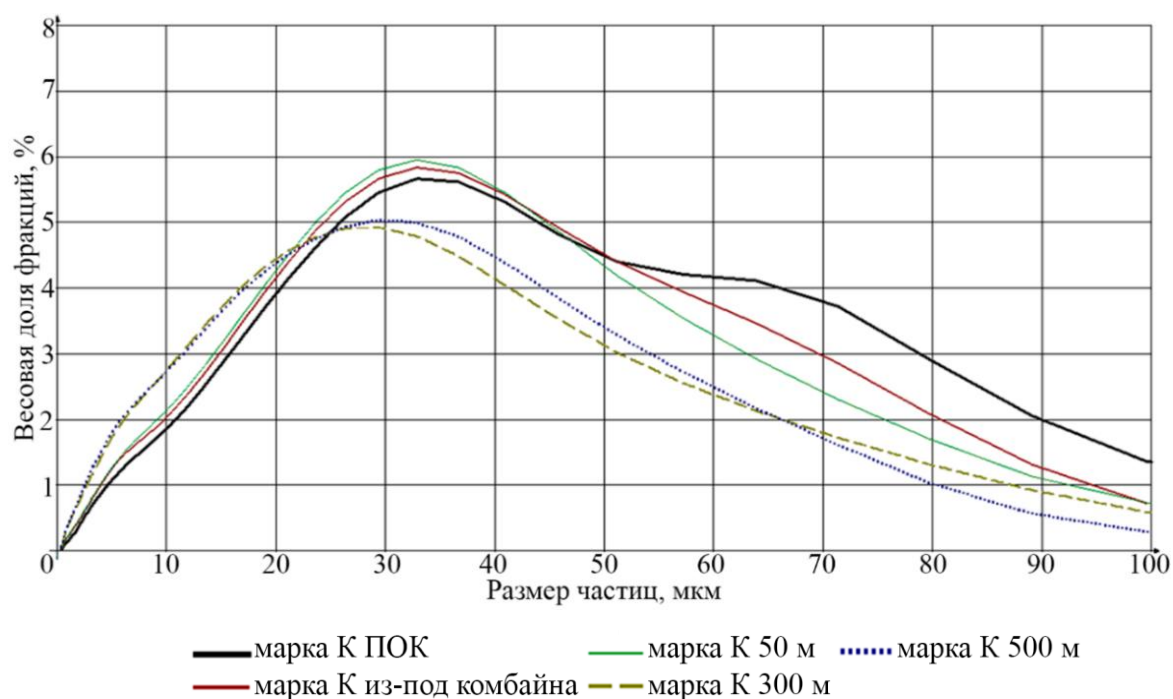


Рисунок 2.4 – Среднее распределение дисперсного состава проб пыли угля марки К.

Средние значения плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Плотность распределения дисперсного состава угольной пыли проб, отобранных из-под комбайна [112]

Марка угля	Максимум 1-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %	Максимум 2-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %
Д	37	5,68	57	5,89
Г	37	5,7	64	5,68
Ж	37	5,75	-	-
К	33	5,84	-	-

Пример графиков плотности распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна, приведен на рисунке 2.5.

Средние значения плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 50 метрах от забоя, приведены в таблице 2.4 [1].

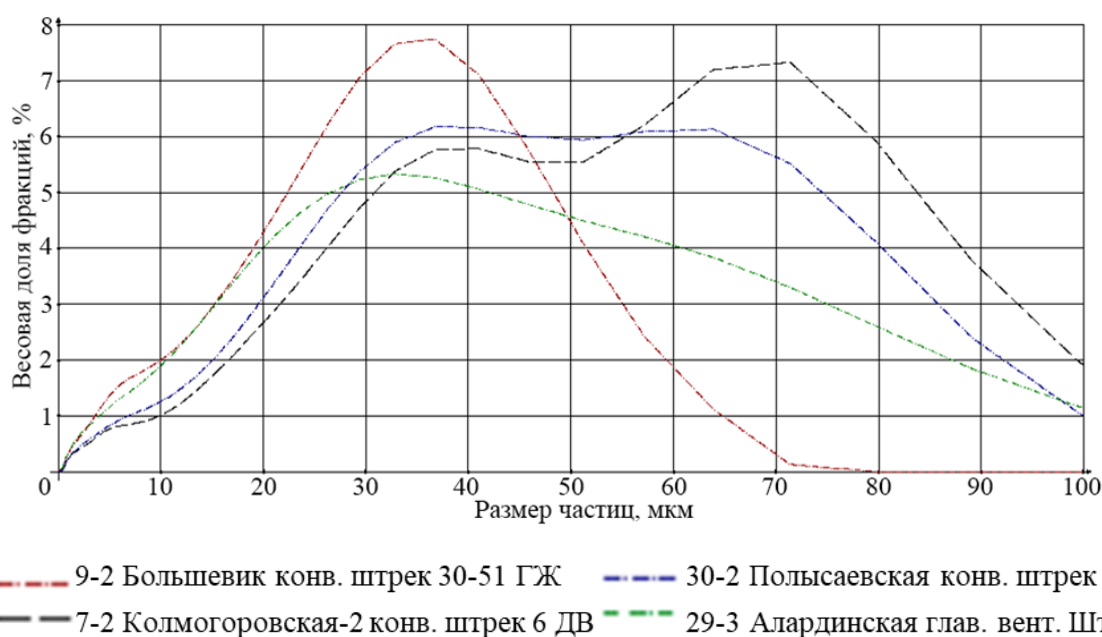


Рисунок 2.5 – Плотность распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна.

Таблица 2.4 – Плотность распределения дисперсного состава угольной пыли проб, отобранных в 50 м от комбайна [1, 111].

Марка угля	Максимум 1-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %	Максимум 2-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %
Д	37	6,65	41	6,26
Г	33	6,2	-	-
Ж	37	4,95	64	6,19
К	33	5,95	-	-

Пример графиков плотности распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 50 метрах от забоя, приведен на рисунке 2.6.

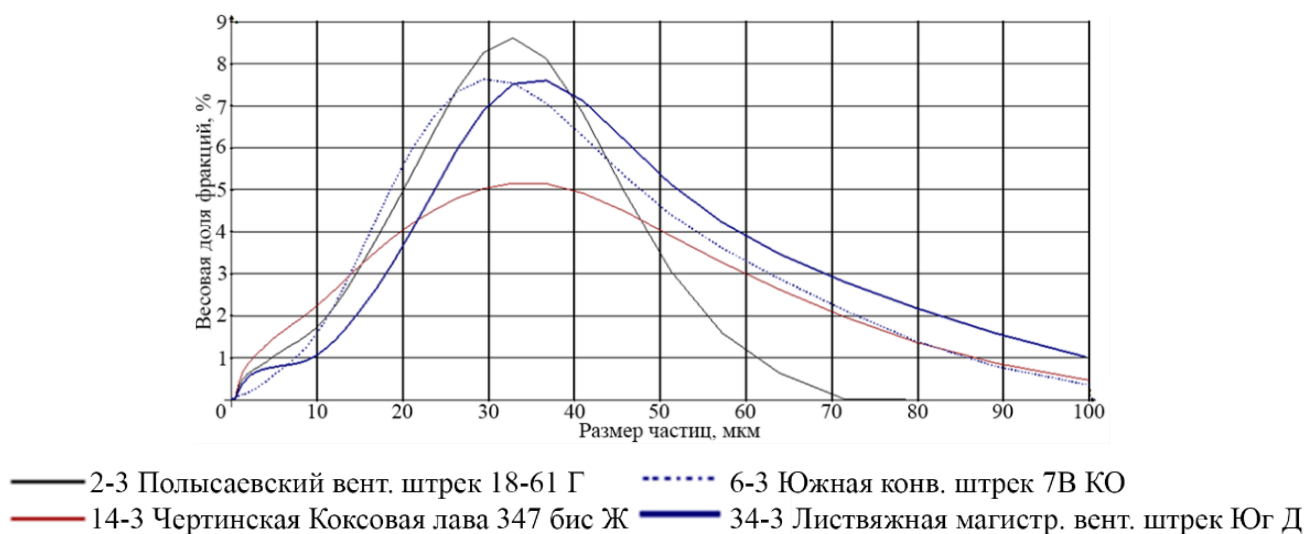


Рисунок 2.6 – Плотность распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 50 метрах от забоя.

Средние значения плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 300 метрах от забоя, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Плотность распределения дисперсного состава угольной пыли проб в 300 м от забоя [1, 112].

Марка угля	Максимум 1-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %	Максимум 2-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %
Д	37	5,91	-	-
Г	33	6,18	-	-
Ж	33	4,6	71	5,4
К	29	4,92	-	-

Пример графиков плотности распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 300 метрах от забоя, приведен на рисунке 2.7.

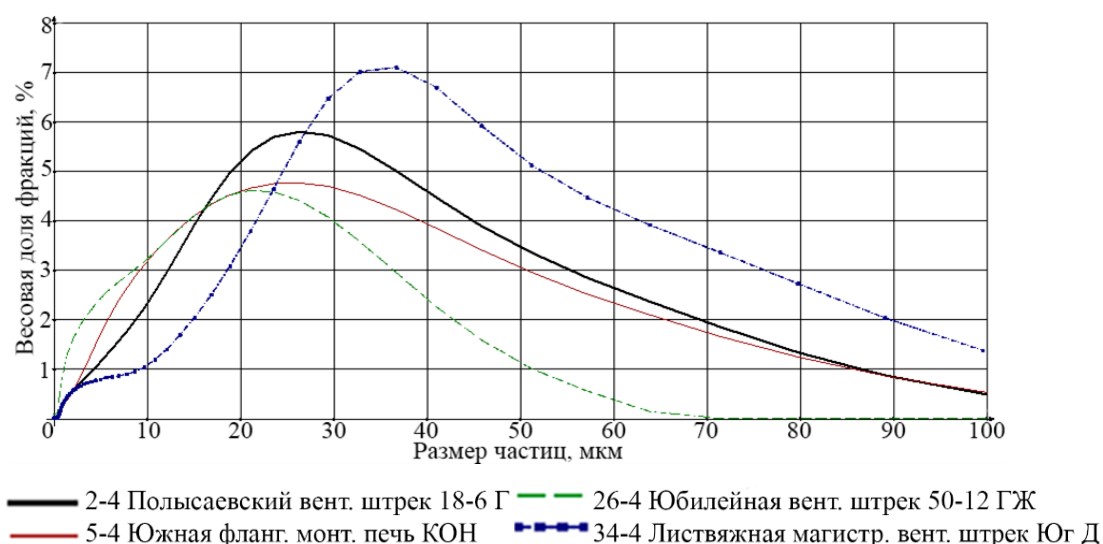


Рисунок 2.7 – Плотность распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 300 метрах от забоя.

Средние значения плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 500 метрах от забоя, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Плотность распределения дисперсного состава угольной пыли проб в 500 м от забоя [1, 111, 112].

Марка угля	Максимум 1-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %	Максимум 2-й моды, мкм	Содержание в максимуме, %
Д	33	5,98	-	-
Г	29	5,42	-	-
Ж	37	4,6	64	5,18
К	29	5,03	-	-

Пример графиков плотности распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 500 метрах от забоя, приведен на рисунке 2.8.

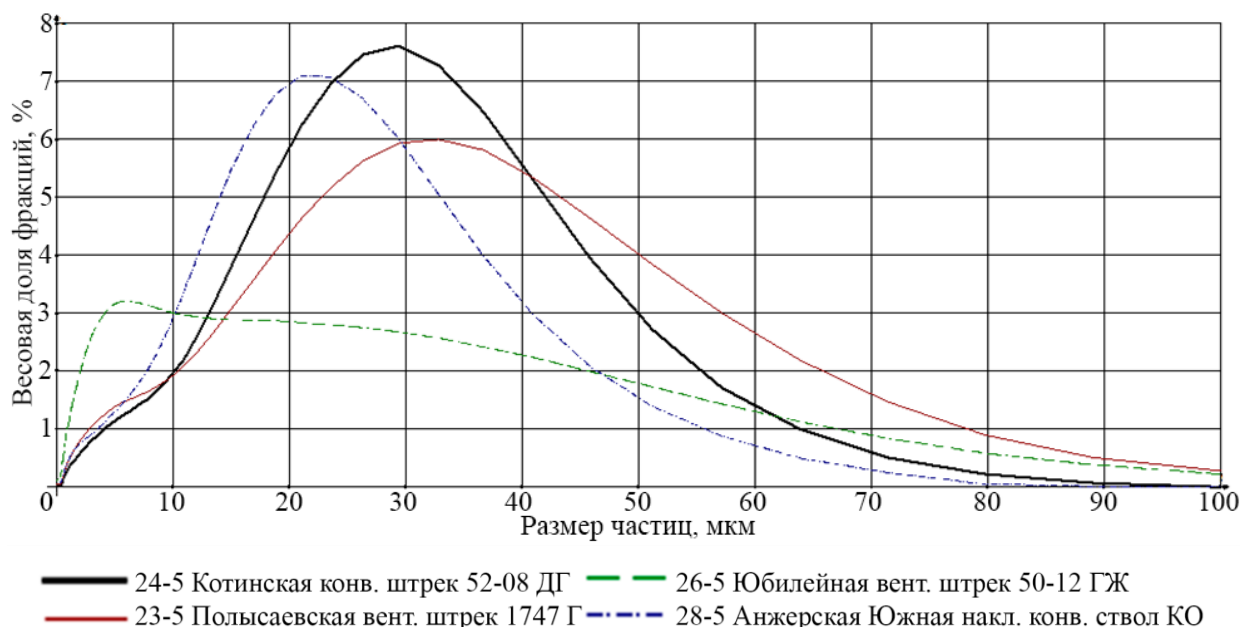


Рисунок 2.8 – Плотность распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных в 500 метрах от забоя.

Анализ значений плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна, а также 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 метаморфизированным углям с 37 мкм до 29 мкм, т. е. в среднем на 25 % [3].

Таким образом, плотность распределения пылевых фракций при разрушении угля зависит от марочного состава и с ростом степени метаморфизма угля сдвигается на 20–25 % в сторону увеличения выхода мелких фракций пыли для углей марок К и Ж. Это существенно повышает пылевзрывоопасность по длине выработки и требует пересмотра норм осланцевания и качества пылевзрывозащитных мероприятий.

2.3. Исследование интенсивности и дисперсного состава пылеотложений по сети горных выработок угольных шахт

Как показано в разделе 2.2., основными факторами, определяющими взрывчатые свойства аэрозоля, являются дисперсный состав, выход летучих веществ, содержание золы и влаги. К пылевзрывоопасным относятся все пласты угля с выходом летучих веществ 15 % и более. Угли с меньшим содержанием летучих (кроме антрацитов) должны подвергаться лабораторным испытаниям на взрывчатость пыли. Наиболее легко взрывается аэрозоль с содержанием летучих 17–32 %. При этом взрывчатые свойства угольной пыли с увеличением содержания золы и влажности снижаются, однако максимальной взрывчатой способностью обладает пыль в диапазоне 10–100 мкм, т. е. взрывчатость угольной пыли повышается с увеличением степени дисперсности. Поэтому в шахте по мере удаления от источника пылеобразования она становится потенциально более взрывоопасной.

Комплексные исследования по установлению закономерностей распределения угольной пыли и реальной интенсивности пылеотложений в угольных шахтах России уже не проводились на протяжении нескольких десятилетий. За это время произошло коренное изменение как в технологическом обеспечении как очистных, так и проходческих забоев. Значимо изменились и скорости их подвигания и производительность труда. Все эти факторы, безусловно, должны значительно повлиять на состояние пылевзрывозащиты угольных шахт, хотя нормативные параметры мероприятий по ее осуществлению также не пересматривались уже более двадцати лет.

В связи с этим проведен ряд исследований на угольных шахтах Кузбасса, основной целью которых являлось определение интенсивности пылеотложений по сети горных выработок угольных шахт, а также проведение дисперсного анализа проб отложившейся угольной пыли [113].

Наиболее полный комплекс исследований был проведен на трех шахтах: шахты «Алексиевская» (лава 218), «Заречная» (лава 1305) и «им. С. М. Кирова» (лава 25–93). Результаты приведены в таблице Б.2.

Во взрыве угольной пыли принимают участие пылинки, начиная с мельчайших (с диаметром частиц 0,001–0,1 мкм) до угольных частиц диаметром 75–1000 мкм [8]. С увеличением степени дисперсности и удельной поверхности взрывчатость угольной пыли непрерывно возрастает; основным носителем взрывчатых свойств угольной пыли являются фракции размером менее 75 мкм. Максимум взрывчатости наблюдается при фракции менее 10 мкм, затем она снижается вследствие аутогезии мелких частиц. Таким образом, по мере удаления от источника образования пыль становится более взрывоопасной, поскольку возрастает степень ее дисперсности [8].

В качестве примера на рисунке 2.9. приведены графики распределений угольной пыли по фракциям при разной удаленности места отбора проб от источника пылевыведения.

С удалением от забоя в пробах пылеотложений преобладают тонкие фракции, т. е. с изменением технологии добычи угля и увеличением нагрузок на очистные забои характер распределений фракционного состава не претерпел существенных изменений [113]. С удалением от забоя (источника пылевыведения) в пробах отложившейся угольной пыли также преобладают тонкие фракции. Приведем кратко анализ распределений средних значений (среднее значение за весь период измерения пылеотложений в данной точке изменялся от трех до шести дней) весовой доли фракций размером 2, 5, 10, 20, 40 и 80 мкм.

Вблизи источника пылевыведения на расстоянии до 50 м от забоя максимум распределения фракций находится в диапазоне размеров частиц 28–32 мкм и их весовая доля составляет около 9 %; на расстоянии 60–200 м – максимум приходится на частицы размером 15–20 мкм (7,5–9 %); более 300 м – 10–14 мкм (6–6,5 % рисунке 2.9).

Весовая доля фракций 2–5 мкм (рисунок 2.10) характеризуется увеличением на расстоянии до 600 м (10–16 %) и далее по выработке остается практически неизменной (7–10%).

Фракции крупностью 5–10 мкм и 10–20 мкм равномерно увеличиваются по содержанию в пробе с удалением от источника пылевыведения до 33–45 % (рисунок 2.11) и 45–47 % (рисунок 2.12) соответственно.

Фракция крупностью 20–40 мкм и 40–80 мкм имеют явный максимум вблизи источника пылевыведения (33–55 % и 15–35 %) и с расстояния 70 м имеют тенденцию к явному снижению весовой доли до 4–14 % (рисунок 2.12) и 3–5 % (рисунок 2.10) соответственно.

Угольная пыль, отлагающаяся в горных выработках, по дисперсному составу является взрывчатой, причем содержание наиболее опасной по взрыву фракции (менее 75 мкм) составляет во всех полученных пробах более 90 % по массе, что никогда ранее не наблюдалось, исключая места погрузочных пунктов, где авторы многочисленных исследований получали значения до 93 %.

Доля фракции крупностью до 2 мкм практически не изменяется на всем протяжении горной выработки и для шахт Алексиевская и им. С. М. Кирова составляет около 1 % во всех точках отбора проб (сплошные кривые на рисунке 2.13). В местах отбора проб шахты Заречная на расстоянии до 310 м наблюдалось некоторое повышение (до 7 %) доли этой фракции.

На рисунке 2.13 приведены результаты расчета интенсивности пылеотложений, проведенные после обработки всех проб (средние показатели за весь период наблюдений на трех шахтах). При этом средние нагрузки на забои лав были следующими: Шахта Алексиевская – 1,6 тыс. т; Шахта им. С. М. Кирова – 5,1 тыс. т; Шахта Заречная – 7,8 тыс. т.

Интенсивность пылеотложений по длине выработки, как показали расчеты, почти линейно уменьшается с удалением от лавы во всех случаях. При этом установлено, что максимум пылеотложений (50–120 г/м³·сут.) находится на расстоянии до 100 м от лавы и далее идет равномерное его снижение до 8–20 г/м³·сут.

Таким образом, в результате проведенных шахтных исследований установлено следующее.

1. При современных нагрузках на очистные забои резко возрастает общее поступление тонких фракций угольной пыли в атмосферу и интенсивность ее отложения в горных выработках.

2. Интенсивность пылеотложений по длине выработки уменьшается с удалением от лавы. При этом максимум пылеотложений ($50\text{--}120 \text{ г/м}^3\cdot\text{сут.}$) находится на расстоянии до 100 м от лавы и далее идет равномерное его снижение 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 [113].

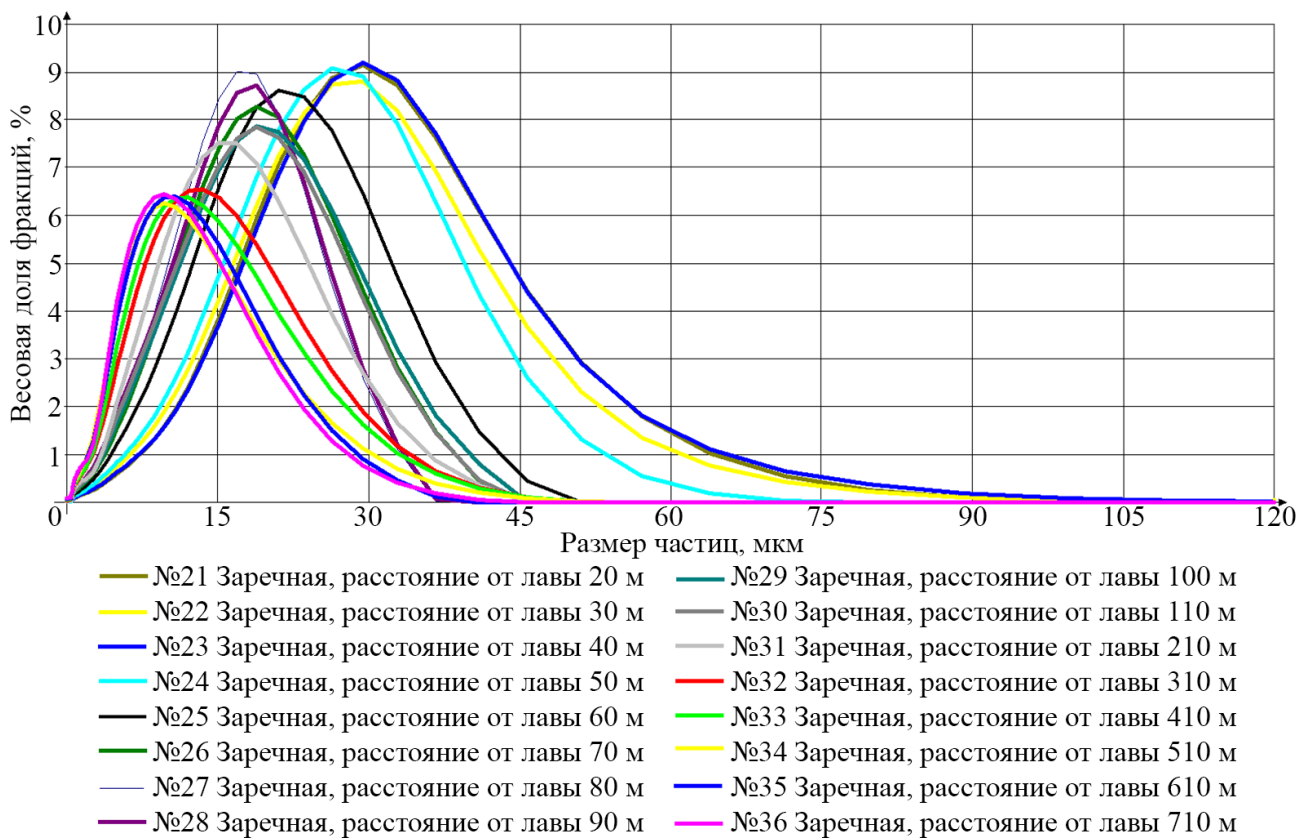


Рисунок 2.9 – Изменение дисперсного состава пылеотложений в зависимости от удаления от лавы шахты Заречная

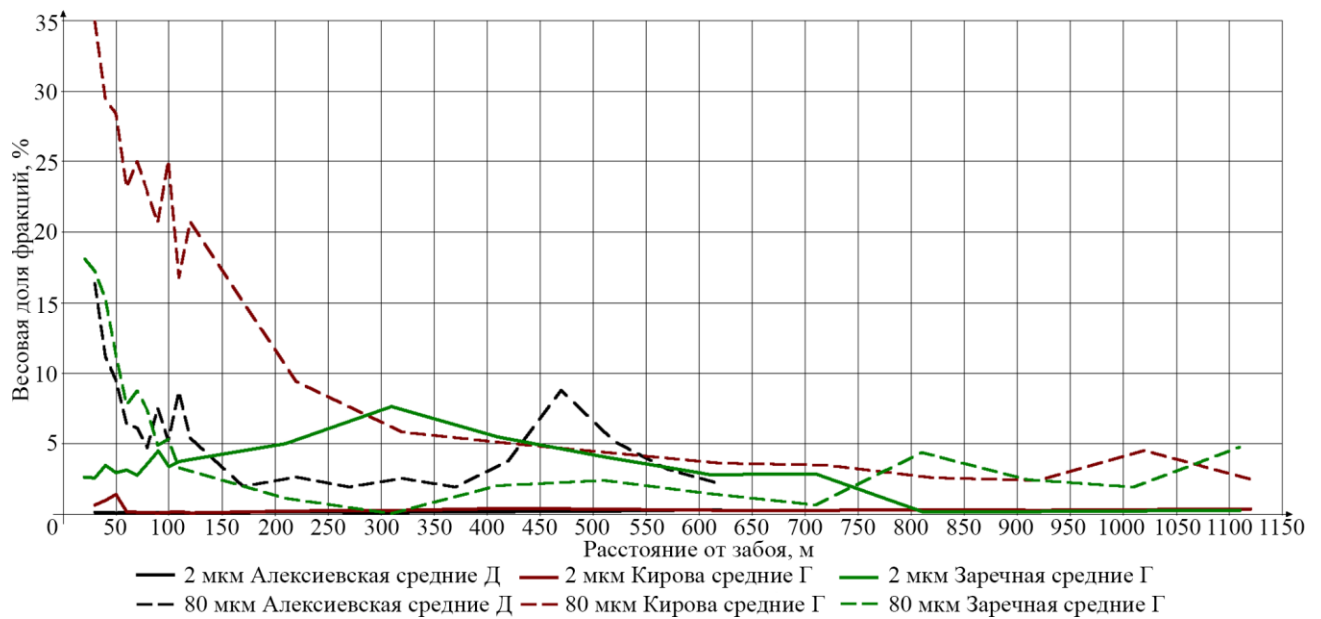


Рисунок 2.10 – Распределение средних значений весовой доли фракций 0–2 мкм (сплошная линия) и 40–80 мкм (штриховая линия) по длине выработки

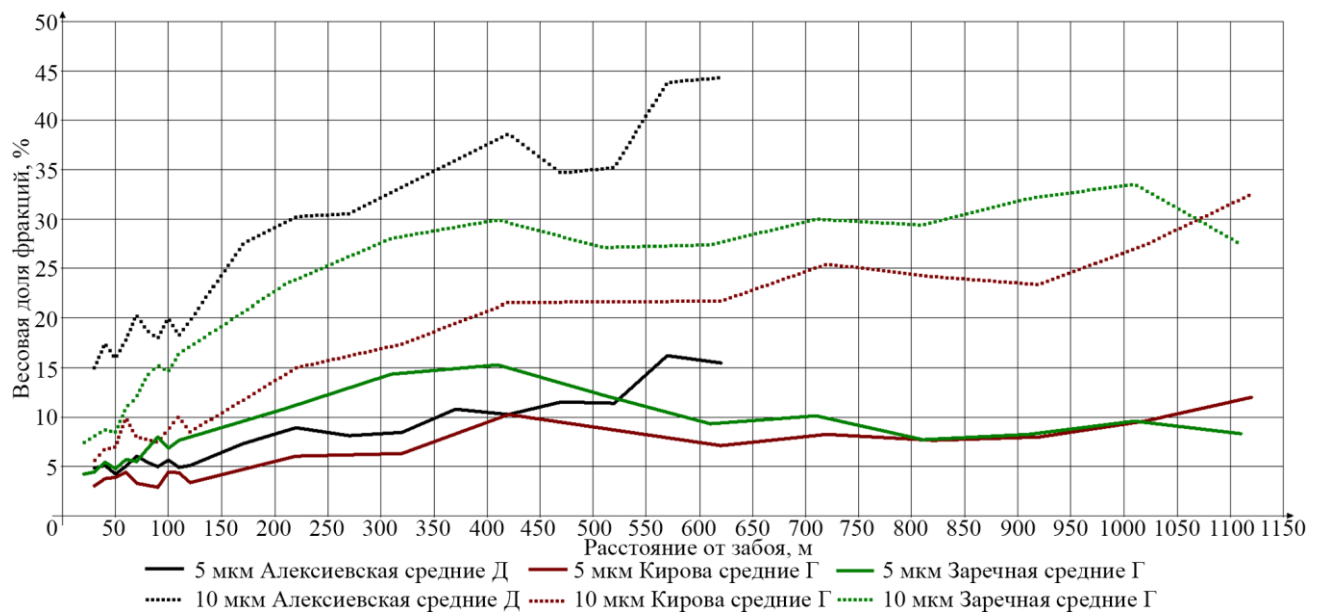


Рисунок 2.11 – Распределение средних значений весовой доли фракций 2–5 мкм (сплошная линия) и 5–10 мкм (штриховая линия) по длине выработки

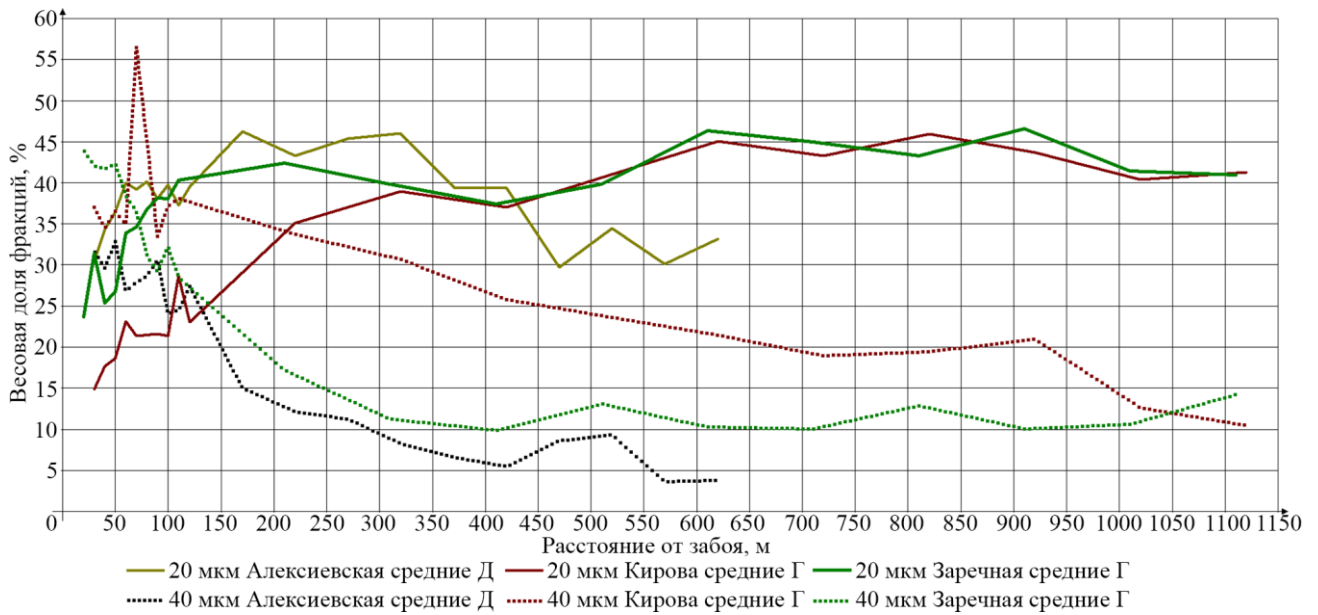


Рисунок 2.12 – Распределение средних значений весовой доли фракций 10–20 мкм (сплошная линия) и 20–40 мкм (штриховая линия) по длине выработки

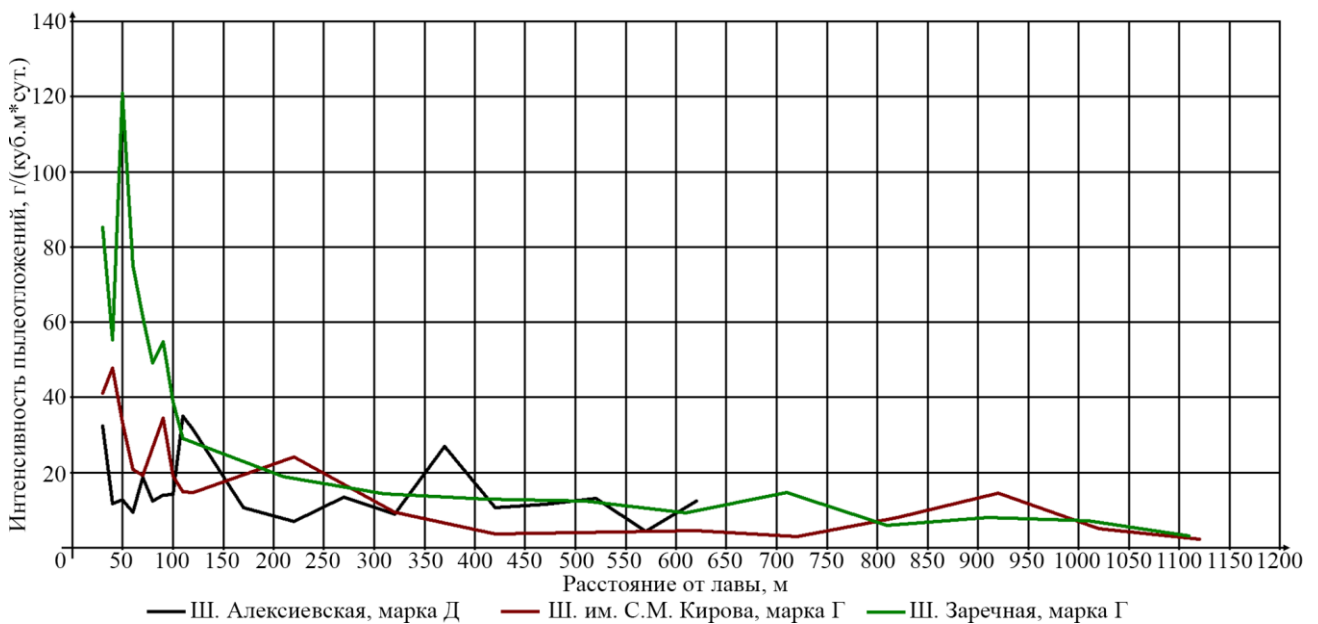


Рисунок 2.13 – Изменение интенсивности пылеотложений в зависимости от расстояния от лавы

Как говорилось ранее, на участках горных выработках от источника пылевыведения до отметки 50–70 м характер пылеотложений определяется интегральной плотностью распределения фракций более 20 мкм и описывается гиперболической зависимостью. Движение угольной пыли в условиях воздушного потока в выработках угольных шахт называют газотвердым двухфазным потоком.

2.4. Анализ эмпирической модели пылеотложения

Анализ данных и пылеотложения в зависимости от концентрации пыли позволил предположить функцию для ее описания. С использованием разработанных уравнений для каждого из экстраполированных случаев была построена эмпирическая модель, описывающая связи между функциями пылеотложения и пылеконцентрации. Оценка взрывоопасности отложений угольной пыли связана с измерениями концентрации пыли, образующейся в процессе добычи и других условиях, а именно вентиляции, влажности, температуры и свойств угля.

Эмпирическая модель пылеотложения в зависимости от концентрации пыли, измеренной в защитной зоне, была описана экспоненциальной функцией с высоким коэффициентом детерминации, что позволило с высокой вероятностью правильно описать результаты измерений. Впоследствии функции были преобразованы в экспоненциальные уравнения, а результаты измерений экстраполированы за пределы диапазона измерений. Результаты занесены в таблицу Б.3.

В выработке угольной шахты поля воздушного потока можно разделить на неупорядоченную область, область рециркуляции и стабильную область. В неупорядоченной области, которая находилась в районе забоя и проходческого комбайна, было обнаружено существование множественных взаимодействующих высокоскоростных воздушных потоков. Большие воздушные потоки наблюдались в области рециркуляции, которая находилась вдоль стены выработки вдали от цилиндра давления, в связи с чем необходимо моделирование условий с различными показателями скорости воздушного потока.

Для корреляции данных интенсивности пылеотложений с показателями, характеризующими действия пылевоздушной среды на массоперенос взрывоопасных фракций пыли, были использованы данные из стендового эксперимента на аэродинамической трубе Т-1400.

Аэродинамическая труба Т-1400 предназначена для контроля массовой концентрации пыли и скорости воздушного потока. Она имеет металлический корпус в виде трубы и состоит из герметично соединённых между собой отдельных

элементов. Установка оборудована устройством для выравнивания воздушного потока с съёмным конусовидным элементом, дозатором пыли, вытяжным вентилятором и пробоотборником. В корпусе предусмотрен шлюз для размещения исследуемых измерительных приборов. Особенностью данной установки является то, что корпус соединён с пылеулавливающей установкой через патрубок.

На рисунке 2.14 показан металлический корпус, дозатор пыли, вытяжной вентилятор, пылеулавливающая установка (соединена с металлическим корпусом посредством патрубка), расположенная вне центрального потока воздуха. Устройство для спрямления воздуха может работать как в обычном режиме (без дополнительного сужения потока воздуха), так и со съёмным элементом в виде конуса (не показан). Для отбора проб пыли используется пробоотборник, который с помощью патрубка соединяется с корпусом и производится отбор проб угольной пыли.

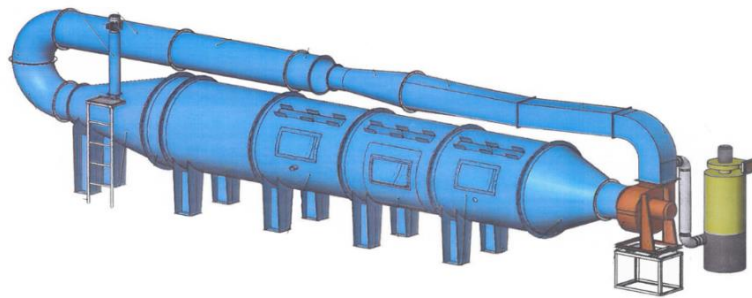


Рисунок 2.14 – Аэродинамическая труба Т-1400.

Аэродинамическая труба — это техническое устройство, предназначенное для моделирования воздействия среды на движущиеся либо стационарно закрепленные в ней приборы. Для нагнетания воздуха используется вентилятор. Использование вентилятора позволяет равномерно распределять аэрозоль в воздушном потоке, что приближает искусственно созданную атмосферу внутри установки к естественной шахтной атмосфере. Регулируя скорость вращения вентилятора, регулируется скорость движения воздуха, моделируется создание разных условий внутришахтной атмосферы. Производится несколько замеров при разных концентрациях частиц и скоростях воздуха. Скорость воздуха регулируется в диапазоне 0–24,5 м/с.

Аэрозоль, равномерно подаваемый дозатором, подхватывается воздушным потоком. Проводится несколько сеансов испытаний. Через дозатор подается аэрозоль разных дозировок для создания различных концентраций. Моделируются возможные условия и возможная концентрация пылевоздушной смеси при ведении разных видов горных работ в шахте. Внутри корпуса образуется пылевоздушная смесь заданной концентрации. Следовательно, указанный признак является существенным и находится в причинно-следственной связи с заявленным техническим результатом. Условия для проведения испытаний приближены к обычным: температура воздуха - от 5 до 45°C, относительная влажность задавалась от 20 до 95%, давление около атмосферное от 84 до 106,7 кПа, естественная влажность угольной пыли замерялась в лаборатории с помощью влагомера ВИМС. Для контроля параметров воздушной смеси использовались барометр-анероид метеорологический БАММ-1 зав.№ 14, мультиметр «APPA 305» зав. № 24250660, измеритель параметров микроклимата МЕТЕОСКОП-М зав. № 87713, гигрометр психрометрический ВИТ-2 зав. № 101797, термометр лабораторный, пробоотборник воздуха автоматический ОП-442ТЦ, зав.№2179-3-12, весы лабораторные ВЛА-200 с набором гирь ГОСТ 7328-82, стационарный датчик контроля запыленности ИЗСТ-01.

В шлюз помещалась подставка с размещенными на ней измерительными приборами (не показана) для контроля параметров атмосферы – уровня концентрации запыленности, влажность, относительного давления, скорости воздушного потока, дисперсного состава аэрозоля. Приборы размещались в направлении движущегося воздушного потока. Приборы зарегистрированы в Госреестре средств измерений и поверены в установленном порядке.

По длине аэродинамической трубы устанавливались электронные весы с автоматической передачи данных в вычислительное устройство, а также подложки для последующего расчета пылеотложения. Места установки подложек и весов – в нижней части металлического корпуса аэродинамической трубы на расстоянии 1,25 м друг от друга, начиная от круглой соединительной секции. Пример установки весов показан на рисунке 2.15. Одновременно через пробоотборник

производится отбор контрольных проб. Отбор проб производится при установившемся движении воздуха в двух точках до шлюза и после.

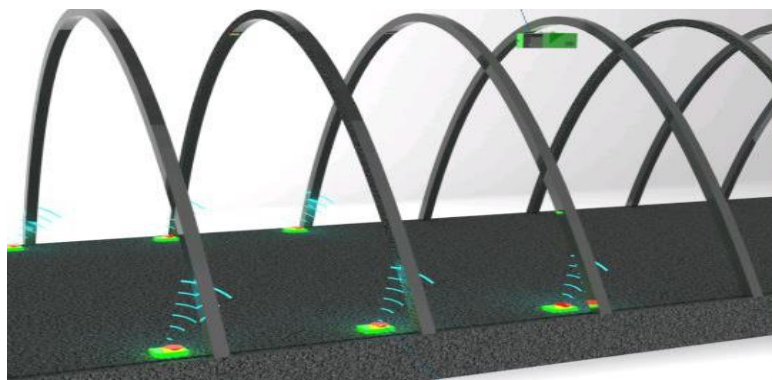


Рисунок 2.15 – Пример установки автоматических весов в аэродинамической трубе или горной выработке с вычислительным блоком.

При проведении исследований диапазон диаметров пылевых частиц использовался от 0,01 до 150 мкм, изготовленных из пластовых проб, отобранных на угольных шахтах Кузбасса, соответствующих углям марок К, КС, Д, Г, Ж. Показания исследуемых приборов сравниваются с расчетными показаниями, полученными при исследовании проб угольной пыли в рамках исследований пылеотложений на угольных шахтах Кузбасса.

В дальнейшем результаты стендовых испытаний были обработаны с помощью встроенной цифровой платформы DustGas с элементами нейросети для анализа и экстраполяция результатов. Входными данными (входным вектором) для обучения искусственной нейронной сети (далее – ИНС) являются: концентрация и дисперсный анализ пыли, влажность и температура воздуха. Выходными данными является пылеотложение, измеренное размещенными на аэродинамической трубе датчиками пылеотложения, входящими в систему (весами с передачей информации в вычислительное устройство). В вычислительном устройстве проходит обучение ИНС – связывается вектор входных параметров со значениями выходных. Данный итеративный процесс происходит до заданного критерия достоверности, после чего обучение ИНС завершается и датчики пылеотложения убираются. Измеритель продолжает сам рассчитывать пылеотложение на основе ИНС в собственном вычислительном устройстве. В дальнейшем ИНС на основе встроенной цифровой платформы DustGas используется в вычислительных блоках подсистемы МФСБ.

2.5. Влияние физических параметров и скорости потока воздуха на интенсивность пылеотложения

В ходе сравнения расчетных данных ИНС и экспериментальных были получены зависимости интенсивности и скорости осаждения угольной пыли от влажности и скорости потока воздуха в условиях управляемой моделируемой среды. Это исследование обеспечило качественное сравнение осаждения пыли на участках из-за различных параметров, таких как скорость ветра, размер частиц пыли и материал пыли.

Для обобщения результатов были созданы трехмерные графики (см. рисунки. 2.16–2.18). Это позволило визуализировать связи между различными параметрами аэродинамических характеристик атмосферы в моделируемой аэродинамической трубе и интенсивностью пылеотложения.

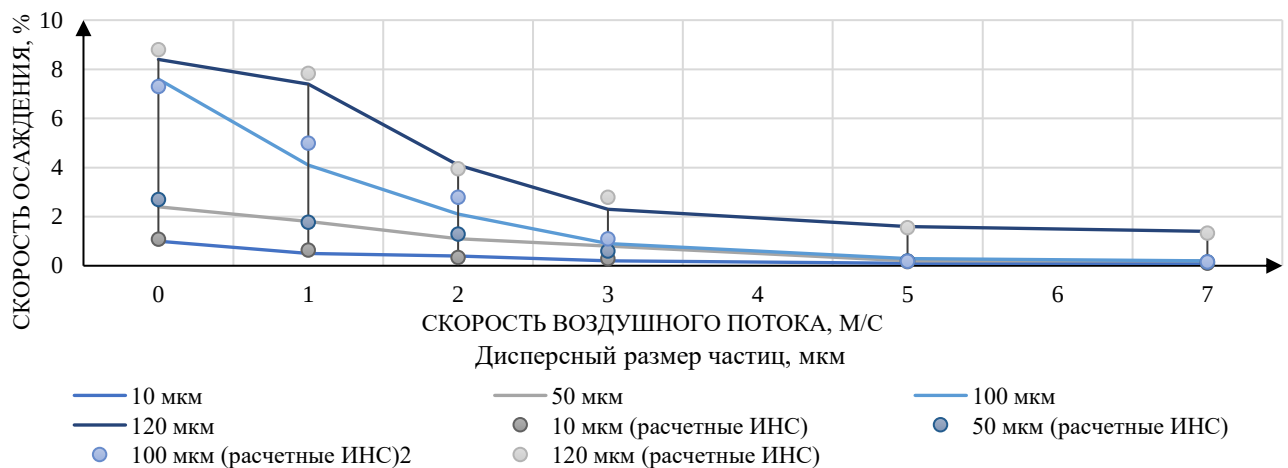


Рисунок 2.16 – Зависимость скорости осаждения частиц от скорости воздушного потока.

На рисунке 2.17 показано влияние размера частиц пыли и скорости воздушного потока на скорость осаждения угольной пыли. С увеличением размера (диаметра) частиц увеличивается и скорость осаждения для большинства скоростей воздушного потока при управляемой моделируемой обстановке на всем отрезке удаления от источника (дозатора пыли). Однако увеличение скорости ветра снижает скорость осаждения. Влияние размера частиц пыли и скорости ветра на уровень интенсивности пылеотложений показал характерные зависимости, представленные на графиках.

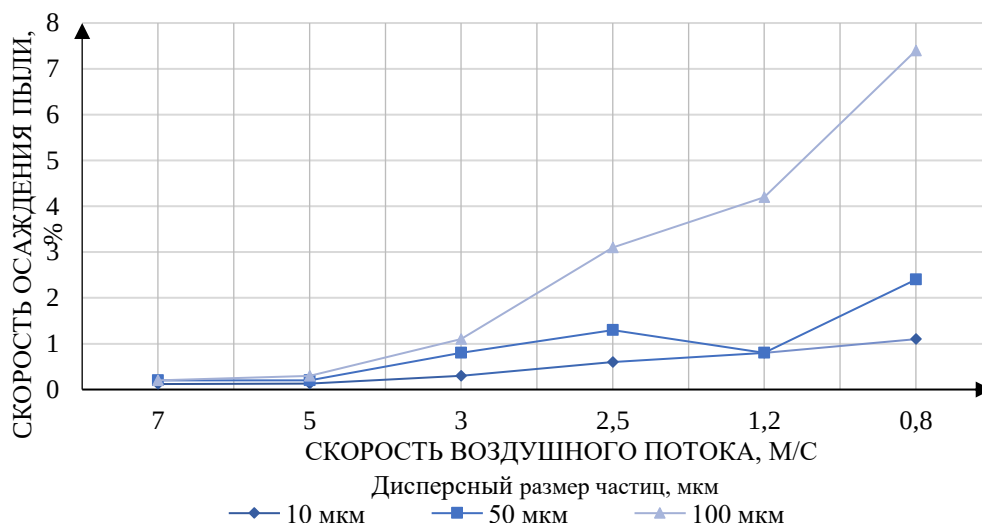


Рисунок 2.17 – Зависимость скорости осаждения частиц от скорости воздушного потока и размера частиц.

По результатам испытаний и моделирования при помощи аэродинамической установки Т-1400 представлены экстраполированные результаты измерений, описывающие влияние влажности окружающей среды на интенсивность пылеотложения угольной пыли в сети горных выработок угольных шахт. Для анализа использовались данные, собранные в различных условиях влажности и интенсивности пылеотложения.

Для экстраполяции результатов использовались данные, собранные в диапазоне влажности от 30 % до 90 %. Параметры модели были определены методом наименьших квадратов.

На рисунке 2.18 показана зависимость интенсивности пылеотложений от влажности воздуха. С увеличением влажности окружающей среды интенсивность пылеотложения угольной пыли значительно снижается. Это связано с тем, что влага способствует увеличению массы частиц пыли, что приводит к их быстрому оседанию. На графике отображена зависимость интенсивности пылеотложения (I) от относительной влажности воздуха (W) для различных марок угля (К, Г, Ж, Д). С увеличением влажности воздуха интенсивность пылеотложения уменьшается для всех марок угля, однако скорость снижения различается. Это связано с тем, что влага способствует агломерации частиц пыли, увеличивая их массу и размер. Однако, степень снижения различается в зависимости от марки угля.

Гигроскопичность увеличивается от углей с высокой степенью метаморфизма к углям с низкой степенью метаморфизма (марка Д). Марка К наименее чувствительна к изменению влажности. Марка Д наиболее чувствительна, что свидетельствует о сильной зависимости процесса пылеотложения от влажности воздуха.

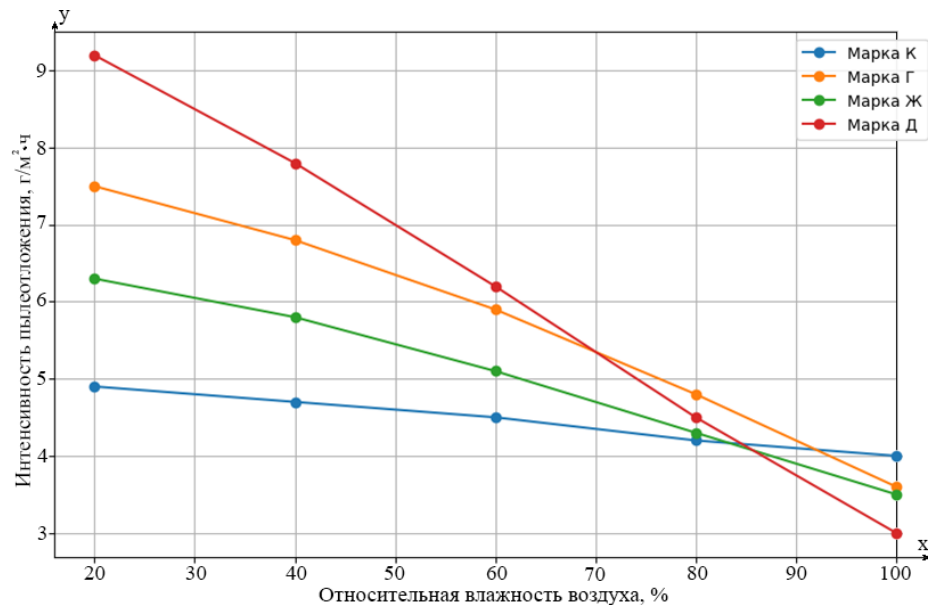


Рисунок 2.18 – Зависимость интенсивности пылеотложения от влажности воздуха.

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

$$P_t = 86,4 \frac{f(r)vl^B}{S(W+W_B)} \text{ г/м}^3\text{сут.}, \quad (2.22)$$

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, %.

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 расчетного метода (погрешность находилась в диапазоне $\pm (16 \div 24) \%$ в зависимости от диапазона) [1]. Таким образом, анализ результатов проведенного комплекса лабораторных и шахтных исследований показал, что определение величины интенсивности пылеотложения от одного источника интенсивного пылевыведения до следующего следует проводить на основе измерения концентрации витающей пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха.

2.6. Разработка методики контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт по сети горных выработок

Методика контроля интенсивности пылеотложений разработана на основе большого объема экспериментальных исследований. Отбор проб пыли осуществлялся в соответствии с ГОСТ 21153.0-75 с целью получения данных о распределении дисперсного состава пыли. Методика отбора была частично усовершенствована путем анализа лабораторных и шахтных испытаний, а также моделированием аэродинамических процессов. На основе полученных данных была сформулирована следующая методика:

1. Отбор проб отложившейся угольной пыли на подложки производится на протяжении пяти суток. Подложки меняются каждые сутки: установка в конце первой смены после проведения пылевзрывозащитных мероприятий (осланцовки), уборка подложек в начале первой смены перед осланцовкой.

2. Место установки подложек: в выработке с исходящей струей воздуха из очистного забоя устанавливаются 10 подложек через каждые 10 метров от лавы, на остальном протяжении выработки устанавливаются 10 подложек через каждые 100 метров.

3. Каждые сутки во время отбора проб должна фиксироваться следующая информация:

- количество воздуха, проходящего по выработке;
- скорость воздуха в месте установки подложки [114];
- добыча из лавы;
- показания датчика ИЗСТ, установленного в 20 м от лавы;
- ширина выработки по почве в месте установки подложки;
- площадь поперечного сечения выработки в свету в месте установки

подложки.

4. Отбирается проба угля путем штробления (1,5–2 кг).

5. Отбирается проба угля, отбитая и измельченная комбайном (1,5–2 кг).

Ниже приведены данные по распределению дисперсного состава пыли при разрушении углей (рисунки 2.19–2.28).

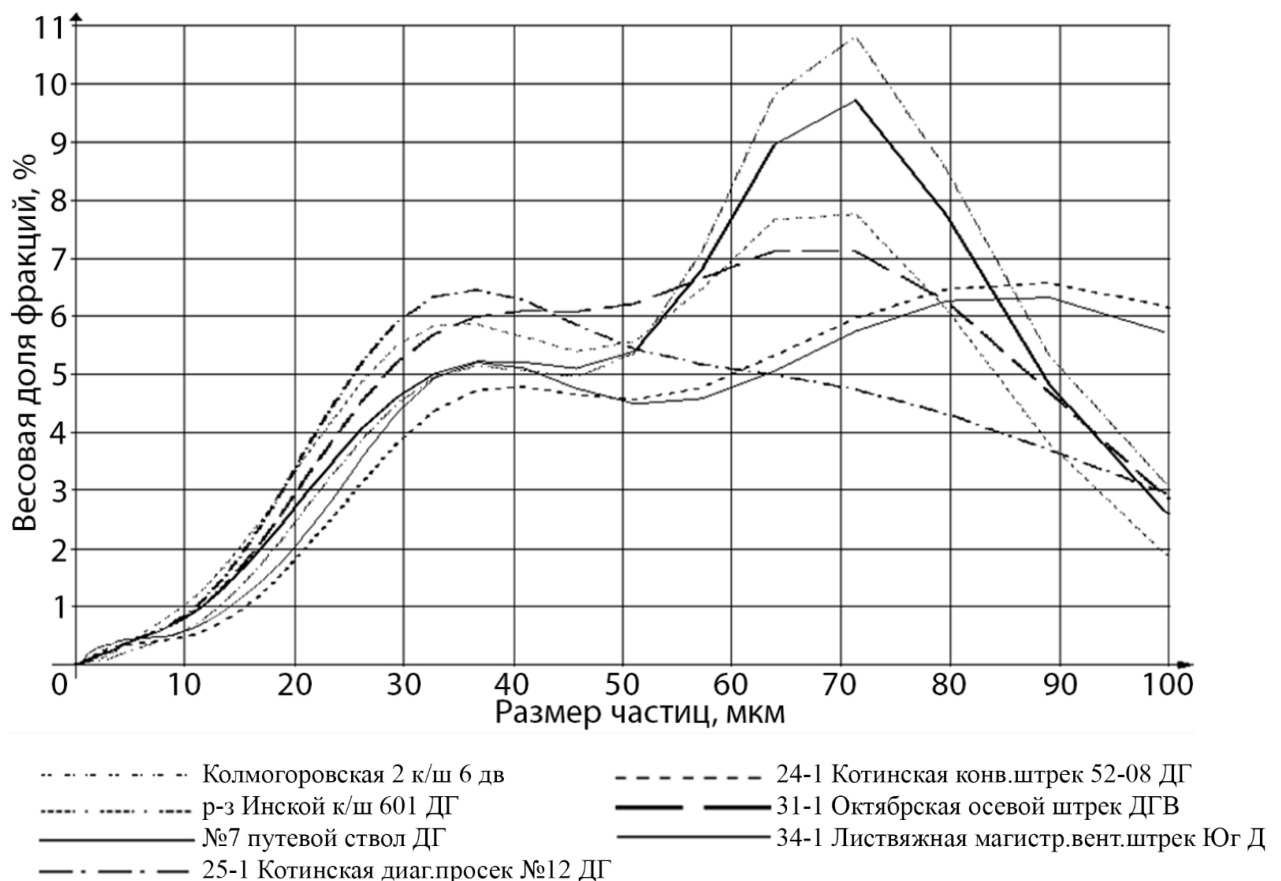


Рисунок 2.19 – Распределение дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Д методом толчения на ПОК.

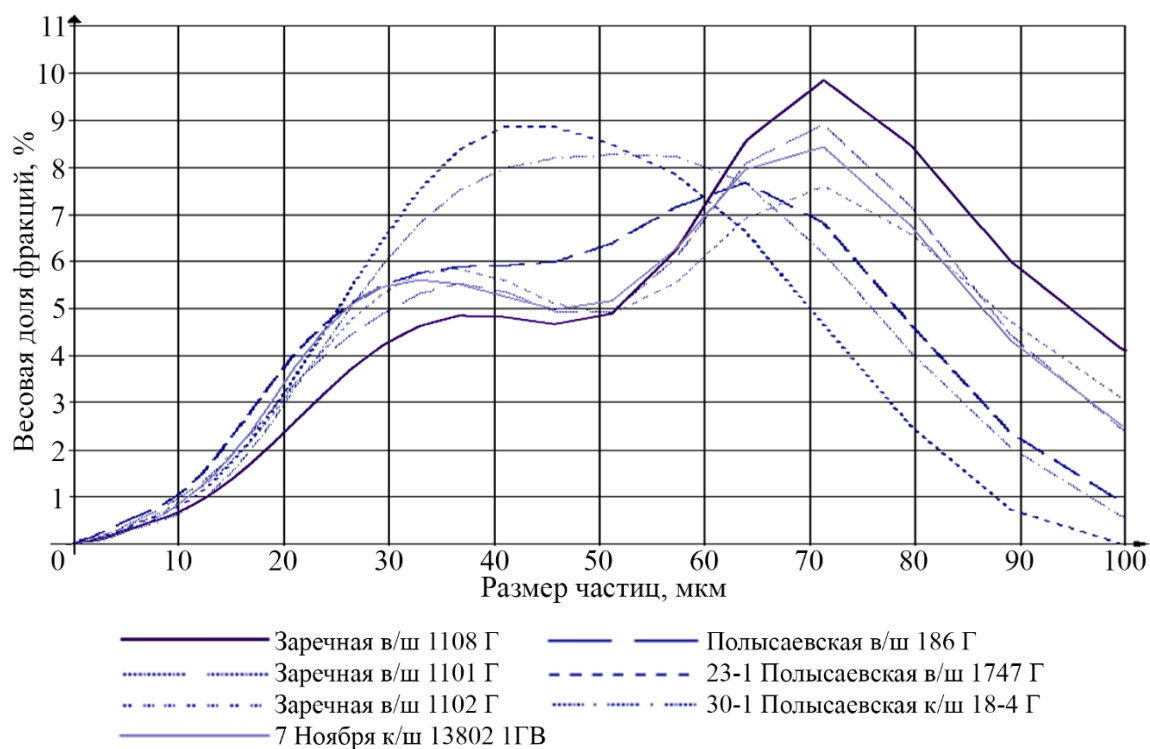


Рисунок 2.20 – Распределение дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Г методом толчения на ПОК.

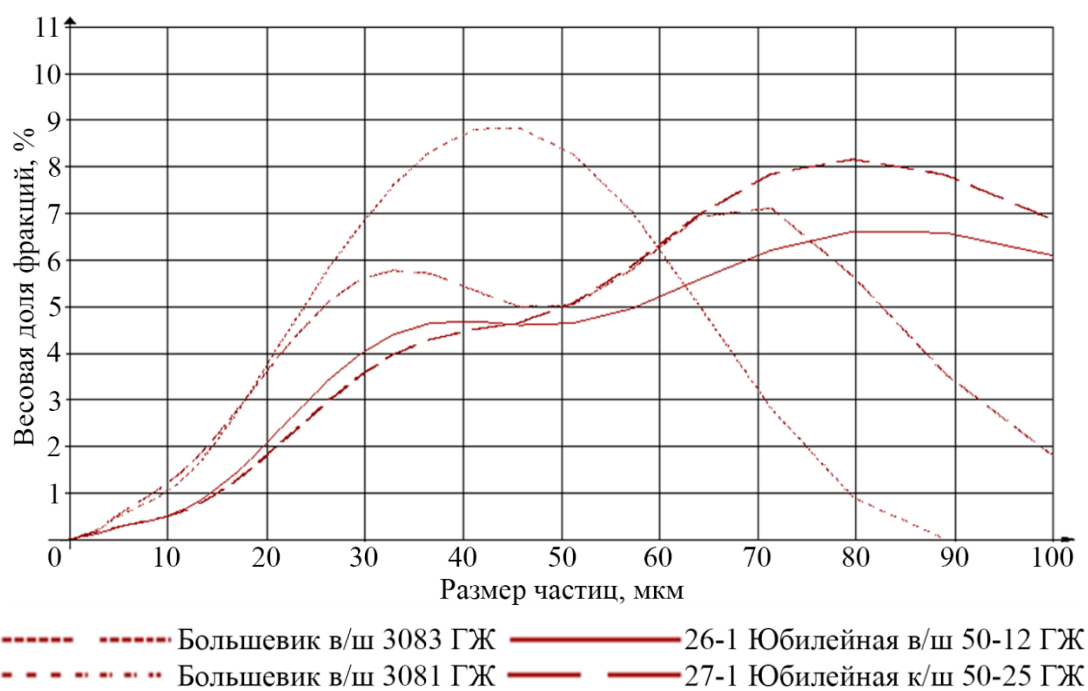


Рисунок 2.21 – Распределение дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Ж методом толчения на ПОК.

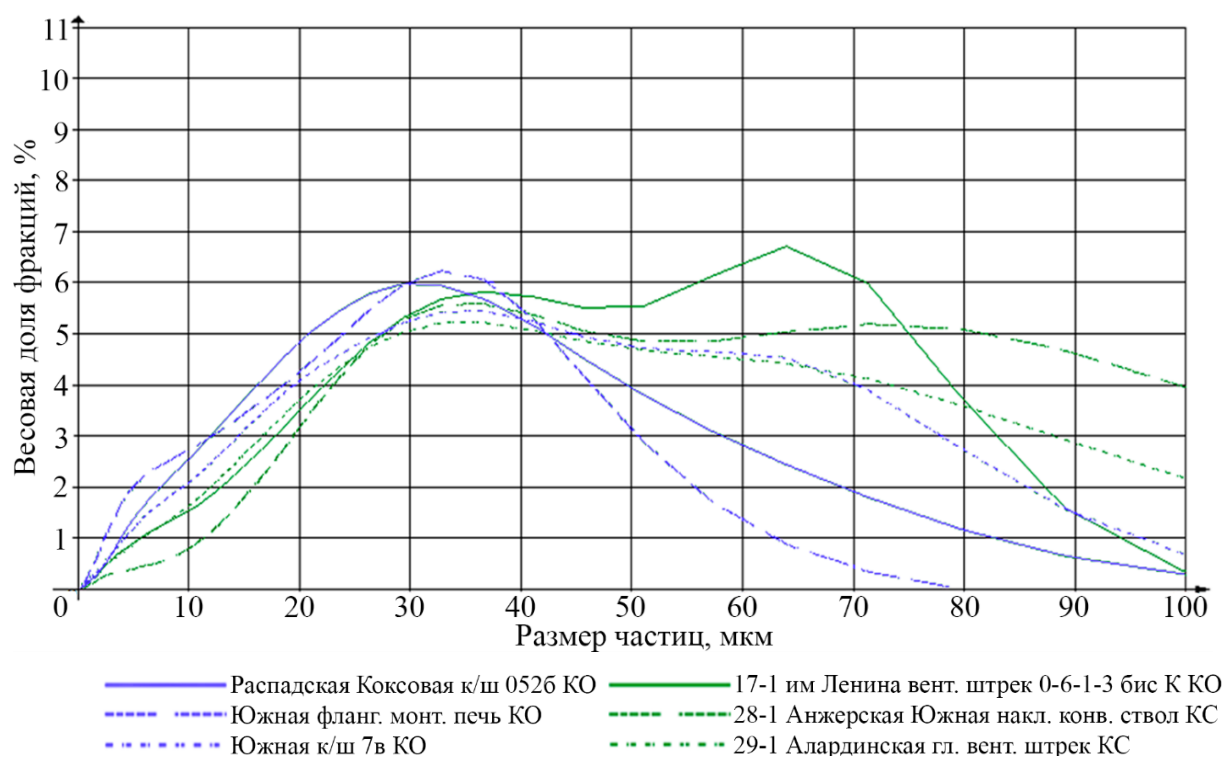


Рисунок 2.22 – Распределение дисперсного состава пыли при разрушении углей марки К методом толчения на ПОК.

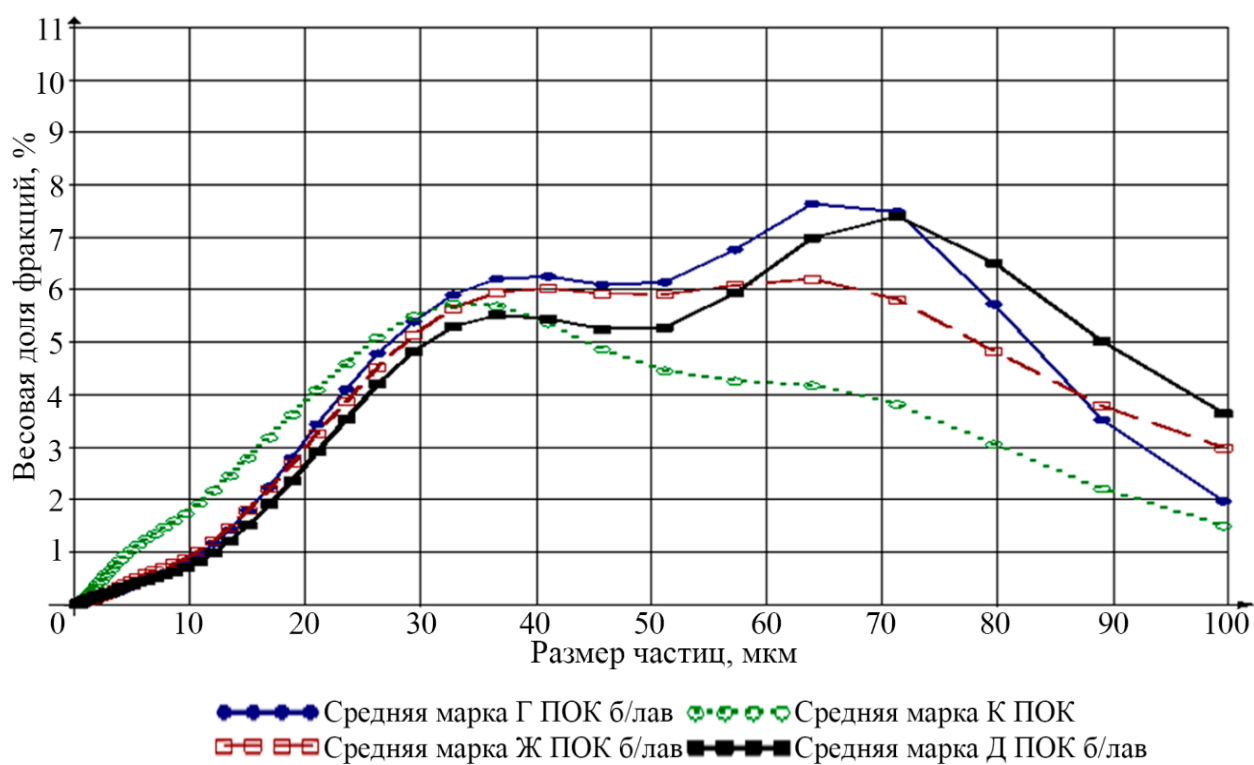


Рисунок 2.23 – Средние значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей различных марок методом толчения на ПОК.

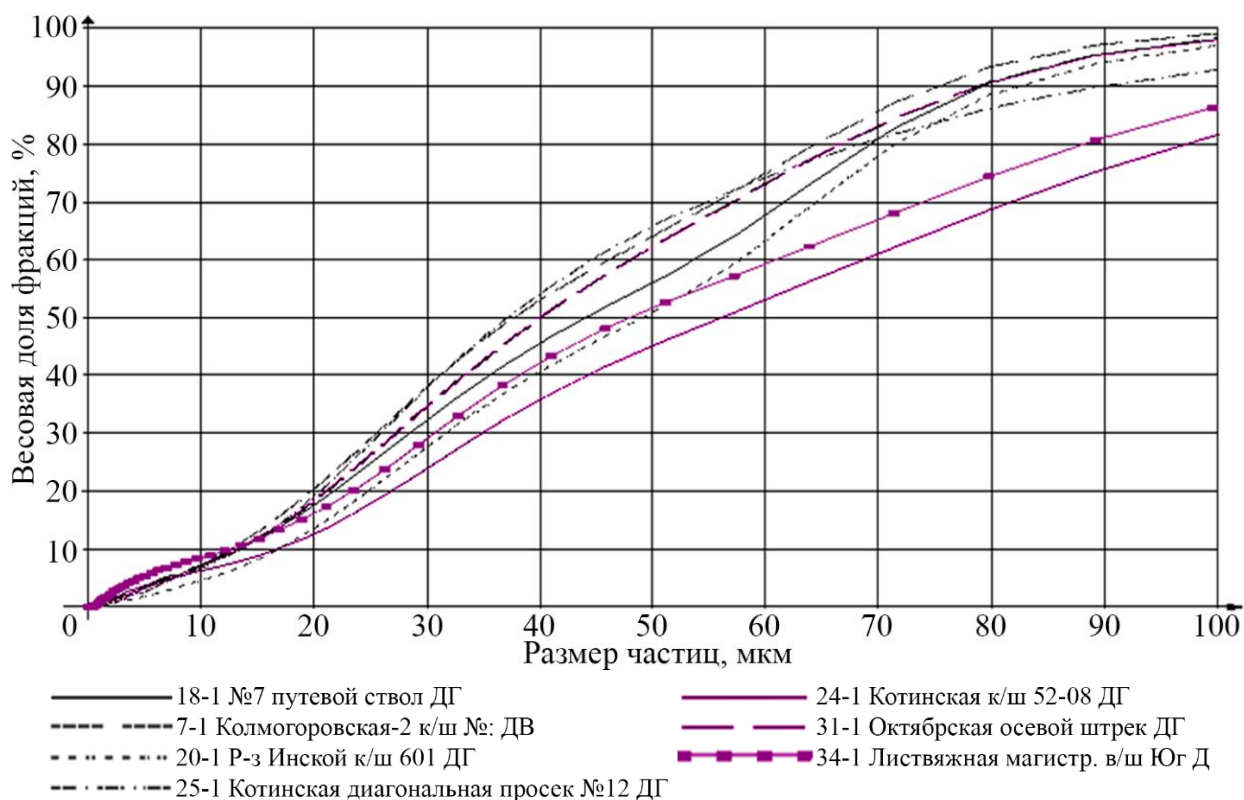


Рисунок 2.24 – Суммарные значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Д методом толчения на ПОК.

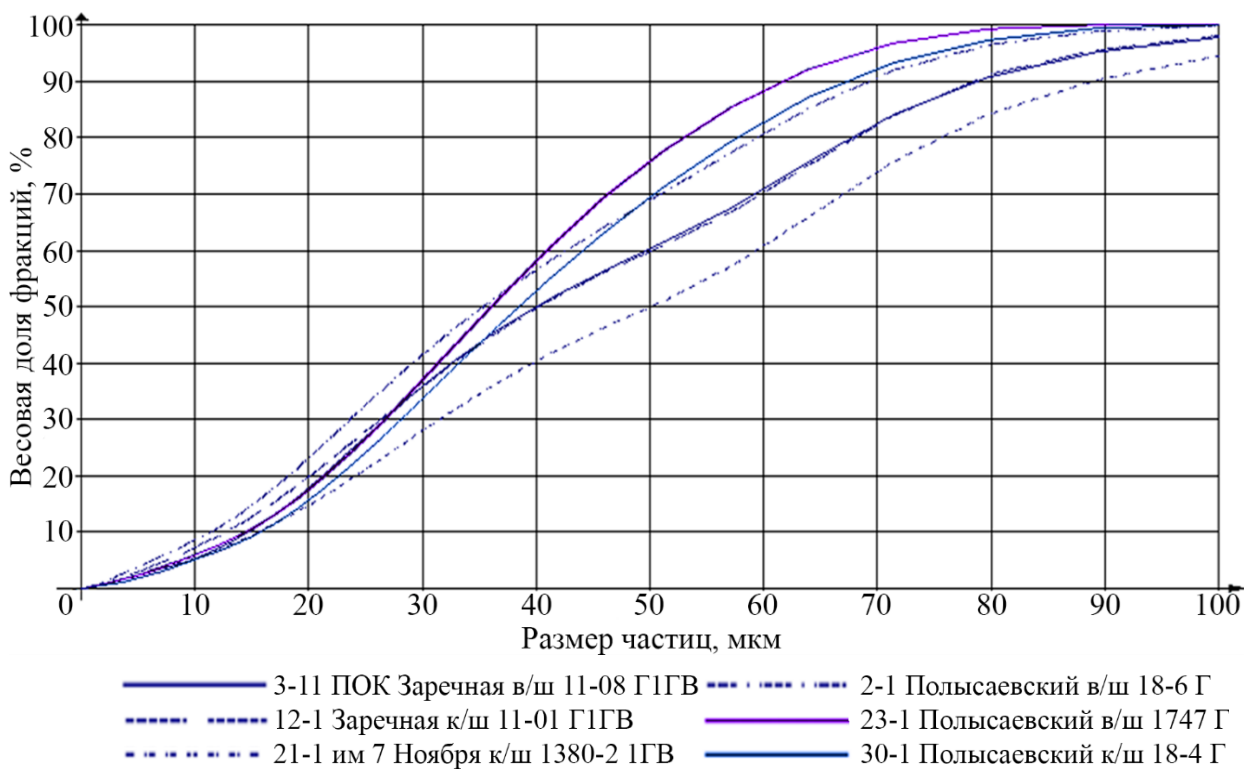


Рисунок 2.25 – Суммарные значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Г методом толчения на ПОК.

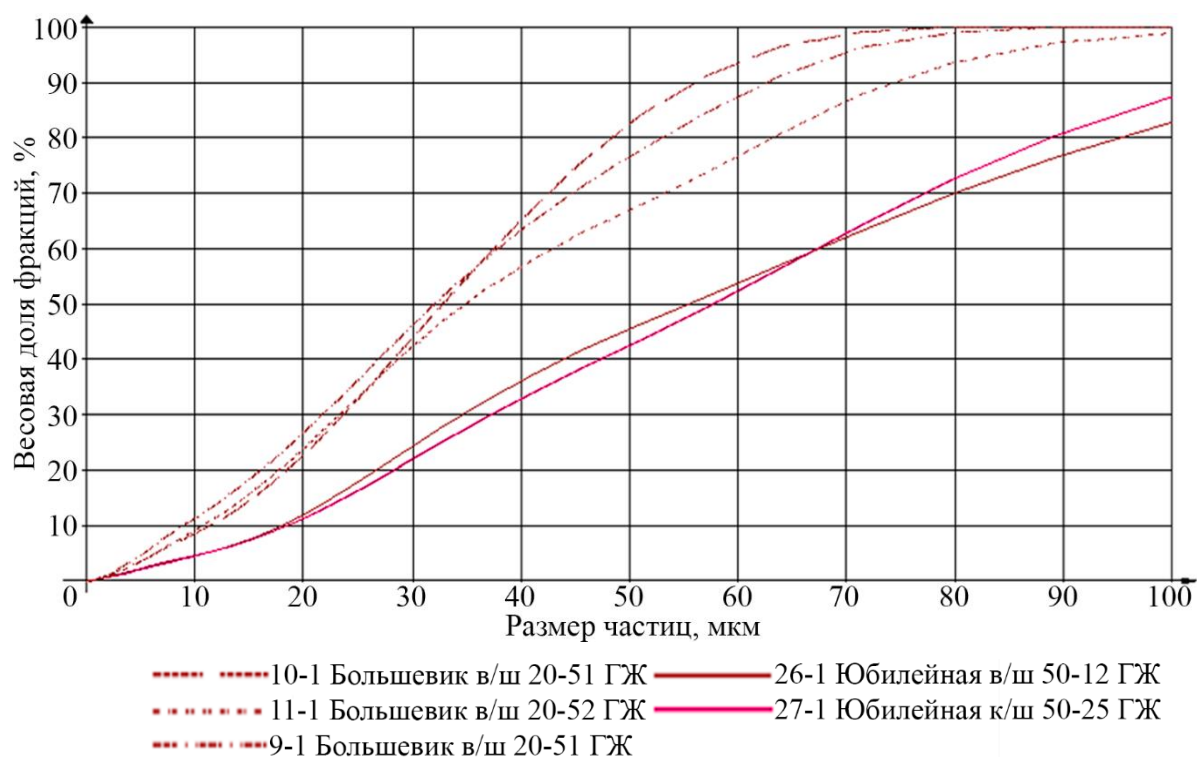


Рисунок 2.26 – Суммарные значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей марки Ж методом толчения на ПОК.

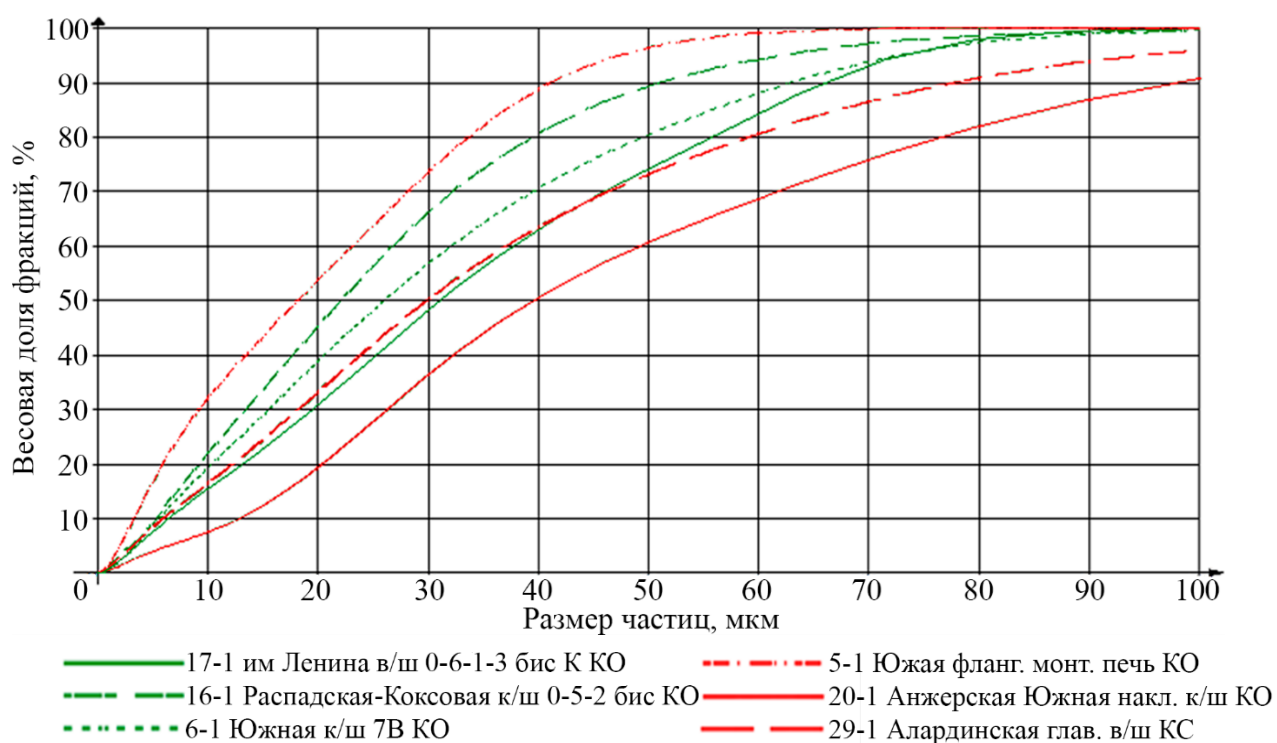


Рисунок 2.27 – Суммарные значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей марки К методом толчения на ПОК.

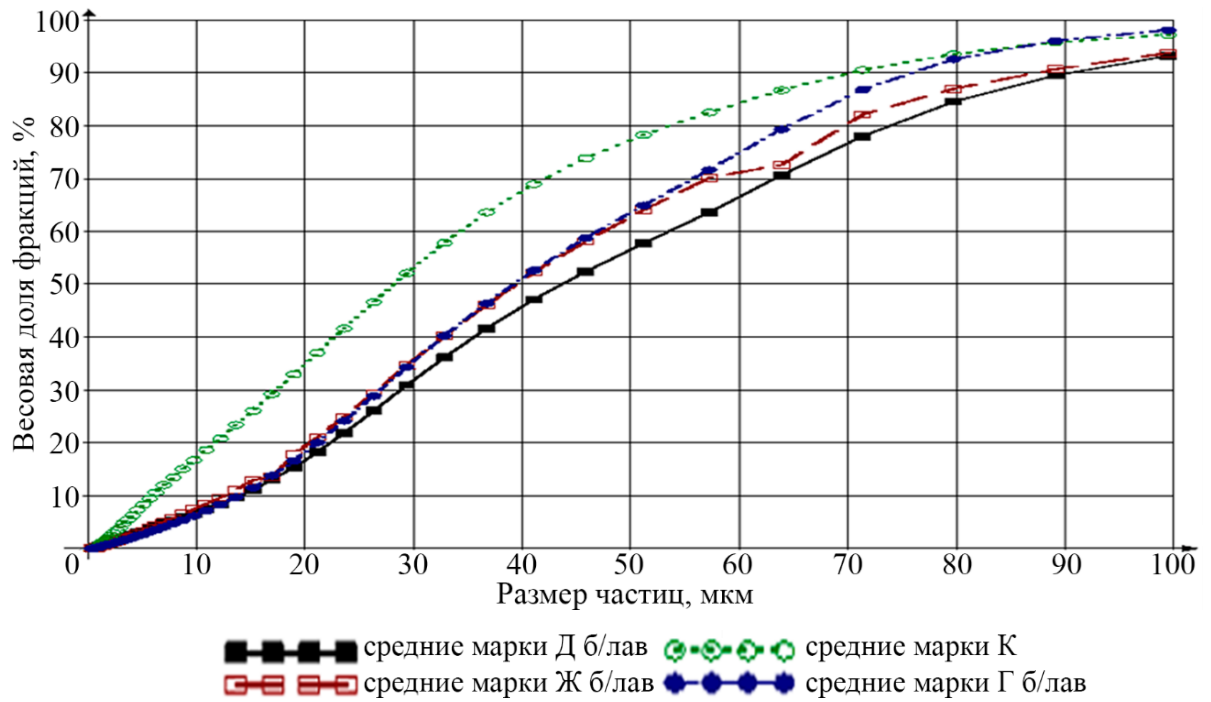


Рисунок 2.28 – Суммарные средние значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении углей различных марок методом толчения на ПОК.

Результаты исследований позволили уточнить методику отбора проб отложившейся угольной пыли для прогнозирования ее дисперсного состава. Ниже приведены результаты апробации методики прогнозирования дисперсного состава отложившейся угольной пыли.

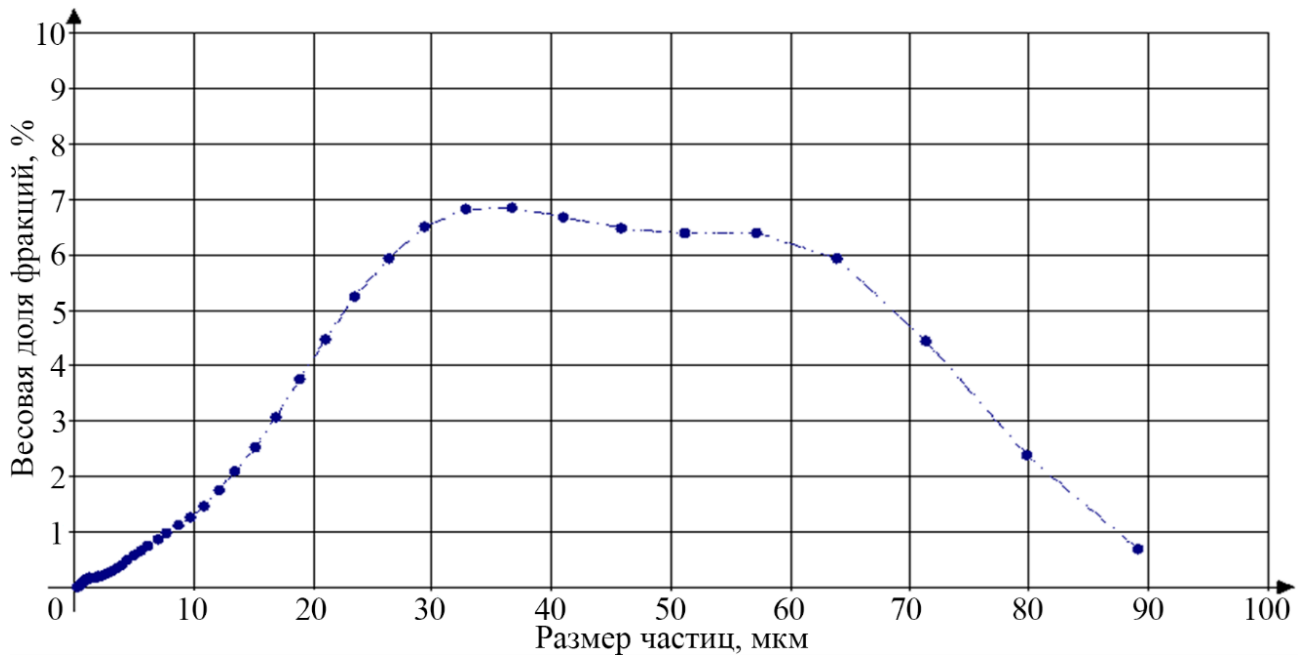


Рисунок 2.29 – Шахта Заречная, проба ПОК лава 1309 марка Г.

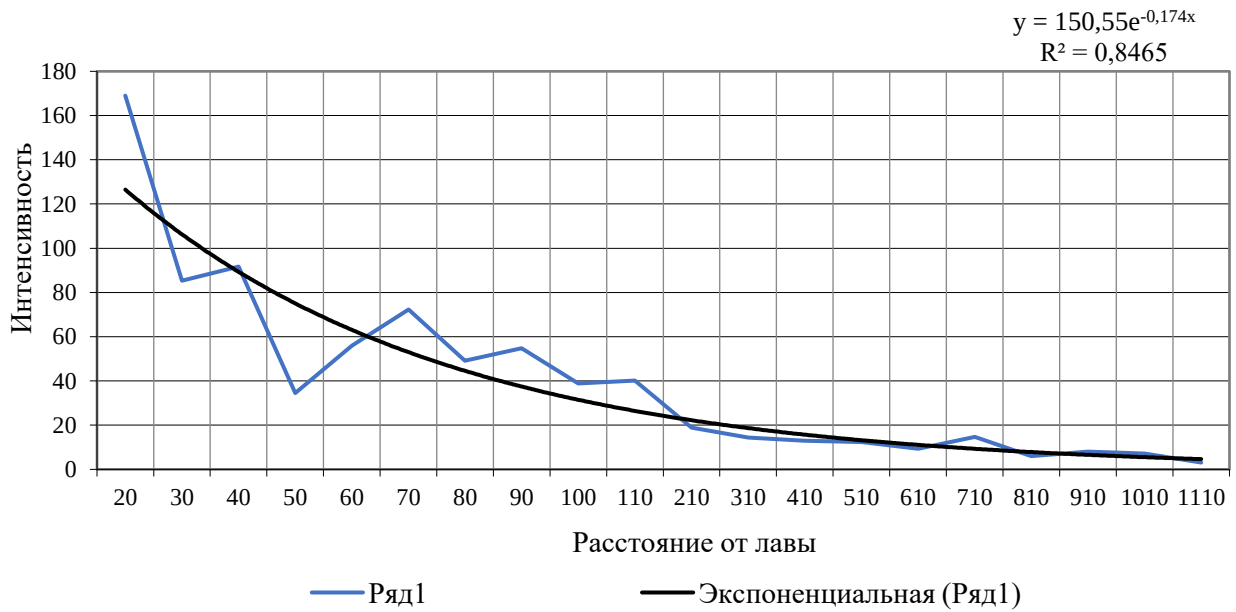


Рисунок 2.30 – Пылеотложение среднее шахта Заречная, лава 1309, марка Г, средняя добыча 7833 тыс. т/сут, среднее показание ИЗСТ 89,88 мг/м³.

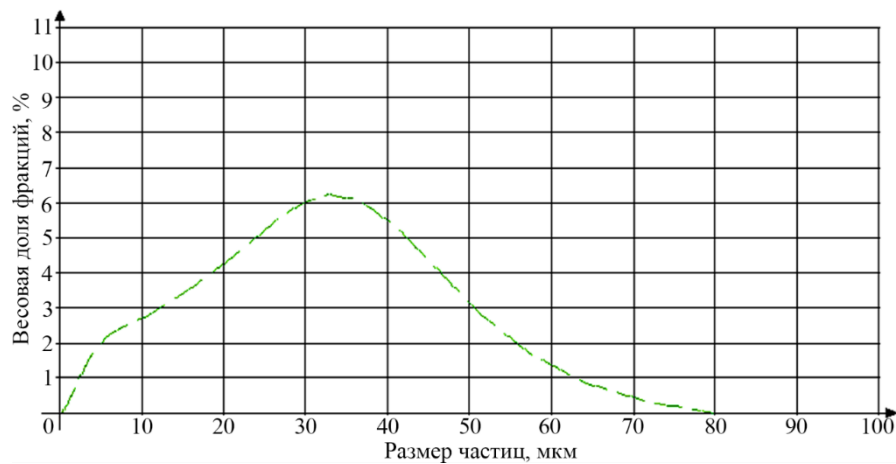


Рисунок 2.31 – Шахта Листвяжная, проба ПОК лава 1317 марка Д.

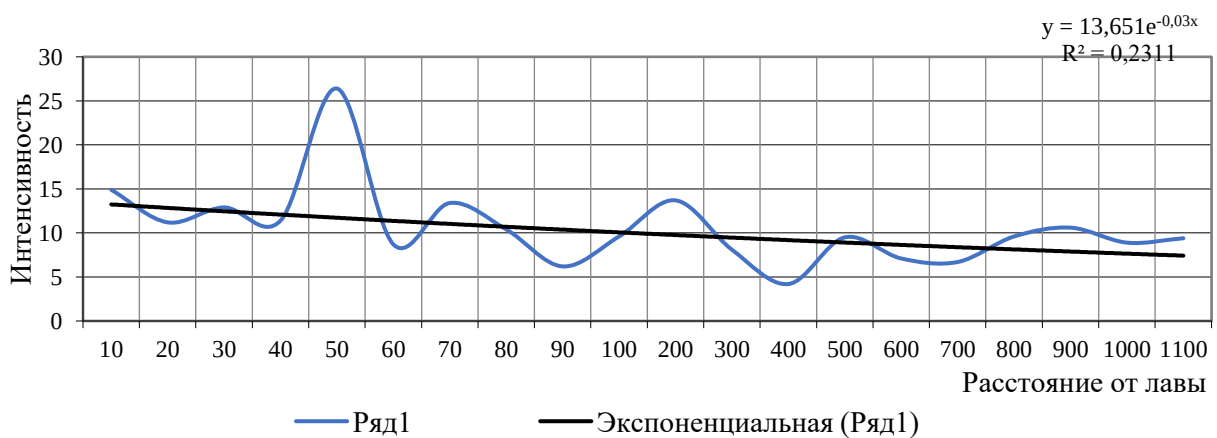


Рисунок 2.32 – Пылеотложение среднее шахта Листвяжная, марка Д, средняя добыча 7000 тыс. т/сут, среднее показание ИЗСТ 11,51 мг/м³ [1, 110].

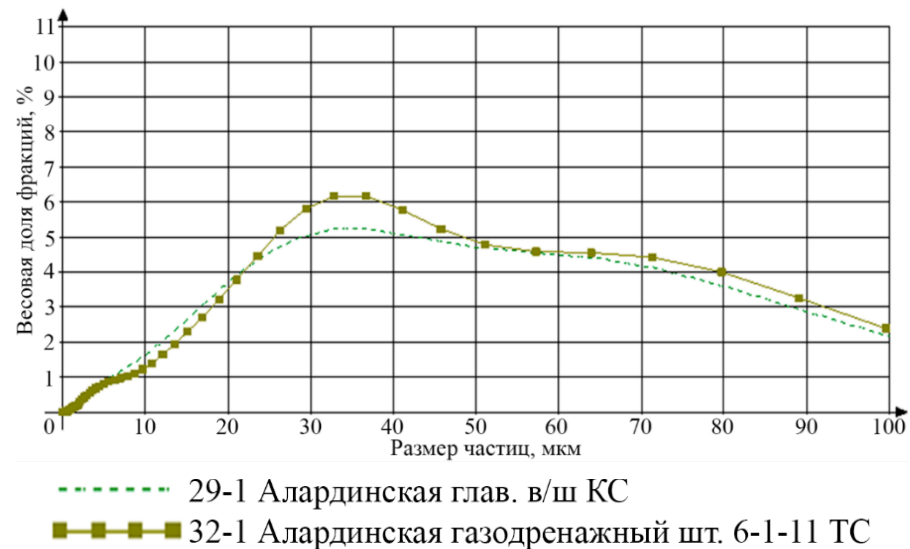


Рисунок 2.33 – Шахта Алардинская, проба ПОВ лава 3–32 марка КС.

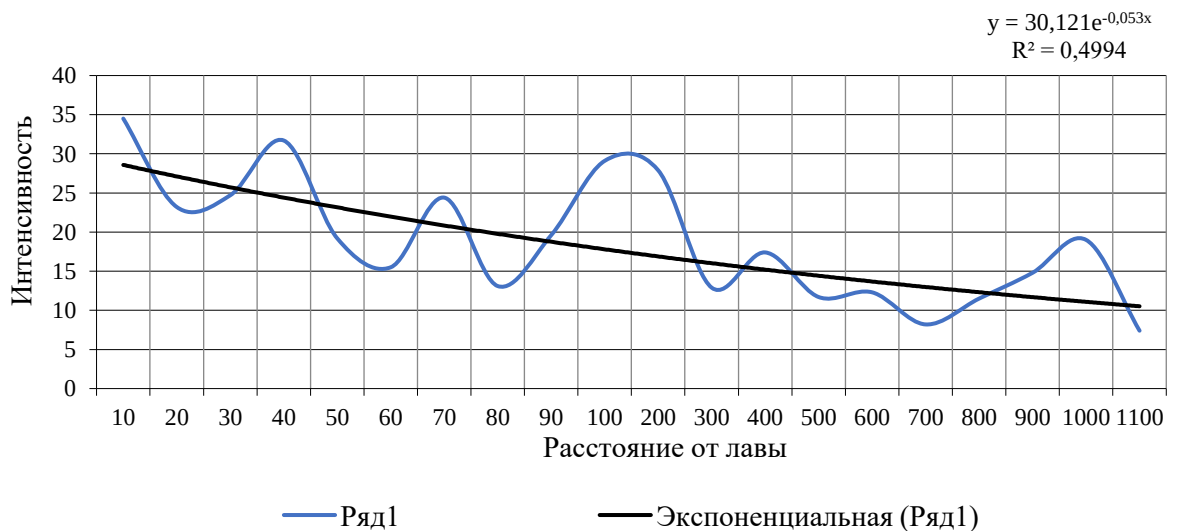


Рисунок 2.34 – Пылеотложение среднее шахта Алардинская, марка КС, средняя добыча 5500 тыс. т/сут, среднее показание ИЗСТ 13,0 мг/м³.

Таким образом, результаты дисперсного анализа продуктов разрушения угля методом толчения на ПОВ позволяют однозначно определить характер распределения пылеотложения по длине выработки на исходящей струе воздуха. При одномодальной истинной плотности распределения дисперсного состава пыли, образующейся при разрушении методом толчения, интенсивность пылеотложения от начала выработки на расстояние до 1 километра уменьшается в 3–5 раз, при бимодальной – в 5–20 раз.

2.7. Выводы

В результате проведенных исследований дисперсного состава пыли углей различного марочного состава и обоснования метода прогноза характера пылеотложения по сети горных выработок была решена задача исследования закономерностей образования пылевых отложений в горных выработках в зависимости от дисперсного и марочного состава угля в непосредственной близости к источникам интенсивного пылевыведения в процессе ведения горных работ. В ходе исследований установлено следующее:

1. Разработана методика отбора проб отложившейся угольной пыли по сети горных выработок угольных шахт, а также методика проведения лабораторных исследований дисперсного состава угольной пыли, образующейся при разрушении углей различного марочного состава.

2. В соответствии с разработанной методикой было отобрано более 200 проб отложившейся угольной пыли на исходящих очистных и подготовительных забоев, а также пластовые пробы и пробы разрушенного угля из-под комбайна в каждом обследуемом забое. После предварительной обработки и маркировки проводился анализ дисперсного состава проб. Результаты анализа были обработаны статистическими и графоаналитическими методами и сгруппированы по маркам углей с различными взрывчатыми свойствами угольной пыли.

3. Определена плотность распределения пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна, а также в 50, 300 и 500 метрах от забоя, установлены средние значения плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля.

4. Анализ значений плотности распределения дисперсного состава угольной пыли для различных марок угля в пробах, отобранных из-под комбайна, а также 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 высокометаморфизированным углям с 37 мкм до 29 мкм, т. е. в среднем на 25 %.

5. Плотность распределения пылевых фракций при разрушении угля зависит от марочного состава и с ростом степени метаморфизма угля сдвигается на 20–25 % в сторону увеличения выхода мелких фракций пыли для углей марок К и Ж.

6. Установлен характер распределения дисперсного состава пыли при разрушении методом толчения на ПОК для углей различных марок. Показано, что суммарные значения распределения дисперсного состава пыли при разрушении методом толчения на ПОК и их средние значения имеют существенные отличия (на 15–30 %) для углей различных марок.

7. Результаты дисперсного анализа продуктов разрушения угля методом толчения на ПОК позволяют однозначно определить характер распределения пылеотложения по длине выработки на исходящей струе воздуха. При одномодальной истинной плотности распределения дисперсного состава пыли, образующейся при разрушении методом толчения, интенсивность пылеотложения по длине выработки на расстояние до 1 километра уменьшается в 3–5 раз, при бимодальной – в 5–20 раз.

8. Степень метаморфизма и марочный состав угля определяют дисперсный состав и плотность распределения фракций пыли в пылевоздушной смеси горных выработок угольных шахт, образующейся в процессе разрушения угольного массива.

3. ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ШАХТНОГО ВОЗДУХА

3.1 Обоснование методики контроля аэродинамических процессов шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений в горных выработках

В настоящее время методы определения концентрации аэрозоля 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 [32], а к бесконтактным методам можно отнести оптические и частично трибоэлектрические [1].

В основном, в настоящее время при низких скоростях потока используются контактные методы, как хорошо себя зарекомендовавшие. В то же время у данных методов есть серьезные ограничения на скорость потока воздуха, которые возникают из-за трудностей по организации и обеспечению представительности проб при отборе из скоростного потока. С другой стороны, контактные методы невозможно использовать при изучении динамически меняющихся потоков с различным концентрациями пылевого аэрозоля, что связано с внесением возмущения в поток-носитель аэрозоля, вызывающее сепарацию аэрозоля, а также невозможности проводить измерения концентрации пыли и дисперсного состава в режиме реального времени. Все контактные методы имеют время накопления пробы для последующего анализа.

Оптический метод измерения дисперсного состава и концентрации аэрозоля лишен вышеперечисленных недостатков контактных методов: не вносит возмущений в поток газа, в общем случае не воздействует на частицы, находящиеся в потоке, скорость измерения позволяет проводить измерения в режиме реального времени.

Приведем основные параметры, характеризующие аэрозольное облако, не связанные с концентрацией частиц. В случае рассмотрения моодисперсных аэрозолей основным параметром, характеризующим аэрозоль, будет размер частиц, составляющих это облако. При этом частицы рассматриваются как сферы, и параметр – радиус частицы. Однако, в реальных условиях моодисперсные

аэрозоли не существуют, а в воздухе находятся полидисперсные составы, состоящие как из сферических капель, полученных распылом жидкостей через форсунки, так и твердых частиц, полученных при разрушении различных природных объектов. Рассмотрим закономерность распределения частиц в полидисперсных системах.

Определим функцию распределения частиц для полидисперсной системы от размера частицы.

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (3.1)$$

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

Также определим порядки момента через следующую формулу:

$$x_{mn} = \left[\frac{\int_0^{\infty} x^m f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^n f(x) dx} \right]^{\frac{1}{m-n}} \quad (3.2)$$

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, нормальное распределение, логнормальное распределение (рисунок 3.1).

Запишем обобщённые формулы этих распределений.

Гамма-распределение:

$$f(x) = ax^{\alpha} e^{-bx^{\beta}} \quad (3.3)$$

где, $a > 0$ – нормирующий множитель;

α, β, b – параметры распределения, при условии $\alpha > 1, b > 0$, $\text{знак}(\alpha) = \text{знак}(\beta)$

Нормальное распределение:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

где, μ – математическое ожидание,

σ^2 – дисперсия

Логнормальное распределение:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \ln \sigma_s} e^{\left(-\frac{(\ln x - \ln x_s)^2}{2(\ln \sigma_s)^2} \right)} \quad (3.5)$$

где $\ln \sigma_s$ – математическое ожидание логарифма размеров частиц;

$(\ln \{\sigma_s\}^2)$ – среднеквадратичное отклонение логарифма размеров.

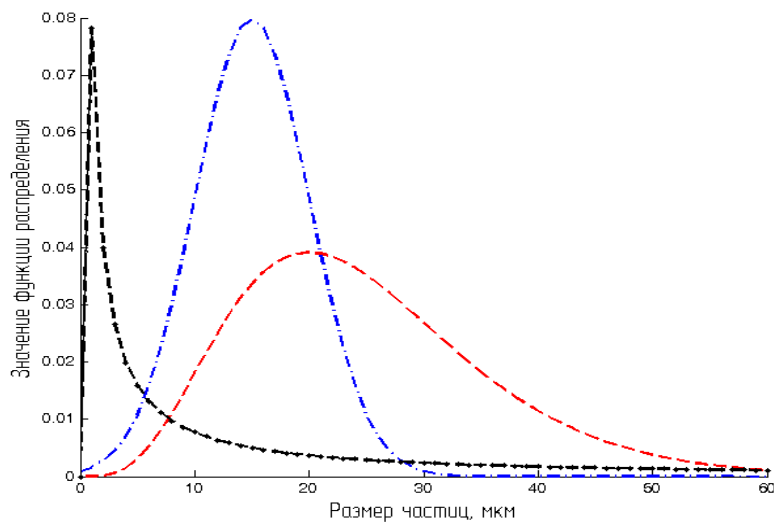


Рисунок 3.1 – Функции распределения – Гамма, нормальное, логнормальное.

Оптика аэрозолей подробно описана в исследованиях [115-120]. Приведем основные понятия и определения, связанные с оптическими методами измерения размеров частиц.

Частица, находящаяся в поле электромагнитного излучения, взаимодействует с ним и переизлучает попадающее на неё излучения в иных направлениях, чем первоначальное поле (рисунок 3.2.).

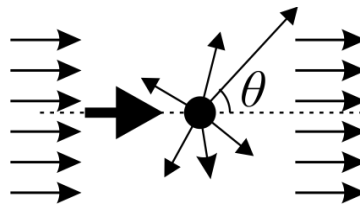


Рисунок 3.2 – Рассеяние зондирующего пучка частицей.

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:

$$Z_{\text{ослабления}} = Z_{\text{рассеяния}} + Z_{\text{поглощения}} \quad (3.6)$$

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

$Z_{\text{поглощения}}$ – доля излучения, поглощённого из пучка.

Перепишем оценку взаимодействия частиц с излучением через коэффициенты, связав площадь поверхности частиц с попадающим либо рассеиваемым излучением:

$$K_X = \frac{\pi D^2}{4} Z_X \quad (3.7)$$

где Z_X – соответствующая оценка излучения из (3.6),

D – приведенный диаметр частицы.

Определим индикатрису рассеяния как функцию 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 её значений (интеграл) по углу рассеяния равен единице.

Количественные характеристики для идеальных частиц, то есть однородных и сферической формы, определяются двумя параметрами – показателем преломления материала, составляющего частицу, и безразмерным параметром дифракции α ;

$$m = n - in', \quad (3.8)$$

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

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (3.9)$$

где 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 [115]. Также теория Релея имеет еще существенные ограничения для применения при измерениях реальных пылевых аэрозолей, так как теория Релея 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, используют теорию рассеяния Ми, которая показывает трансформацию индикатрис рассеяния при возрастании размеров рассеивателей [3]. Теория Ми основана на разложении уравнений переизлучения электромагнитной волны (3.8). Также в теории Ми индикатрисы теряют свою симметричность – рассеяние вперед может быть значительно больше, чем рассеивание назад, и индикатриса рассеяния становятся многолепестковой. Кроме этого, снижается частотная зависимость интенсивности рассеяния по отношению к закону Рэлея.

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.

Первоначально будем рассматривать монодисперсную среду с равномерным заполнением частичками диаметром D и количеством частиц C_n в которой распространяется параллельный зондирующий пучок с длиной волны λ , проходящий через слой аэрозоля толщиной l . Для описания ослабления данного пучка обратимся к закону Бугера [115]:

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (3.10)$$

где $I(l)$ – интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной l ;
 k_λ – спектральный показатель ослабления, зависящий от длины волны зондирующего пучка;

I_0 – начальная интенсивность светового пучка.

Распишем спектральный показатель преломления и свяжем его с количеством и размером частиц:

$$k_{\lambda} = \frac{\pi D^2}{4} C_n Q(\alpha, m) \quad (3.11)$$

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 автор работы оставляет предположение, что частицы имеют сферическую форму, и рассеяние света на частицах происходит независимо друг от друга. Также мы будем рассматривать слой аэрозоля как достаточно тонкий, чтобы исключить влияние рассеивания второго и более высоких порядков.

Перейдем от счетной концентрации к массовой, используя (3.2):

$$C_m = C_n \frac{\pi \rho_k C_n^2}{6} \int_0^{\infty} D^3 f(D) dD, \quad (3.12)$$

и запишем формулу спектрального показателя ослабления полидисперсной системы для массовой концентрации:

$$k_{\lambda} = \frac{\pi C_m \int_0^{\infty} Q(\alpha, m) D^2 f(D) dD}{2 \rho_k \int_0^{\infty} D^3 f(D) dD}, \quad (3.13)$$

где ρ_k – плотность частиц.

Получая этот показатель, определяем дисперсность пылевых частиц в атмосфере шахты. Показатели дисперсного состава пыли и ее влажность являются существенными, т. к. оказывают влияние на интенсивность пылеотложений.

3.2. Разработка многофункциональной системы непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и пылеотложений в горных выработках

Проведенные теоретические исследования позволили разработать метод 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 пылевыведения.

Метод определения интенсивности пылеотложения включает определение запыленности, дисперсный состав пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха. При этом уровень запыленности и дисперсный состав пыли определяют с использованием оптического метода малых углов рассеяния с учетом влажности окружающего воздуха и скорости воздуха с оценкой распространения пыли по длине выработки. Для реализации данного метода предлагается датчик контроля интенсивности пылеотложения, который включает в себя блок питания, блок обработки и передачи информации, а также линию передачи данных на дисплей. Датчик дополнительно оснащен модулем оптического излучения и приемниками оптического излучения, расположенными под различными углами к источнику излучения. Эти приемники передают информацию на модуль измерения дисперсного состава пыли, а также на модули измерения скорости воздушного потока, влажности, температуры и атмосферного давления. Все данные поступают в блок обработки и передачи информации (искусственный интеллект), где осуществляется логическая корреляция всех сигналов с данными, полученными от модуля измерения дисперсного состава пыли.

Еще одним отличием является то, что приемников оптического излучения более четырех. Принцип действия датчика измерения концентрации пыли в воздухе заключается в измерении интенсивности рассеянного света. Для реализации этого принципа датчик конструктивно выполнен в виде пространственного мультипликативного инфракрасного излучателя с длиной волны 940 нм с приемником, в качестве которого служит полупроводниковый элемент со встроенным усилителем. Регистрируемый диапазон размеров частиц составляет от 0,1 до 100 мкм, а изменения концентрации пыли от 0 до 2000 мг/м³, при этом точность измерения в диапазоне 0–100 мг/м³ составляет 2,3–2,5 %.

Широта спектра регистрации размеров частиц и их концентрации в воздухе достигается посредством точного выбора углов наклона блока излучателя и реализации последовательного их автоматического включения (или отключения) с помощью специального электронного блока. Датчик может осуществлять как измерение среднего значения концентрации пыли в интервале времени от 5 с до 12 часов, так и вывод динамики максимально разовых концентраций в режиме реального времени. Данные с приемника излучения преобразуются встроенным микропроцессором (искусственный интеллект) и передаются по коммуникационной сети на компьютер или адаптированную систему сбора информации [70].

Принципиальная схема предлагаемого прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложения представлена на рисунке 3.3, где показана схема передачи и обработки сигналов.

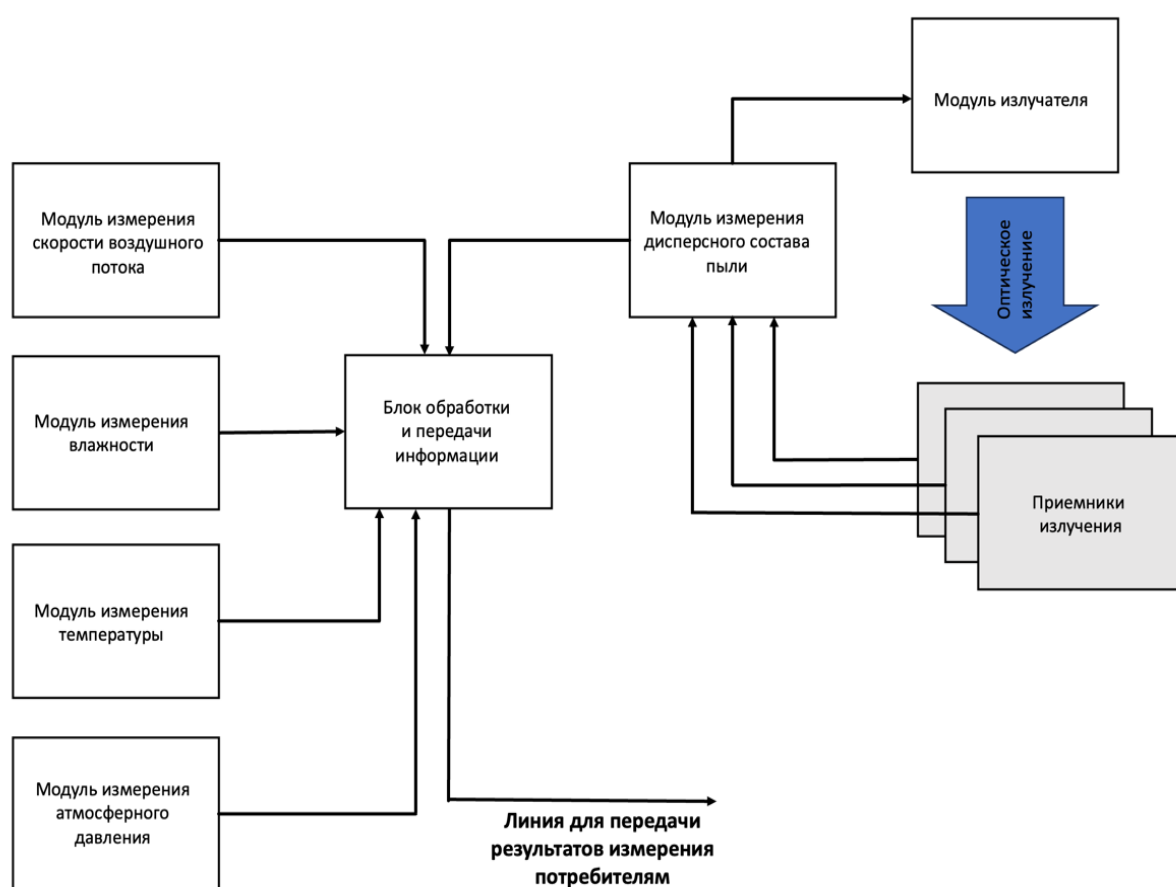


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема предлагаемого прибора непрерывного автоматического контроля интенсивности пылеотложения с применением искусственного интеллекта [121, 122].

Оптические датчики реагируют на непрозрачные и полупрозрачные предметы, водяной пар, дым, аэрозоли. Предмет, попавший в активную зону оптического датчика, вносит изменения в прохождение луча. В данном случае это пылевые частицы разного размера. В основе работы датчика применен принцип использования оптического метода малых углов рассеяния для определения дисперсности пыли. Изменение фиксируется приёмниками, расположенными под разными углами к лучу. Появившийся после обработки сигнал подаётся на модуль расчета дисперсного состава пыли, где происходит обработка, преобразование сигналов из аналогового в цифровой и сравнение сигналов, затем определяется гранулометрический состав пыли. Далее данные поступают на блок обработки и передачи информации, где информация анализируется во взаимосвязи с поступившей информацией с модулей скорости воздушного потока, измерения влажности, температуры и атмосферного давления. В зависимости от гранулометрического состава атмосферы, скорости воздушного потока и влажности воздуха определяется характер распределения пылеотложения.

Модуль оптического излучения и приемники оптического излучения в конструкции датчика контроля интенсивности пылеотложения расположены под разными углами к источнику излучения. Для измерения интенсивности пылеотложения в устройстве можно использовать, например, оптический датчик Malvern Isitec.

Модуль измерения скорости воздушного потока основан на принципе действия ультразвукового анемометра, который предназначен для измерения скорости и направления движения воздуха. В конструкции устройства могут использоваться различные модели ультразвуковых анемометров, например серии Windsonic 1405-PK-300.

Модули измерения влажности и температуры оснащены специализированными датчиками, предназначенными для точного определения уровня влажности и температуры окружающей среды. Модуль для измерения влажности представляет собой устройство, способное измерить относительную влажность воздуха, т. е. количество водяного пара, присутствующего в атмосфере

при определенной температуре. Для контроля интенсивности накопления пыли в конструкции прибора могут применяться датчики влажности отечественного или импортного производства, таких как Maico и Elicent Elegance.

Модуль измерения атмосферного давления содержит датчик давления, например, это может быть тензометрический датчик давления Bosch BM180.

Сигналы с датчиков обрабатываются и передаются на дисплей блоком обработки и передачи информации, где одновременно с информацией о характере пылеотложения показана информация о дисперсности пыли. В блоке обработки и передачи информации (искусственный интеллект) производится математическая обработка сигналов (с использованием формулы способа определения интенсивности пылеотложения), а на дисплей информация выводится как в цифровом виде, так и графическом, что усиливает наглядность подаваемой информации. Анализ дисперсного состояния пыли с учетом скорости движения воздуха и его влажности позволит оперативно и наиболее точно определить показатель интенсивности пылеотложения [3]. Применение предложенной многоуровневой сложной конструкции прибора контроля интенсивности пылеотложения обеспечивает оперативное и своевременное выполнение мероприятий по обеспыливанию атмосферы шахты.

Техническим результатом является повышение точности контроля состояния пылевзрывобезопасности атмосферы за счет использования оптического метода малых углов рассеяния для определения дисперсности пыли и увеличения количества показателей, характеризующих состояние атмосферы, и применение для обработки данных искусственного интеллекта.

В методе автоматического контроля запыленности шахтной атмосферы и интенсивности пылеотложений на основе оптического метода малых углов рассеяния уровень запыленности и дисперсный состав пыли определяют с учетом влажности окружающего воздуха и скорости воздуха с оценкой распространения пыли по длине выработки, а интенсивность пылеотложения определяют по формуле 2.22 [123]:

$$P_t = 86,4 \frac{f(r) v l^{-b}}{S(W+W_B)} \text{ г/м}^3 \text{ сут.}$$

Одной из важнейших характеристик запыленного воздуха (воздушной среды) является дисперсный состав входящих в нее частиц.

Функция распределения частиц по размеру определяется по формуле:

$$f(r) = \frac{dn}{n dr}, \quad (3.13)$$

где n – полное число частиц;

dn – число частиц, радиус которых лежит в интервале от r до $(r+dr)$.

Влажность воздуха влияет на летучие свойства угольной пыли. Чем влажнее воздух, тем частицы пыли становятся тяжелее, следовательно, путь их распространения по выработке становится короче.

Скорость движения воздуха влияет на дальность полета пылевых частиц, следовательно, учитывая этот показатель, можно определить планируемую территорию запыленности.

При этом учитывая все указанные выше показатели и используя математические электронно-вычислительные методы (искусственный интеллект), можно точно дать оценку состояния шахтной атмосферы, интенсивности пылеотложения и оценить пылевзрывобезопасность в шахте.

Согласно теории рассеяния определяется функция $\varphi(x)$, где x – заданная геометрическая или оптическая характеристика. При этом $\varphi(x)$ и $f(r)$ связаны между собой соотношением:

$$\varphi(x) = \int F(xr) f(r) dr, \quad (3.14)$$

где $F(xr)$ – величина, известная из теории рассеяния света на отдельной частице.

Решая известное равенство, которое является интегральным уравнением первого рода, мы получаем значение функции. Используя известный метод, мы получаем информацию о дисперсном составе частиц, на которых происходит рассеяние.

Шахтная атмосфера содержит частицы разного размера, таким образом, пучок света проходит через слой различных по размеру частиц с функцией распределения $f(r)$.

При этом мы определяем индикатрису рассеяния по соотношению:

$$I(\beta) = \frac{I_0}{\beta^2} \int_0^\infty f(r) r^2 J_1(\rho\beta) dr \quad (3.15)$$

Далее определяется функция распределения частиц по размерам:

$$f(r) = -\frac{C}{r^2} \int_0^\infty F(\rho\beta) \varphi(\beta) d\beta, \quad (3.16)$$

где $F(\rho\beta) = \rho\beta J_1(\rho\beta) N_1(\rho\beta)$

$N_1(\rho\beta)$ – функция Неймана первого порядка;

C – нормировочная постоянная.

Таким образом, определяется спектр размеров частиц по экспериментально найденной индикатресе рассеянного света $I(\beta)$.

Затем определяется оптическая толщина исследуемой дисперсной среды:

$$\tau = \ln \frac{I_0}{I} \leq 0,3, \quad (3.17)$$

где τ – оптическая толщина исследуемой дисперсной среды;

I_0 – интенсивность света в отсутствие частиц;

I – интенсивность света на частицах света.

3.3. Выводы

В результате проведенных работ были решены задачи разработки методики контроля интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт в зависимости от свойств и параметров, а также факторов, оказывающих влияние на аэродинамические свойства шахтных аэрозолей; разработки алгоритма расчета интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт, в том числе в реальном времени. Полученные результаты:

1. Обосновано использование спектрального показателя ослабления электромагнитной волны для определения и контроля концентрации витающей в воздухе пыли и ее дисперсного состава.

2. Теоретически обоснован метод контроля запыленности шахтного воздуха и интенсивности пылеотложения в горных выработках.

3. Определение величины интенсивности пылеотложения от одного источника интенсивного пылевыведения до следующего следует проводить на основе измерения концентрации витающей пыли, распределения дисперсного состава витающей пыли, влажности, температуры, скорости движения воздуха в реальном времени.

4. 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.

4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ И ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КАК ПОДСИСТЕМЫ МФСБ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

4.1. Требования, предъявляемые к системе непрерывного автоматического контроля рудничной атмосферы

Пылевая обстановка на угольных шахтах влияет на жизнь и здоровье персонала и зависит от множества различных факторов: интенсивности пылевыведения, дисперсного состава пыли, направления и скорости воздушных потоков, расположения оборудования и его перемещении по территории предприятия, влажности воздуха и др. На современной шахте данные факторы могут изменяться ежечасно. Построить полную аналитическую физическую модель распределения воздушно-пылевых потоков в каждый момент времени при постоянно изменяющихся внешних условиях крайне сложно.

Правилами безопасности в угольных шахтах установлены требования к МФСБ, включая систему контроля запыленности и пылеотложений [4].

Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт», утвержденными приказом Ростехнадзора от 8.12. 2020 г. № 506, зарегистрированными Минюстом России 29.12.2020 г. Рег. № 61918 установлены требования безопасности к датчикам пыли. Датчики пыли должны обеспечивать автоматическое непрерывное измерение концентрации пыли в рудничной атмосфере и (или) отложения пыли, телеизмерение, телесигнализацию при превышении пороговых значений концентраций отложений пыли и при отказе датчиков пыли, а также местную световую и (или) звуковую сигнализацию. В целях осуществления дистанционного мониторинга (контроля) параметров пороговых значений концентраций пыли в рудничной атмосфере и (или) отложений пыли в соответствии с проектными решениями автоматически должны передаваться в режиме реального времени по каналам связи в угледобывающую организацию. Угледобывающая организация должна обеспечить учет, анализ и оценку превышений пороговых значений концентраций пыли в рудничной атмосфере и

(или) отложений пыли и передачу обработанной информации о пылевзрывоопасном состоянии горных выработок и срабатывании систем противоаварийной защиты на шахте по каналам связи в территориальный орган Ростехнадзора.

4.2. Принцип работы прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений

В целях выполнения требований нормативных документов по безопасности на основании выше представленных результатов наших исследований были проведены работы по разработке высокотехнологичной инновационной системы нового поколения с использованием искусственного интеллекта, проводящей измерения базовых физических параметров, влияющих на пылеотложение: дисперсный состав, концентрация пыли и скорость воздушного потока и пр., включающий самообучающуюся искусственную нейронную сеть, которая, автоматически оценив все доминантные параметры окружающей внешней среды и динамики полидисперсной системы, позволяет с минимальной погрешностью определить физический принцип определения основного измеряемого показателя – интенсивности пылеотложений и обучить нейросеть для правильной оценки пылеотложения при постоянно меняющихся внешних условиях.

Основной измерительный блок-системы содержит твердотельный лазер, оптическую систему зеркал и фильтров, систему стабилизации лазерного излучения, блоки фотоприёмников, отвечающих за сбор рассеянного излучения, вычислительное устройство, блок стабилизированного питания и интерфейсы для подключения к электронным весам и внешним устройствам. Принцип действия измерителя основан на регистрации рассеянного лазерного излучения для вычисления концентрации витающей пыли и оценки дисперсного состава. Данный метод измерения называется малоугловым рассеянием света [123, 124, 125]. Измеренный уровень излучения с фотоприёмников (768 штук) и фотоматрицы передается в вычислительное устройство, которое непосредственно вычисляет текущую концентрацию пыли и дисперсный состав. Далее эти данные комбинируются со скоростью воздушного потока, влажностью, а также

показаниями весов и передаются в блок, отвечающий за обучение нейросети. Для обучения нейросети в систему входит набор специализированных весов непрерывного измерения пылеотложения. Использование оригинальной конструкции весов и алгоритмов позволяет измерять только оседающую пыль и распознавать нежелательные частицы на платформе весов.

После проведения обучения нейросети, весы отключаются от системы и далее она продолжает функционировать автономно, используя для расчётов обученную нейросеть. В дальнейшем весы используются для проверки корректности работы системы и дообучения нейросети.

Использование данной системы позволяет решить проблему непрерывного автоматического измерения концентрации пыли и пылеотложения в шахте с постоянно меняющимися условиями труда и расположением оборудования. Внедрение системы улучшит безопасные условия труда, так как квалифицированные решения по пылевзрывозащите могут применяться только на основании оперативной и полной информации о состоянии пылевой обстановки. Система позволит снизить затраты собственников на проведение мероприятий по обеспыливанию и пылевзрывобезопасности, так как при её использовании данные будут применяться своевременные меры.

Использование разработанной высокотехнологичной инновационной системы, приборов нового поколения и программного комплекса для систем искусственного интеллекта позволит обеспечить в режиме онлайн получение сведений о состоянии пылевзрывобезопасности горных выработок, а также передавать командные сигналы на проведение периодических профилактических мероприятий.

Реализация результатов исследований позволит впервые внести элементы искусственного интеллекта в системы аэрогазового контроля на угольных шахтах, максимально устранить воздействие человека на показания приборов в системе, а работникам угольного предприятия на основании объективных данных приборов принимать решение о степени аварийной устойчивости предприятия, что

способствует повышению уровня промышленной безопасности и охраны труда, а также снизить уровень затрат для предприятия.

В программном комплексе искусственной нейронной сети также доступны файлы конфигурации, сообщения об ошибках и статистические данные. Цифровой блок сбора данных может получать данные от системы, используя команды последовательного протокола или записывая их автоматически в режиме онлайн.

Программные продукты системы позволяют управлять работой приборов, собирать и обрабатывать данные, моделировать и делать прогнозы по динамике запыленности, интенсивности пылеотложений, микроклиматическим параметрам. На программное обеспечение системы возложены задачи, решаемые в реальном масштабе времени, как технического, так и информационного характера.

Программа поддерживает два режима работы: одноразовый – измерения проводятся в течение заранее установленного интервала времени; многократный – начало каждого цикла измерений синхронизируется с началом очередного часа по встроенным у диспетчера часам.

Для повышения информативности данные, вводимые в вычислительный блок, отображаются в виде диаграмм на экране монитора в режиме реального времени. Для линейной аппроксимации калибровочных данных используют метод наименьших квадратов, что позволяет уменьшить влияние случайной составляющей погрешности на результаты измерений.

Все данные, необходимые для работы программы (количество и номера цифровых и аналоговых каналов, период дискретизации, продолжительность и количество сеансов измерения, калибровочные данные и т. д.), содержатся в data-файлах – это платформа данных, которая помогает получать необходимую информацию в режиме онлайн и с использованием нейросетей.

4.3. Испытания прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений в шахтных условиях

Результаты выше приведенных теоретических, лабораторных, стендовых и шахтных исследований закономерностей аэродинамических процессов реализованы в системе непрерывного автоматического контроля запыленности и

интенсивности пылеотложений (далее – прибор СКИП), схема которого представлена на рис 4.1 [3, 121, 126].

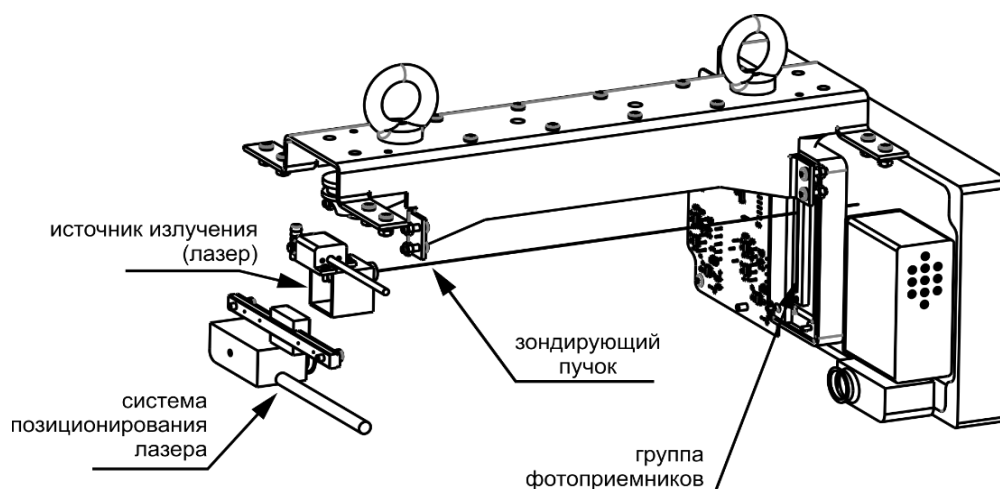


Рисунок 4.1 – Схема прибора контроля запыленности и интенсивности пылеотложений СКИП.

Шахтные испытания прибора СКИП проведены с целью апробации предложенного метода непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений в горных выработках. Измерение интенсивности пылеотложения осуществлялось через измерение массовой концентрации пыли и ее дисперсного состава. Основные метрологические характеристики прибора СКИП приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики прибора СКИП

Показатель, ед. изм.	Диапазоны измерения
Количество отложившейся пыли, г/м ³ сут.	До 150
Массовая концентрация витающей пыли, мг/м ³	0-3000
Скорость движения воздушного потока, м/с	От 0,1 до 20
Температура воздушного потока, t ⁰ C	От -40 до +40
Относительная влажность воздушного потока, %	От 20 до 90 при +20 ⁰ C
Диапазон диаметров частиц, мкм	0-150

Методика испытаний состояла в следующем. В месте проведения испытаний системы контроля интенсивности пылеотложений устанавливался прибор СКИП и пластмассовые или металлические подложки (далее по тексту подложки) в соответствии с рисунком 4.2. Прибор СКИП подключался к блоку питания для индикации показаний результатов измерения уровня запыленности воздуха в месте установки и последующей обработки с целью определения интенсивности

пылеотложения (количества отложившейся пыли) в горной выработке. Согласно схеме, первые 12 подложек размещались через каждые 10 м таким образом, чтобы их открытые поверхности не были экранированы от вентиляционной струи элементами крепи и различными предметами (рисунок 4.2). Далее размещались по две подложки через каждые 50 м на расстоянии 200 м от места установки прибора СКИП. Все подложки размещались на почве в горной выработке на расстоянии от 10 до 50 см от бортов выработки. Отбор проб угольной пыли проводился ежесуточно в течение пяти суток:

- после проведения пылевзрывозащитных мероприятий (осланцовки выработки), пронумерованные подложки без угольной пыли устанавливались на месте отбора;
- через сутки, перед очередным проведением пылевзрывозащитных мероприятий пронумерованные подложки с накопившимися частицами герметично упаковывались в отдельные соответственно пронумерованные мешки, а затем упаковывались в один мешок с этикеткой, которая содержала информацию о наименовании пробы, номере пробы, месте и дате отбора пробы.

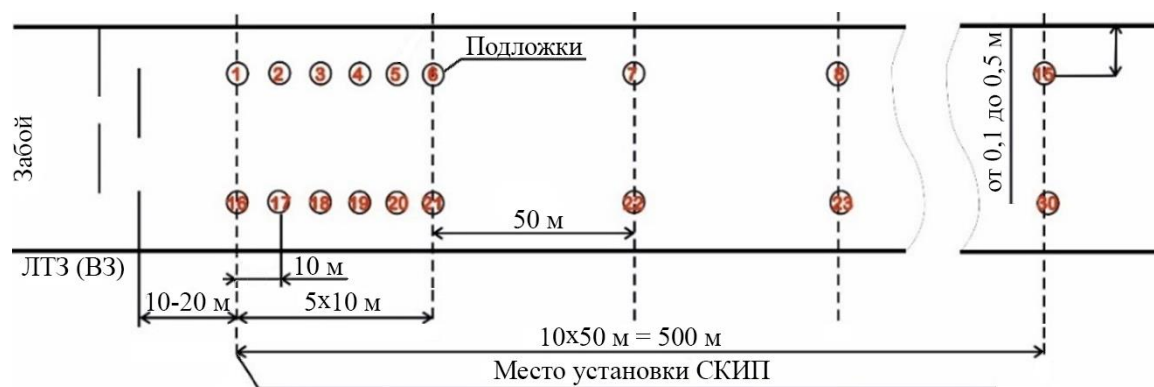


Рисунок 4.2 – Схема установки прибора СКИП и пластмассовых или металлических подложек в горной выработке.

На рисунке 4.3 представлено расположения прибора СКИП в горной выработке.

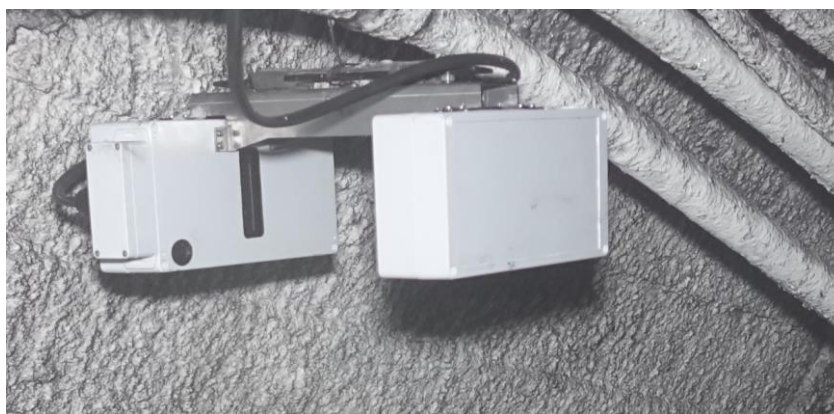


Рисунок 4.3 – Расположение прибора СКИП в горной выработке шахты.

Выполнение измерений количества отложившейся пыли включал в себя следующие процедуры:

- регистрацию параметров, необходимых для расчета интенсивности пылеотложения и расчета количества отложившейся пыли, и внесение в таблицу;
- взвешивание пронумерованных мешков с подложками. Результаты взвешиваний заносятся в таблицу;
- расчет интенсивности пылеотложения на подложке в соответствии с формулой (3.14);
- расчет интенсивности пылеотложения прибором СКИП в соответствии с формулой (3.13).

Интенсивность пылеотложения по количеству пыли, отложившейся на подложке P_{t_n} , г/м³ сут., рассчитывают согласно ГОСТ Р 54776–2011.

4.4. Результаты испытаний прибора СКИП

Расчет $P_{тп}$, согласно настоящей методике, проводился ежесуточно, полученные данные заносятся в таблицу Б.4 [1].

Результаты сравнительного анализа измерения интенсивности пылеотложений с помощью прибора СКИП и расчетным методом с помощью подложек представлены на рисунке 4.4 [1].

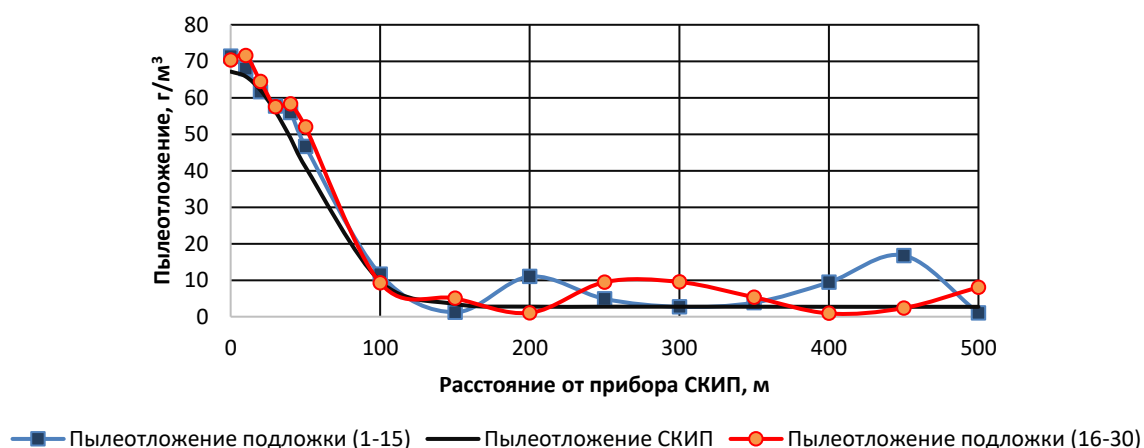


Рисунок 4.4 – Результаты сравнительного анализа измерения интенсивности пылеотложений с помощью прибора СКИП и расчетным методом с помощью подложек.

Результаты проведенного комплекса лабораторных и шахтных исследований метода контроля запыленности и интенсивности пылеотложений с помощью разработанного прибора СКИП подтвердили правильность разработанной физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт. Разработанный прибор СКИП оснащен метками для систем АГК различной модификации и сертифицирован в составе этих систем как средство измерения заявленных параметров, что позволило выводить показания прибора СКИП на монитор диспетчера угольного предприятия.

Разработанный прибор непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений СКИП прошел испытания по установлению типа средства измерения и процедуру внесения в Госреестр средств измерений. В 2023–2024 году была осуществлена предсерийная доработка прибора и разработка необходимой конструкторской документации.

4.5. Средства измерений и структура передачи полученных сигналов

Назначение средства измерений:

Приборы контроля запыленности воздуха и пылеотложения СКИП (далее – приборы) предназначены для измерений параметров аэродинамических процессов рудничной атмосферы: массовой концентрации пыли в воздушном потоке, скорости воздушного потока, интенсивности пылеотложения согласно

федеральным нормам и правилам в области безопасности в угольных шахтах и при аэрогазовом контроле в угольных шахтах.

Описание средства измерений:

Принцип работы прибора при измерении массовой концентрации пыли основан на измерении интенсивности рассеянного пылевыми частицами оптического излучения, при этом интенсивность рассеяния пропорциональна массе частиц в зоне измерения. Световой луч от источника инфракрасного излучения рассеивается на частицах пыли, находящихся в воздушном потоке. Рассеянный свет регистрируется многоэлементным фотоприемником под определенными углами в диапазоне от 0° до 163° в зависимости от размеров пылевых частиц. На основе измерений интенсивности светового сигнала производится расчет массовой концентрации пыли с учетом параметров воздушного потока, плотности и оптических характеристик частиц пыли, а также геометрии оптического канала оборудования. Регистрация рассеянного света под различными углами позволяет получить распределение массовой концентрации пыли в зависимости от размера ее частиц. Интенсивность осаждения пыли определяется путем анализа измеренных значений массовой концентрации пыли во времени в соответствии с нормами, установленными в стандарте ГОСТ Р 54776-2011.

Для измерения скорости воздушного потока в приборе используется ультразвуковой анемометр, встроенный в прибор. Анемометр состоит из двух приёмопередатчиков ультразвукового сигнала, расположенных на одной линии в различных блоках прибора. Для определения скорости воздушного потока первый приёмопередатчик посылает импульс в сторону второго приёмопередатчика, и вычислительное устройство определяет скорость распространения импульса. После этого второй приёмопередатчик посылает импульс в сторону первого приёмопередатчика, и вычислительное устройство замеряет время распространения второго импульса. На основании данных измерений вычисляется скорость воздушного потока.

Для вычисления интенсивности пылеотложения используется методика, загруженная в вычислительное устройство прибора, которая использует

информацию о массовой концентрации пыли, дисперсном составе и скорости воздушного потока [127].

Данные о концентрации пыли, дисперсном составе и пылеотложении передаются через цифровой интерфейс RS-485 потребителям.

Функциональная схема прибора приведена на рисунке 4.5, где:

- внутренний блок питания – система, осуществляющая питания всех компонентов прибора СКИП, преобразуя входящее напряжение 12В постоянного тока до необходимых значений;
- вычислительное устройство – основной микроконтроллер с вспомогательными электронными элементами, который обеспечивает управление всеми компонентами прибора, а также производит все необходимые расчеты и передачу данных до диспетчерского пункта;
- источник ИК излучения – ИК-светодиод, размещенный в блоке излучателя;
- приемник ИК излучения – многоэлементный фотоприемник, который принимает ИК-излучения, формируя соответствующий выходной сигнал;
- датчики ультразвука - два датчики, расположенные в разных блоках, разнесены на максимальное расстояние по направлению потока воздуха;
- система обдува состоит из фильтра, предназначенного для фильтрации входного воздуха, и компрессора для дальнейшего обдува от пыли источника и приемника излучения.

Конструктивно прибор представляет собой два блока, закрепленных на монтажной пластине на расстоянии друг от друга. Один блок (блок излучателя) включает источник инфракрасного излучения с длиной волны 880 нм, второй блок (блок приемника) включает многоэлементный фотоприемник, фокусирующую оптическую систему, аналоговое устройство и микропроцессор для обработки сигнала с фотоприемника, а также датчик скорости потока. Расстояние между блоками соответствует длине открытого оптического канала. Также в приборе предусмотрен вентилятор для удаления пыли с внутренних элементов и воздушный

фильтр высокой очистки, который обеспечивает чистоту используемого для обдува воздуха. Электропитание прибора осуществляется от сети постоянного тока.

Прибор предназначен для эксплуатации в потенциально взрывоопасной среде как рудничное электрооборудование. Уровень взрывобезопасности прибора P0ExiaopisI по ГОСТ 30852.0–2002.

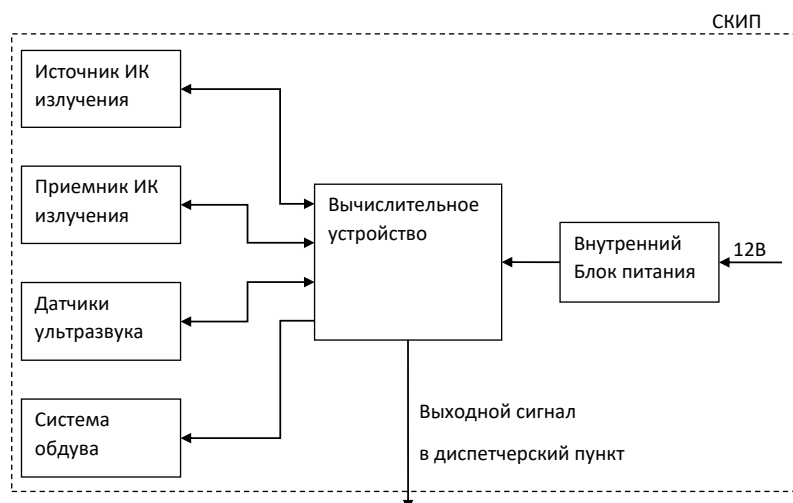


Рисунок 4.5 – Функциональная схема системы (прибора) контроля запыленности воздуха и пылеотложения СКИП.

Прибор является стационарным по способу установки на месте эксплуатации; автоматизированным по степени автоматизации; непрерывного действия в зависимости от режима работы. Прибор имеет световую сигнализацию (красный мигающий светодиод), которая срабатывает при превышении массовой концентрации пыли или интенсивности пылеотложения установленного порога. Порог для массовой концентрации пыли составляет 10 мг/м^3 , для интенсивности пылеотложения – $20 \text{ г/}(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$.

Таким образом, разработанная методика контроля запыленности и интенсивности пылеотложений и прибор СКИП в полной мере соответствуют программе «Цифровая экономика Российской Федерации», требующей перехода к цифровизации основных производственных процессов в угольной отрасли, отвечает требованиям Правил безопасности и Инструкции к системам МФСБ и может использоваться как подсистема МФСБ – система контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений в горных выработках угольных шахт.

4.6. Выводы

В рамках проведенных исследований, стендовых и промышленных испытаний нового прибора СКИП была решена задача по разработке подсистемы МФСБ – системы непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и пылеотложений в горных выработках. Решение данной задачи позволило:

- реализовать метод контроля интенсивности пылеотложения в новом приборе непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений СКИП;
- подтвердить правильность разработанной физической модели для оценки состояния пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт за счет шахтных и лабораторных испытаний прибора непрерывного автоматического контроля запыленности рудничной атмосферы и интенсивности пылеотложений СКИП;
- провести испытания по установлению типа средства измерения и процедуру внесения в Госреестр средств измерений, установить метрологические характеристики, пройти сертификационные испытания в соответствии с ТР ТС 012/2011.

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 пылевыведения 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 пылевыведения до следующего, следует проводить на основе нахождения концентрации в рудничной атмосфере, витающей вблизи источника интенсивного пылевыведения 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 пылевыведения.

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.

СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначение	Единица измерения	Наименование параметра
A	-	константа интегрирования
A_c	%	содержание негорючих веществ (золы)
b	м	ширина выработки по почве
C_1, C_2	г/м ³	запыленность воздуха соответственно в 1-м и 2-м замеренных сечениях
C	-	нормировочная постоянная
D	мкм	Диаметр частицы
d_c	м	диаметр стойки крепления
F	м ²	суммарная площадь подложек
h	м	средняя высота выработки
I_0	-	начальная интенсивность светового пучка
i	-	комплексный показатель, мнимая единица
K_0	г/м ³	начальная запыленность
K	м	коэффициент пропорциональности
k_m	-	коэффициент, учитывающий турбулентное перемещение
k_λ	-	спектральный показатель ослабления, зависящий от длины волны зондирующего пучка
l	-	расстояние от источника пылеобразования

l_1, l_2	м	расстояние между замеренными сечениями
M	г	суммарная масса осевшей на подложке пыли
m	г	масса осевшей пыли
m	-	вероятность адгезии ударившейся об стойку пылинки
n	%	содержание метана в атмосфере
n_i	% по объему	концентрационные пределы воспламенения отдельных газов
n	-	показатель преломления
n'	-	показатель поглощения
N_i	% по объему	содержание отдельных газов в смеси
N_o	г/м ³	начальная запыленность
N_{oi}	г/м ³	начальная концентрация i -й фракции
P	г/(м ³ ·сут)	масса угольной пыли, осевшей в единицу времени в единице объема выработки
P_H	$\frac{\Gamma}{\text{м}^2 \cdot (\text{ч}, \text{сут})}$	физический показатель пылевзрывобезопасности
P_0	г/(м ³ ·сут)	интенсивность пылеотложения
P_v	г/м ³	масса угольной пыли, осевшей в единице объема горной выработки
P_l	г/м	масса угольной пыли осевшей на единице длины выработки
P_s	г/м ²	масса угольной пыли осевшей на единице поверхности выработки

$q_в$	м^3	количество прошедшего воздуха
R_l	м	продольный калибр
r	мкм	радиус частицы
S	м^2	поперечное сечение выработки
s	м^2	площадь поверхности
T_n	$\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$	время накопления взрывоопасного количества пыли
t	сут.	продолжительность замера
V_2	$\%$	выход летучих веществ
$v_в$	$\text{м}/\text{с}$	скорость витания частицы
$v_{кр}$	$\text{м}/\text{с}$	критическая скорость, при которой начинается процесс сдувания пыли со стенок выработки
Z_x	-	оценка излучения
$Z_{\text{рассеяния}}$	-	доля излучения, ушедшего из рассматриваемого пучка
$Z_{\text{поглощения}}$	-	доля излучения, поглощённого из пучка
I_x	$\%$	предельная взрывоопасная концентрация смеси газообразных продуктов
Π	м	периметр выработки
Φ	-	Нормальная функция распределения
α	$\text{Н}/(\text{с}^2 \cdot \text{м}^4)$	коэффициент аэродинамического сопротивления выработки

δ_3	г/м ³	нижний предел взрывчатости угольной пыли с учетом влияние негорючих веществ
δ	г/м ³	концентрация угольной пыли
$\delta_{отл.}$	г/м ³	нижний предел взрывчатости отложившейся пыли
φ	-	безразмерный коэффициент, который определяется экспериментальным путем
ρ_n	кг/м ³	плотность вещества частицы
λ	-	длина волны зондирующего излучения
МФСБ	-	многофункциональная система безопасности
ПДК	-	предельно допустимые концентрации
МакНИИ	-	Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности
ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского	-	Национальный научный центр горного производства — Институт горного дела имени академика А. А. Скочинского
НЦ ВостНИИ	-	Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли
ВГСЧ	-	военизированная горноспасательная часть

ИПКОН РАН	-	Институт проблем комплексного освоения недр Российской Академии наук
СКИП	-	система непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложений
АГК	-	аэрогазовый контроль
ИК	-	инфракрасный
ПО	-	программное обеспечение
ПОК	-	прибор определения крепости угля
ИНС	-	искусственная нейронная сеть

Список литературы

1. 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.
2. Харченко В.Ф. Повышение эффективности подсистемы взрывоподавления-локализации взрывов как элемента многофункциональной системы безопасности угольной шахты: автореф. диссертации ... кандидата технических наук: 05.26.03 / В.Ф. Харченко. – Москва, 2021. – 130 с.
3. 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.
4. Приказ от 8 декабря 2020 года N 507. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изменениями на 23 июня 2022 года). Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140209>.
5. Ихштели О.Г. Состояние и перспективы использования новой техники на угольных предприятиях России / О.Г. Ихштели, А.П. Саватеев, В.А. Бураков // Российский уголь – 2000. – вып. 1. – С. 27–31.
6. Hui Z. Analysis on the Development Status of Coal Mine Dust Disaster Prevention Technology in China / Z. Hui, W. Han, Y. Xu, и Z. Wang // Journal of Healthcare Engineering-2021. – 2021. – № 6. – Р. 1–9.
7. ПРИКАЗ Об аварии в филиале «Шахта Юбилейная» ОАО ОУК «Южкузбассуголь». 2007. [Онлайн]. Доступно на: <https://docs.cntd.ru/document/902052682> (дата обращения: 16.07.2024)
8. ПРИКАЗ Об аварии в филиале «Шахта Ульяновская» ОАО ОУК «Южкузбассуголь». 2007. [Онлайн]. Доступно на: <https://docs.cntd.ru/document/902052681> (дата обращения: 16.07.2024)

9. «СМИ о СК - Следственный комитет Российской Федерации». Просмотрено: 16 июль 2024 г. [Онлайн]. Доступно на: <https://sledcom.ru/press/smi/item/1018466> (дата обращения: 16.07.2024)
10. Sultana J. Hazardous Impact of Coal Dust on Hematological Parameters of Underground Coal Mine Workers / J. Sultana // *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*. – 2023. – Vol 23(3). – P. 153–161.
11. Kursunoglu N. Risk Assessment of Coal Dust Explosions in Coal Mines Using a Combined Fuzzy Risk Matrix and Pareto Analysis Approach / N. Kursunoglu // *Mining Metallurgy & Exploration*. – 2023. – Vol 40. – P. 2305 – 2317.
12. Madureira E. From Dust to Disease: A Review of Respirable Coal Mine Dust Lung Deposition and Advances in CFD Modeling / E. Madureira, A. Aboelezz, W.C. Su, и P. Roghanchi // *Minerals*. – 2023. – № 13 (10). – 1311.
13. Саламатин А.Г. Угольная промышленность России: проблемы и возможности устойчивого развития / А.Г. Саламатин // *Энергетическая политика*. – 1999. – вып. 3. – С. 16–20.
14. Международный (зарубежный) стандарт. № BSI BS EN 481-1993 Workplace Atmospheres - Size Fraction Definitions for Measurement of Airborne Particles Воздух рабочей зоны. Определение гранулометрического состава переносимых в воздухе частиц. Принят от 15 сентября 2023. – docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/431815571> (дата обращения: 15.09.2024).
15. Lebecki K. Continuous dust monitoring in headings in underground coal mines / K. Lebecki, M. Małachowski, и T. Sołtysiak // *Journal of Sustainable Mining*. – 2016. – т. 15. – вып. 4. – P. 125–132.
16. Xiu Z. Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production / Z. Xiu, W. Nie, J. Yan, D. Chen, P. Cai, Q. Liu, T. Du, B. Yang // *Journal of Cleaner Production*, – 2020. – Vol. 248, P. 119 – 197.
17. Трубицын А.А. О состоянии профессиональной заболеваемости на предприятиях угольной промышленности / А. А. Трубицын, Г. Г. Полякова, Н. В.

Морозова // Предупреждение травматизма и аварий в угольных шахтах и на разрезах: Сборник научных трудов ВостНИИ. – 1999. – С. 89–91.

18. Хорешок А.А. Машины и инструмент для бурения скважин: монография / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Б. Ефременков, Ю.В. Дрозденко, А.Ю. Борисов. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. – 2022. – 174 с.

19. Кудряшов В.В. Разработка приборного обеспечения пылевого контроля в угольных шахтах / В.В. Кудряшов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – вып. S1. – С. 512–535.

20. Ярош А.С. Разработка способа и средства оперативного контроля запыленности воздуха в горных выработках угольных шахт: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.01 / А.С. Ярош – Москва, 2008. – 157 с.

21. Хорешок А.А. Актуальные вопросы использования дискового инструмента на рабочих органах проходческих комбайнов избирательного действия / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Техника и технология горного дела. – 2021. – т. 4, вып. 15. – С. 40–63.

22. 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.

23. Nikitenko S. Safety ensuring in the implementation of new technologies for tunneling and production faces / S. Nikitenko, S. Kubrin, Y. Malakhov // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2022. – Vol. 14, – P. 615–622.

24. Ren T. Monitoring and computational modelling of ventilation and dust flow in development panel / T. Ren, M. Qiao, J. Roberts, J. Hines // Resource Operators Conference. – University of Wollongong. – 9-10 February 2023.

25. Sahu A. Coal dust monitoring and computational simulations of dust dispersion in continuous miner development heading through auxiliary ventilation systems / A. Sahu, D.P. Mishra // Current Science. – 2022. – Vol. 122. – P. 419–428.

26. Zou Z. Design and Implementation of Coal Mine Dust Monitoring System Based on Cloud Platform / Z. Zou, L. Zheng, J. Huang, J. Li, и J. Wang // CSAE '18: Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering: – Hohhot, China. – 22–24 October 2018. – P. 1–8.
27. Zhang W. Development and experimental study of a scaled model for dust dispersion in fully mechanized mining face / W. Zhang, S. Xue, Q. Tu, X. Xu, F. Xing, C. Li // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 429. – P.1–10.
28. Николаев, А.В. Управление системой проветривания подземных горнодобывающих предприятий в аварийных ситуациях / А.В. Николаев, Г.Б. Лялькина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 5(135). – С. 37-46. – DOI 10.26730/1999-4125-2019-5-37-46.
29. Ищук И.Г. Социально-гигиенические проблемы и пылевзрывозащита угольных шахт / И.Г. Ищук, Г.А. Поздняков // Науч. сообщ. ННЦ-ГП ИГД им. А.А. Скочинского. Проблемы разработки угольных месторождений. – 1997. – С. 189–203.
30. Захаров В.Н. Безопасность высокопроизводительных очистных забоев в метанообильных шахтах / В.Н. Захаров, В.С. Забурдяев, Е.В. Федоров, А.В. Шаляпин // Горная промышленность. – 2023. – вып. 6, – С. 64–70.
31. Показатели добычи угля в Кузбассе с начала 2024 года. – mupk42.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru/industry/pokazateli/> (дата обращения: 10.09.2024).
32. Трубицына Н.В. Структура и анализ профессиональной заболеваемости в угольной отрасли России / Н.В. Трубицына, И.Г. Ищук // Науч. сообщ. ННЦ-ГП ИГД им. А.А. Скочинского. – 2001. – вып. 320. – С. 233–245.
33. Shao H. Combustion Characteristics of Coal Dust Containing Oil in the Oxygen-enriched Environment / H. Shao, Q. Lu, S. Bhattacharyya, S. Jiang // Combustion Science and Technology. – 2020. – № 194. – P. 1–13.
34. Нецепляев М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин. – Недра, – 1992. – 298 с.

35. Приказ Ростехнадзора от 20.03.2023 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по прогнозу и выбору мер, направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах» – consultant.ru [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_444094/ (дата обращения: 05.03.2023).

36. Кузьмич А.С. Способы предупреждения взрывов угольной пыли в шахтах / А.С. Кузьмич, П.Я. Середняков, Т.М. Петрухин, И.Г. Ищук // ЦНИЭКуголь. – 1975. – 56 с.

37. Бурчаков А.С. Аэрология горных предприятий / А.С. Бурчаков, К.З. Ушаков, Л.А. Пучков. – Наука, – 1987. – 310 с.

38. Соболев В.В. Установление закономерностей процессов пылеобразования при работе высокопроизводительной угледобывающей техники: диссертация ... доктора технических наук: 05.26.03 / В.В. Соболев. – Кемерово, – 2002. – 229 с.

39. Yu H. Environmental hazards posed by mine dust, and monitoring method of mine dust pollution using remote sensing technologies: An overview / H. Yu, I. Zahidi // Science of The Total Environment – 2022. – Vol. 864, – P. 135 – 161.

40. Kumar A.R. Multi-phase computer modeling and laboratory study of dust capture by an inertial Vortecone scrubber / A.R. Kumar, S. Schafrik, T. Novak // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30. – No. 3. – P. 287–291.

41. Медведев Э.Н. Исследование процессов выделения пыли при выемки пологих и наклонных угольных пластов и разработка метода оценки их по пылевому фактору (для условий Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов): диссертация ... кандидата технических наук: 20.00.20 / С.Н. Медведев. – Москва. – 1975. – 355 с.

42. Ищук И.Г. Научно-технический процесс в области борьбы с пылью на угольных шахтах Советского союза // Уголь. – 1969. – вып. 9. – С. 27–33.

43. Соболев В.В. Установление закономерностей процессов пылеобразования при работе высокопроизводительной угледобывающей техники: автореф. диссертации ... доктора технических наук: 05.26.03 / В.В. Соболев. – Кемерово, 2002. – 229 с.
44. Yang J. Research and Application of the technology of Forced Ventilation Diversion to Control and Reduce Dust in Comprehensive Excavation Face / J. Yang // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 631, – P. 12 – 62.
45. Лихачев Л.Я. Борьба с пылью при работе горных комбайнов / Л.Я. Лихачев, А.В. Трубицын, И.П. Белоногов. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, – 1974. – 156 с.
46. Ищук И.Г. К вопросу об оценке добычных комбайнов по пылевому фактору / И.Г. Ищук, Г.С Забурдяев // Уголь. – 1976. – вып. 11. – С. 58–63.
47. Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. – 2-е изд. перераб. и доп. – М., Недра, – 1979. – 319 с.
48. ГОСТ 31557–2012. Комбайны очистные. Общие технические требования. Методы испытаний (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22.11.2012 г. N 1085-ст.). – docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102391> (дата обращения: 23.04.2024)
49. Медведев Э.Н. Методы прогноза пылевой обстановки и разработка технических средств повышения эффективности обеспыливания на угольных шахтах Украины: автореф. диссертации ... доктора технических наук: 25.06.01 / Э.Н. Медведев. – Донецк, 1998. – 32 с.
50. Ворошилов Я.С. Научное обоснование и разработка технических решений для контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом человеческого фактора: диссертация ... доктора технических наук: 25.06.01 / Я.С. Ворошилов. – Кемерово, 2020. – 308 с.

51. Петрухин П.М. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах / П.Н. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качен, В.С. Сергеев. – М.: Недра, 1974. – 304 с.
52. Ray S.K. CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber: An overview / S.K. Ray, N.K. Mohalik, A.M. Khan, D. Mishra // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30. – P.321-327.
53. Zhao Z. Experimental Study of Surfactants' Performance for Suppressing Coal Dust with Respirable Size / P. Chang, G. Xu, A.K. Ghosh // Fuel. – 2023. Vol. – 325. – P. 1–8.
54. Cybulski W. Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie. – Wydawnictwo "Śląsk". – 1973. – 451 с.
55. Петунин П.М. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М. Петунин, Г.С. Гродель, Н.И. Жияев и др. – 1981. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра. – 271 с.
56. Мамаев В. И. Предупреждение взрывов метановоздушных смесей / В. И. Мамаев, Ж. А. Ибраев, В. А. Лигай. – Москва: Недра, 1990. – 159 с.
57. Romanchenko S. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings / S. Romanchenko, Y. Naganovski, A. Kornev // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. – 252. – P. 927–936.
58. Abramkin N. Automated control system phlegmatization of explosions of dust-methane-air mixture in the mine atmosphere / N. Abramkin, P. Mansurov, A. Kuzina // Sustainable Development of Mountain Territories – 2022. – Vol. 14. – P. 453–460.
59. Долгов Б.Е. Взрывчатость каменноугольной пыли / Б.Е. Долгов, Д.Г. Левицкий. – Харьков: Уголь и руда. – 1933. – 130 с.
60. Попов М.С. Разработка способа и средств контроля пылевзрывобезопасности горных выработок: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.03 / М.С. Попов. – Кемерово, 2004. – 204 с.
61. Бекирбаев Б.Д. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Б.Д. Бекирбаев, Г.С. Гродель, П.А. Гульшин. - М: Госгортехиздат, 1959. – 499 с.

62. Поздняков Г.А. Процесс накопления пыли и контроль пылевзрывобезопасности горных выработок / Г.А. Поздняков, Е.Л. Закутский // Науч. сообщ. ННЦ-ГП ИГД им. А.А. Скочинского. – 2007. – вып. 321. – С. 253–265.
63. Правила безопасности в угольных шахтах. Книга 3. Инструкции по борьбе с пылью и пылевзрывозащите к Правилам безопасности в угольных шахтах. Госгортехнадзор России. – Липецк: Липецкое издательство, – 1999. 2-е, испр. и доп. изд. – 109 с.
64. Закутский Е.Л. Разработка метода дистанционного контроля интенсивности пылеотложения в горных выработках угольных шахт: диссертация ... кандидата технических наук: 25.06.01/ Е.Л. Закутский. - Кемерово, 2011. – 189 с.
65. Костарев А.П. О предупреждении взрывов метана и пыли и снижении взрывоопасности шахт // Уголь. – 2002. – вып. 2. – С. 54–58.
66. Джигрин А.В. Предупреждение и локализация взрывов газа и пыли в угольных шахтах / А.В. Джигрин, Г.А. Поздняков, А.И. Новосельцев, А.П. Корнеев // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – вып. 4. – С. 22–26.
67. Быков А.М. Способы борьбы с пылью на угольных шахтах / А.М. Быков, Л.Я. Лихачев, Е.Н. Онтин, и П.И. Петров. – Москва: Недра, 1968. – 319 с.
68. Киреев А.М. Исследование пылевзрывобезопасности горных выработок в условиях Донбасса: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 25.00.15 / А.М. Киреев – Тула, 1968. – 141 с.
69. 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.
70. Трубицын А.А. Технологические основы системы управления пылевой обстановки в угольных шахтах для обеспечения безопасности ведения горных работ: диссертация ... доктора технических наук: 25.06.01 / А. А. Трубицын – Люберцы, 2002. – 42 с.

71. Поздняков Г.А. Автоматическое управление пылевым режимом угольных шахт / Г.А. Поздняков // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – вып. 10. – С. 46–49.
72. Гродель Г.С. Совершенствование контроля запыленности воздуха в угольных шахтах / Г.С. Гродель, П.П. Яремаченко. – М.: Наука. – 1977. – С. 129–133.
73. Поздняков Г.А. К методике испытаний автоматических систем локализации вспышек (взрывов) пылеметановоздушных смесей в горных выработках угольных шахт / Г.А. Поздняков, И.И. Иванов // Науч. сообщ. ННЦ-ГП ИГД им. А.А. Скочинского. – 2003 – вып. 324. - С. 172–175.
74. Подображин А.С. К вопросу управления состоянием пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – вып. 1, С. 53–56.
75. Феськов М.И. О совершенствовании пылевого мониторинга / М.И. Феськов // Сборник научных трудов. Окружающая среда человек, ресурсосбережения. Алчевск: ДГМИ. – 1999. – вып. 2. – т. 1. – 254 с.
76. Кривицкий М.Д., Дегтярев А.П., Попсуев В.И. Прибор для измерения количества осевшей угольной пыли // Патент на изобретение № SU 1341547 A1. – 1987.
77. Кривицкий М.Д. Определение радиоизотопным методом содержания негорючих веществ при осланцевании выработок / М.Д. Кривицкий, А.П. Дегтярев, Е.П. Евдокимова, А.М. Горбунков // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 1988. – С. 101–103.
78. Джигрин А.В. Предупреждения и локализация взрывов газа и пыли в угольных шахтах / А.В. Джигрин, Г.А. Поздняков, А.И. Новосельцев, А.П. Коренеев // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – №4. – С. 22–26.
79. Бабков С.В. Контроль соотношения угольных и инертных компонентов в пылевых смесях по способности отражения инфракрасного излучения / С.В.

Бабков // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 1988. – С. 112–118.

80. Либецки К.А. Пылевая взрывоопасность горного производства. / К.А. Либецки, С.Б. Романченко. – Москва: Горное дело. – 2012. – 463 с.

81. Поздняков Г.А. Состояние и перспективы пылевого контроля на угольных шахтах / Г.А. Поздняков, Л.Г. Обидова, Ф.И. Иванов // Научное сообщество ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2005. – вып. 330. – С. 39–46.

82. Shanshan T. Systematic Review of Dust Suppression Methods by Experiment Based on Intelligent Technology in the Coal Mines / T. Shanshan, D.I. Mohd, R.H. Andrew, W. Zhang, W. Chaokun // Journal of Electrical Systems. – 2024. – № 3. – Vol. – 20. – P. 882–893.

83. Wu X. Review on Improvements to the Safety Level of Coal Mines by Applying Intelligent Coal Mining / X. Wu, H. Li, B. Wang, M. Zhu // Sustainability. – 2022. – №14. – P. 16400.

84. Кудряшов В.В. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха / В.В. Кудряшов, Л.Д. Воронина, М.К. Шуринова. – Москва: Недра, – 1979. – 196 с.

85. Santa N. Application of Optical Microscopy for Semi-Continuous Coal Mine Dust Monitoring / N. Santa, E. Sarver, C. Keles, и J. Saylor // Conference: 2020 SME Annual Conference & Expo. – Phoenix, Arizona, USA. – 23-26 February 2020.

86. Кудряшов В.В. Радиоизотопный метод в решении проблемы пылевого контроля в угольных шахтах / В.В. Кудряшов // ГИАБ. – 2015. – С. 343–362.

87. Кудряшов В.В. Перспективы производства приборов пылевого контроля / В.В. Кудряшов, Г.А. Поздняков, Р.М. Нырцев, В.В. Соболев // Безопасность труда в промышленности. – 1995. – вып. 1. – С. 23–26.

88. Сурков, А.В. Управление геомеханическими и физическими процессами для повышения эффективности и безопасности разработки угольных месторождений Кузбасса: диссертация ... доктора технических наук: 05.15.02, 05.15.11. / А.В. Сурков. – Кемерово, – 1999. – 63 с.

89. Палкин А.Б. Разработка метода непрерывного измерения массовой концентрации пылевого аэрозоля: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.01 / А.Б. Палкин. – Москва, – 2002. – 95 с.

90. Палкин А.Б. Непрерывный контроль концентрации пылевого аэрозоля радиоизотопным методом / А.Б. Палкин, В.В. Кудряшов // Сборник научных трудов. Окружающая среда человек, ресурсосбережения. Алчевск: ДГМИ. – 1999. – вып. 2. – т. 1. – С. 110–127.

91. Бойко В.А. Создание системы оперативного дистанционного контроля запыленности воздуха в угольных шахтах / В.А. Бойко, В.И. Голинько, В.Г. Колесина // Аэрозольная система и коагуляция аэрозолей. – 1988. – С. 95–97.

92. Бурчаков А.С. Оборудование, применяемое при комплексном обеспыливании на шахтах и рудниках СССР. [Текст]: Лекция / Д-р техн. наук А.С. Бурчаков.

93. Поздняков Г.А. Пылевой мониторинг горных предприятий / Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко // Сборник научных трудов. Окружающая среда — человек, ресурсосбережения. Алчевск: ДГМИ. – 1999. – т. 1. – вып. 2. – С. 159–165.

94. Сборник нормативных документов горнодобывающей промышленности окружного управления Арнсберга. – esb.bra.nrw.de [Электронный ресурс]. – URL <https://esb.bra.nrw.de/3-verzeichnis-der-von-der-bezirksregierung/34-gesundheitsschutz/sammelliste-einrichtungen-und-verfahren-zur/sammelliste-nr-4-5> (дата обращения: 20.03.2024).

95. Поздняков Г.А. Результаты сравнительных испытаний приборов контроля рудничной атмосферы / Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко, П. Войтас, К. Лебецкий // Научные сообщения ННУГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2003. – вып. 325. – С. 176–184.

96. 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.

97. Кудряшов В.В. К вопросу о точности косвенных методов пылевого контроля // Проблемы рудничной аэрологии. – М.: Госгортехиздат, – 1959. – С. 257–261.
98. Кудряшов В.В. К вопросу оценки пылевзрывобезопасного состояния горных выработок // Материалы международной конференции, Алчевск: ВО МАНЕБ, ДГМИ. – 2000. – С. 115–119.
99. Кудряшов В.В. О непрерывном контроле пылеотложения в горных выработках угольных шахт // ГИАБ. – 2007. – С. 245–255.
100. Викторов В.А. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. – М.: Наука, – 1981. – 280 с.
101. Поздняков Г.А. Методы и средства контроля пылевзрывобезопасности угольных шахт / Г.А. Поздняков, Е.Л. Закутский // ГИАБ – 2007. – вып. 12. – С. 58–70.
102. Нецепляев М.И. Исследовать способы создания автоматизированной системы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок шахты / М.И. Нецепляев, Мягкий Б.И. // МакНИИ, технический отчет 1840049621. – 1985.
103. Ворошилов Я.С. Современные методы измерения концентрации пыли / М.И. Нецепляев, Мягкий Б.И. // Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции, Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – 04. 2019. – С. 112.1–112.6.
104. Алиев Г.М.-А., Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. – М.: Металлургия, – 1986. – 274 с.
105. Голинько В.И. Контроль пылевзрывоопасности горных выработок угольных шахт / В. И. Голинько, А. К. Котляров // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – т. 20, вып. 11. – С. 39–43.
106. Кудряшов В.В. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы / В. В. Кудряшов, А.С. Кобылкин // ГИАБ. – 2021. – т. 10. – вып. 1. – С. 29–44.

107. Умнов А.Е. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов, А.С. Голик, Д.Ю. Палеев, Н.Р. Шевцов. – М.: Недра. – 1990. – 286 с.

108. Новикова Е.А. Повышение безопасности конвейерного транспорта в горных выработках угольных шахт: монография / Е.А. Новикова – Днепропетровск: НГУ. – 2013. – 99 с.

109. Ерзин А.Х. Повышение эффективности пылеподавления при подземной разработке угольных месторождений с использованием поверхностно-активных веществ: диссертация ... кандидата технических наук: 05.26.01 / А.Х. Ерзин. – Санкт-Петербург, – 2015. – 148 с.

110. 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.

111. Попов С.Н. Исследование характера изнашивания и анализ механизма абразивного разрушения рабочих органов буровых машин / С.Н. Попов, С.В. Андриенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. вып. 1. – С. 50–57.

112. 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. – вып. 1. – С. 13–23.

113. Трубицына Д.А. Исследование интенсивности пылеотложений в угольных шахтах / Д.А. Трубицына, Д.С. Хлудов, Н.В. Трубицына // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – вып. 9. – С. 62–67.

114. 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. – вып. 1. – С. 68–74.

115. 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.

116. Baron P.A. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications / edited by P.A. Baron, P. Kulkarni, K. Willeke. – 2011. – 3rd ed. – 865 p.

117. Ахмадеев И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.01. / И.Р. Ахмадеев – Барнаул, – 2008. – 108 с.

118. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – Москва-Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, – 1951. – 288 с.

119. Г. ван де Хюлст, Рассеяние света малыми частицами. – М.: Издательство иностранной литературы. – 1961. – 536 с.

120. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York: Academic press, – 1969. – 666 p.

121. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Ленинград: Гидрометеиздат, – 1983. – 260 с.

122. Патент на изобретение № 2608009. Способ определения интенсивности пылеотложения и устройство для его осуществления / Д.А. Трубицына, А.А. Трубицын, Н.П. Пинчук – [и др.] № 2608009. Заявка № 2015133725. 11.08.2015. Опубликовано: 11.01.2017.

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

124. Voroshilov Ya.S. Dust deposition intensity method and control system development to increase the underground coal mine openings dust explosion safety /

Ya.S. Voroshilov, D. Trubitsyna // Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). – 2017. – P. 28–41.

125. 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.

126. 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.

127. 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

128. 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.

129. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М: Мир, – 1986. – 660 с.

130. 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. вып. 4. – С. 6–14.

131. 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 // X Международная науч.-практическая конф. «Инновационные перспективы

Донбасса», Донецк: Донецкий национальный технический университет, – 2024.

Просмотрено: 12 август 2024 г. [Онлайн]. Доступно на:

https://ipd.donntu.ru/dl/IPD2024/prog_konf_2024.pdf



Общество с ограниченной ответственностью
«Шахта Спиридоновская»

ИНН 4205381530 КПП 420501001
650065, Российская Федерация, Кемеровская
область-Кузбасс, Кемеровский г.о., г. Кемерово,
пр-т. Московский, стр. 41/1. офис 302
тел: Приемная 8 (38464) 3-40-71
e-mail: promoutsort@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ
генеральный директор
ООО «Шахта Спиридоновская»
Саблин М.В.
2024



АКТ

о внедрении

результатов диссертационной работы

Трубицыной Дарьи Анатольевны

«РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНОГО СОСТАВА ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Трубицыной Дарьи Анатольевны на тему «Разработка способов и средств автоматического контроля аэродинамических процессов образования взрывоопасного состава пылевоздушной смеси в горных выработках угольных шахт» представляют практический интерес и были использованы в ООО «Шахта Спиридоновская» в рамках производственной деятельности.

Использование результатов диссертационной работы способствовало росту производительности труда, уровня промышленной безопасности, а также достижению современных требований Правил безопасностей угольных шахт за счет разработки нового прибора автоматизированного контроля пылеотложения по сети горных выработок.

Главный инженер
ООО «Шахта Спиридоновская»

Малых И.Б. 

Приложение Б

Таблица Б.1. – Максимум распределения дисперсного состава угольной пыли в пробах разных марок углей (средние значения).

№ пп.	Шахта, выработка	Марка угля	Максимум распределения, мкм/весовая доля фракции, %				
			ПОК	Из-под комбайна	50 м от комбайна	300 м от комбайна	500 м от комбайна
1.	Колмогоровская-2, к/ш 6	ДВ	37/5,87 71/7,77	36/5,8 71/7,3	34/6,6 64/5,5	29/6,03	33/5,94
2.	Разрез Инской, к/ш 601	ДГ	36/5,2 72/10,8	34/4,8 64/5,2	34/5,7	33/5,74	15/4,82
3.	Шахта №7, путевой ствол	ДГ	36/5,2 72/9,7	34/5,3 64/4,7	36/4,9 72/9,3	26/5,85	26/6,78
4.	Котинская, диагональный просек №12	ДГ	36/6,4	72/8,2	31/5,1 72/5,8	37/6,87	37/6,2 64/5,85
5.	Котинская, к/ш 52-08	ДГ	40/4,7 89/6,5	64/5,1	33/7,2	26/9,61	29/7,61
6.	Октябрьская, осевой штрек	ДГВ	42/6,1 63/7,1	41/6,8 57/7,1	41/7,5	37/9,1	41/7,33
7.	Листвяжная магистральный в/ш "Юг"	Д	36/5,21 89/6,33	37/5,72 80/5,33	37/7,6	33/7,02	14/15- 5,14
8.	Грамотеинская, конвейерный штрек 650	Д	57/7,96	51/7,49	41/46- 6,23	41/5,87	41/6,27
9.	Листвяжная, вентиляционный штрек №1118 бис	Д	46/6,85	46/6,87	46/7,71	29/9,46	29/8,99
10.	Байкаимская, сблочная печь №13	ДГ	64/7,38	46/6,07	46/7,41	51/6,72	51/7,05
11.	Байкаимская, конвейерный штрек №12	ДГ	64/8,05	46/6,14	51/6,94	57/6,56	51/6,78
12.	Октябрьская, лава 9102	ДГВ	33/5,74 71/7,14	37/5,09 71/6,45	30/8,59	33/5,21 71/6,45	29/4,62 63/4,06
13.	Колмогоровская-2, лава 4	ДВ	37/6,11 71/8,55	37/5,95 57/6,24	37/6,11 64/7,21	24/5,02	29/5,15
14.	Средняя	Д	41/5,74 71/7,32	57/5,89	41/6,26	37/5,91	33/5,98
15.	Заречная, в/ш 1108	Г	33/5,61 71/8,44	37/5,39 51/4,78	24/5,75	21/24- 4,42	

Продолжение таблицы Б.1.

16.	Заречная, к/ш 1101	Г	37/5,53 71/8,92	37/4,93 71/10,12	29/4,82	37/40- 5,04 64/5,48	
17.	Заречная, к/ш 1102	Г	37/5,85 71/7,6	37/6,05 64/6,92	29/7,4		
18.	Им. 7 ноября, к/ш 13802	1ГВ	37/4,85 71/9,86	37/6,26 57/5,7	37/8,56	33/9,9	33/6,87
19.	Полысаевская, в/ш 186	Г	37/5,88 64/7,66	33/5,99	33/8,61	27/5,81	
20.	Полысаевская в/ш 1747	Г	41/46/8,85	51/5,82	37/6,33	33/7,45	33/6
21.	Полысаевская к/ш 18-4	Г	51/8,28	37/6,18 64/6,14	33/6,76	33/5,61	17/6,14
22.	Заречная, лава 1309	Г1ГВ	37/6,85 51/57/6,38	57/6,74	21/6,99	21/6,44	12/4,58
23.	Полысаевская, лава 18-10	Г	37/4,7 71/6,97	37/5,58	33/7,41	24/7,06	15/6,11
24.	Комсомолец, лава 1741	Г	37/6,3	37/5,14 89/7,24	37/7,03	29/5,72	5/6/0,94 37/5,34 71/5,85
25.	Полысаевская, лава 18-8	Г	37/5,35 80/5,68	37/5,58	33/7,44	33/6,9	29/7,71
26.	Средняя	Г	41/6,25 64/7,64	37/5,68 64/5,86	33/6,65	33/6,18	29/5,42
27.	Большевик, в/ш 3052	ГЖ	33/5,79 71/7,11	37/4,39 64/5,6	37/5,6 64/8,07	37/4,31 71/8,74	37/4,86 71/8,01
28.	Большевик, в/ш 30-51	ГЖ	46/8,84	37/7,59	37/4,76 71/8,03	33/4,74 72/8,14	37/6,17 64/6,57
29.	Большевик к/ш 30-51	ГЖ		37/7,75	37/5,97 64/7,83	41/6,14 64/7,83	37/6,18 64/6,55
30.	Юбилейная в/ш 50-12	ГЖ	41/4,69 89/6,59	37/41/4,83 57/4,75	51/4,44	24/4,58	6,2/3,2
31.	Юбилейная, к/ш 50-25	ГЖ	41/4,49 80/8,16	29/4,45	57/4,35	37/4,92	57/4,35
32.	Чертинская/коксовая, лава 3476	Ж	37/7,6	37/7,48	33/5,16	33/5,58	
33.	Антоновская, лава №29-23 бис	ГЖ	37/6,18 71/5,97	37/7,48	33/5,21 64/5,6	33/5,58 57/4,88	37/7,48
34.	Средняя	Ж	41/6,01 64/6,2	37/5,75	37/4,95 64/6,19	33/4,6 71/5,4	37/4,6 64/5,18
35.	Распадская/коксовая, к/ш 0526	КО	29/5,98	37/5,4	33/6,67	37/4,48	26/5,45

Продолжение таблицы Б.1.

36.	Южная, фланговая монтажная печь	КО	33/6,24	33/5,01	33/7,81	26/4,77	33/5,01
37.	Южная, к/ш 7в	КО	37/5,45	33/5,86	30/7,63	29/7,66	33/4,63
38.	Им. Ленина, в/ш 0-6- 1-3 бис	К, КО	37/5,82 64/6,72	9,7 33/6,22	33/6,26	33/5,06	
39.	Анжерская Южная наклонный конвейерный ствол	КС	37/5,58 71/5,19	37/5,27	41/5,44	37/5,95	21/7,08
40.	Алардинская, главный вентиляционный штрек	КС	33/37/5,21	33/5,32	41/5,61	37/5,9	37/6,17
41.	Шахта №12, в/ш с квершлага 4	ССТ	33/5,58 64/4,76	33/6,87	12/5,45	12/5,69	12/5,55
42.	Алардинская, газодренажный штрек 6-1-11	ТС	33/6,17	33/5,93	37/7,31	21/6,05	37/6,6
43.	Владимирская, лава №8	К	41/8,89	3,2 37/4,33	37/7,3	41/7,08	41/6,85
44.	средняя	К	33/5,67	33/5,84	33/5,95	29/4,92	29/5,03

Таблица Б.2 – Средние значения выхода фракций отложившейся угольной пыли по длине выработок (по результатам анализа проб с подложек)

Расстояние от лавы, м	Выход фракций, %, размером, мкм						
	0-2	2-5	5-10	10-20	20-40	40-80	80-160
Шахта Алексиевская, уголь марки Д							
30	0,12	4,82	14,92	30,47	31,65	16,41	1,63
40	0,12	5,09	17,48	34,31	29,66	11,15	2,21
50	0,11	4,21	15,93	36,47	32,82	9,46	1,02
60	0,14	5,05	17,81	39,99	26,8	6,39	3,83
70	0,15	6,03	20,37	39,19	27,88	6,07	0,32
80	0,14	5,42	18,75	40,19	28,67	4,69	2,16
90	0,14	4,96	17,92	38,07	30,58	7,51	0,83
100	0,13	5,59	20,01	39,74	24,13	5,18	5,22
110	0,1	4,89	18,26	37,28	27,46	8,65	3,37
120	0,11	5,06	19,6	39,51	27,38	5,4	2,78
170	0,16	7,3	27,53	46,24	15	1,96	1,83
220	0,19	8,89	30,23	43,27	12,16	2,62	2,65
270	0,13	8,13	30,52	45,39	11,26	1,9	2,68
320	0,16	8,45	33,29	46,05	8,3	2,53	1,24
370	0,21	10,79	40,63	39,46	6,58	1,9	0,43

Продолжение таблицы Б.2.

420	0,17	10,27	38,62	39,37	5,5	3,77	2,3
470	0,22	11,49	34,69	29,7	8,57	8,77	6,56
520	0,22	11,35	35,2	34,46	9,3	5,16	4,31
570	0,27	16,17	43,84	30,09	3,64	3,18	2,82
620	0,35	15,43	44,28	33,18	3,78	2,15	0,83
Шахта им. С.М. Кирова, уголь марки Г							
30	0,64	3	5,58	14,83	37,08	34,96	3,91
40	0,98	3,74	6,79	17,67	34,53	29,41	6,88
50	1,4	3,85	6,94	18,62	36,54	28,35	4,29
60	0,18	4,39	9,9	23,13	34,96	23,15	4,29
70	0,14	3,28	7,95	21,37	56,51	24,95	4,56
90	0,11	2,88	7,45	21,6	33,51	20,68	13,78
100	0,15	4,39	8,76	21,37	37,2	25	3,15
110	0,19	4,36	10,05	28,67	38,14	16,79	1,81
120	0,1	3,36	8,53	23,09	37,7	20,72	6,5
220	0,25	6,0	15,02	35,09	33,74	9,36	0,55
320	0,27	6,29	17,4	38,99	30,67	5,83	0,56
420	0,41	10,26	21,55	36,99	25,78	5,01	0
620	0,28	7,07	21,71	45,1	21,46	3,61	0,78
720	0,26	8,21	25,42	43,28	18,95	3,45	0,43
820	0,31	7,61	24,14	45,93	19,42	2,59	0
920	0,28	7,99	23,38	43,72	20,99	2,38	1,27
1020	0,34	9,56	27,4	40,43	12,61	4,48	5,19
1120	0,38	11,96	32,54	41,31	10,48	2,49	0,87
Шахта Заречная, уголь марки Г							
20	2,61	4,21	7,33	23,73	43,95	18,14	0,04
30	2,6	4,41	8	31,41	42,05	17,23	0,29
40	3,47	5,39	8,68	25,39	41,68	15,26	0,13
50	2,96	4,78	8,46	26,77	42,32	11,23	3,47
60	3,16	5,71	10,95	33,92	38,51	7,74	0
70	2,75	5,46	11,98	34,6	36,44	8,72	0,06
80	3,63	6,75	14,18	36,82	31,08	7,34	0,1
90	4,49	7,96	15,27	38,16	29,25	4,88	0
100	3,39	6,83	14,58	38,09	32,17	5,28	0
110	3,75	7,62	16,43	40,35	28,54	3,3	0
210	4,99	10,82	23,42	42,42	17,22	1,12	0
310	7,65	14,3	28,05	39,87	11,25	0,04	0
410	5,46	15,27	29,93	37,45	9,88	2	0
510	4,09	12,19	27,12	39,82	13,11	2,39	1,24
610	2,81	9,3	27,39	46,38	10,3	1,46	2,35
710	2,88	10,08	30,01	44,95	10,06	0,67	1,32
810	0,19	7,71	29,39	43,28	12,87	4,34	2,23
910	0,21	8,26	32,04	46,59	10,08	2,42	0,42
1010	0,25	9,59	33,53	41,43	10,6	1,92	2,69
1110	0,26	8,3	27,41	40,94	14,19	4,72	4,18

Таблица Б.3 – Результаты исследования интенсивности пылеотложения пластовой пробы марки К.

v, м/с	Расстояние, см	Рt, пылеотложение г/м ³			Кс
		Подложки	Весы	Расчет ИНС	
0,8	100	14,79	16,9	14,73585	9,3
	300	6,70	7,91	8,10855	11,1
	500	4,92	6,33	6,8625	12,2
	700	3,37	3,45	3,8192	11,2
1,3	100	15,87	10,14	14,43555	11,1
	300	5,27	4,56	5,2099	10,6
	500	3,61	3,17	3,2544	9,6
	700	2,87	3,32	3,37355	10,9
2,5	100	12,1	10,82	13,0644	11,4
	300	3,31	3,53	3,4029	9,95
	500	1,99	2,99	2,7888	11,2
	700	2,17	1,83	2,52	12,6
0,4	100	19,94	20,68	20,1069	9,9
	300	13,53	13,47	13,23	9,8
	500	8,23	8,72	11,44125	13,5
	700	5,71	6,21	8,642	14,5
0,6	100	23,14	29,05	23,38112	8,96
	300	17,41	18,31	17,1456	9,6
	500	10,15	12,18	12,5048	11,2
	700	3,18	2,98	3,0184	9,8
0,5	100	20,71	20,9	21,117075	10,15
	300	13,44	12,98	15,3236	11,6
	500	7,14	8,23	8,1461	10,6
	700	4,39	5,12	8,60655	18,1
1,2	100	25,23	19,83	25,0083	11,10
	300	7,55	6,38	8,56695	12,3
	500	5,23	7,1	6,9048	11,2
	700	1,25	1,49	1,6577	12,1
Кс Коэффициент схождения с параметрами исходящего вектора ИНС					

Таблица Б.4 – Результаты шахтных испытаний прибора СКИП.

Номер подложки	Расстояние от СКИП, м	Начальный вес, г	Конечный вес, г	Привес, г	Интенсивность пылеотложений, г/м ³ сут.	Показания СКИП, г/м ³ сут.
1	0	7,1772	7,8753	0,6981	71,3550	67,1760
2	10	7,0750	7,7402	0,6653	67,9950	65,8600
3	20	7,1547	7,7575	0,6028	61,6140	62,0680
4	30	7,2555	7,8196	0,5641	57,6590	56,2320
5	40	7,1095	7,6569	0,5474	55,9500	48,9820
6	50	7,3670	7,8234	0,4564	46,6490	41,0350

Продолжение таблицы Б.4.

7	100	6,9936	7,1072	0,1136	11,6090	9,7311
8	150	7,0949	7,1067	0,0119	1,2143	3,4780
9	200	7,1463	7,2540	0,1077	11,0050	2,7623
10	250	6,9055	6,9534	0,0478	4,8895	2,7403
11	300	7,2079	7,2344	0,0266	2,7136	2,7400
12	350	7,1493	7,1871	0,0377	3,8579	2,7300
13	400	7,1497	7,2417	0,0920	9,4060	2,7100
14	450	7,2354	7,3994	0,1640	16,7630	2,7100
15	500	7,2652	7,2753	0,0100	1,0268	2,7000
16	0	7,0825	7,7705	0,6880	70,3160	67,1760
17	10	6,9705	7,6704	0,6999	71,5330	65,8600
18	20	7,2570	7,8874	0,6304	64,4290	62,0680
19	30	7,1748	7,7376	0,5628	57,5270	56,2320
20	40	7,2798	7,8500	0,5701	58,2710	48,9820
21	50	7,0310	7,5396	0,5087	51,9890	41,0350
22	100	7,1689	7,2593	0,0904	9,2388	9,7311
23	150	7,0615	7,1106	0,0491	5,0136	3,4780
24	200	7,2930	7,3033	0,0103	1,0575	2,7623
25	250	7,0739	7,1665	0,0926	9,4676	2,7403
26	300	7,1295	7,2226	0,0931	9,5165	2,7400
27	350	7,0983	7,1503	0,0520	5,3174	2,7300
28	400	7,2593	7,2680	0,0087	0,8915	2,7100
29	450	7,1914	7,2146	0,0232	2,3686	2,7100
30	500	7,0195	7,0985	0,0790	8,0716	2,7000