

На правах рукописи

КОРНЕВА Мария Валерьевна



**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО
СНИЖЕНИЮ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ
ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

*Специальность 05.26.01 – Охрана труда (в горной
промышленности)*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Кориунов Геннадий Иванович

Официальные оппоненты:

Романченко Сергей Борисович,

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», отдел моделирования пожаров и нестандартного проектирования, ведущий научный сотрудник

Кубрин Сергей Сергеевич,

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук», лаборатория геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, заведующий лабораторией

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита диссертации состоится 23 сентября 2020 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.09 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 23 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Угольная промышленность остается одной из основных отраслей топливно-энергетического комплекса России. За последние 15 лет объемы угледобычи выросли с 298,5 млн т в 2005 г. до 439,2 млн т в 2019 г. Одна треть всего ежегодно добываемого в стране угля приходится на подземный способ. Только в 2019 году шахтами выдано на гора 107,3 млн т, а средняя суточная нагрузка на комплексно-механизированный очистной забой составила 4603 т при максимальном значении 30 000 т и более.

С повышением интенсивности ведения горных работ отмечается рост запыленности в подземных горных выработках, сопровождаемый увеличением содержания тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле. Среднесменная концентрация пыли на рабочем месте машиниста комбайна в очистных и подготовительных забоях составляет от 30-40 до 150-240 мг/м³, а при неудовлетворительном функционировании средств гидрообеспыливания – превышает технически достижимый уровень (ТДУ).

Негативное изменение пылевой обстановки приводит к повышенному риску и преждевременности развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии, что подтверждается статистическими данными Роспотребнадзора. Доля пневмокониозов и пылевых бронхитов в группе профессиональных заболеваний, вызванных воздействием на организм работников промышленных аэрозолей, в 2018 г. составила 42,8 %. Наибольшее количество трудящихся, работающих под воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), насчитывается в угледобывающей отрасли – 37,4 % при среднесписочной численности работающих 157 800 человек.

Профессиональные заболевания, связанные с воздействием на человека промышленных аэрозолей, в частности угольной пыли, являются одними из наиболее распространенных, занимая третье место в общем списке (15,89 %) после заболеваний, связанных с воздействием физических факторов (49,85 %), с физическими перегрузками и перенапряжением (24,73 %). На угольных шахтах заболевания пылевой этиологии относятся к числу наиболее распространенных. Чаще всего силикозы, антракозы и пылевые бронхиты фиксируются среди машинистов комбайнов, горнорабочих подземных, проходчиков, горнорабочих очистного забоя.

В решение вопроса улучшения пылевой обстановки на шахтах внесли значительный вклад такие учёные как И.Г. Ищук, Б.Ф. Кирин, Ю.В. Шувалов, М.М. Сметанин, С.Н. Подображин, С.Б. Романченко,

К.А. Лебецки, А.А. Трубицын, О.В. Скопинцева, Г.А. Поздняков, В.В. Кудряшов, С.С. Кубрин, В.В. Соболев, С.И. Голоскоков, А.С. Кобылкин, В.И. Дрёмов, J.F. Colinet, J. M>Listak, T.X. Ren, X. Chen, Y. Zhang, Q. Wang и др.

В настоящее время применяемые средства по борьбе с пылью не учитывают особенностей вещественного и дисперсного состава пылевого аэрозоля, ряд горнотехнических и горногеологических факторов и их динамику, вследствие чего не обеспечивают достаточную эффективность противопылевых мероприятий. Существующая методика расчета пылевой нагрузки на органы дыхания не учитывает фактическое содержание наиболее опасных для человека частиц респирабельной фракции в воздухе на рабочих местах, приводя к завышению максимально допустимого стажа работы и несвоевременности проведения лечебно-профилактических мероприятий.

Таким образом, разработка научно-обоснованных мероприятий по снижению запыленности и концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле угольных шахт и разработка рекомендаций по их прогнозу и учету при оценке условий труда является актуальной задачей в условиях высокоинтенсивной угледобычи.

Цель работы. Улучшение условий труда работников очистных и подготовительных забоев угольных шахт по пылевому фактору за счет целенаправленного снижения концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле.

Идея работы. Снижение концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле достигается за счет применения раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных поверхностно-активных веществ (ПАВ), оптимальная концентрация которого определяется исходя из времени смачивания углеродной пыли, зависящего от ее физико-химических свойств и состава.

Основные задачи исследования:

1. Оценка современного состояния условий труда по пылевому фактору и профессиональной заболеваемости на угольных шахтах.
2. Анализ способов и средств по борьбе с пылью, применяемых на предприятиях угольной отрасли.
3. Исследование динамики запыленности и дисперсного состава пылевого аэрозоля в очистных забоях угольных шахт.
4. Анализ подходов к оценке условий труда при воздействии АПФД и связанных с ним профессиональных рисков, разработка рекомендаций по учету концентрации пыли тонкодисперсных фракций в аэрозоле при расчете пылевых нагрузок на работников.

5. Разработка мероприятий и рекомендаций по повышению эффективности пылеподавления тонкодисперсных пылевых фракций при ведении очистных и подготовительных работ на угольных шахтах и их апробация.

Научная новизна:

– установлены зависимости содержания тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле от физико-механических свойств углей и горнотехнических факторов;

– установлена зависимость времени смачивания углеродной пыли различного состава от концентрации смачивателя, изготовленного на основе неионогенных и амфотерных ПАВ;

– доказано, что применение 0,05 %-ного раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных ПАВ позволяет снизить концентрацию пыли в воздухе на 10,3-15,7 %, содержание респирабельной фракции в пылевом аэрозоле на 19,1-24,6 % и торакальной фракции на 20,4-25,9 % по сравнению с аналогом.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– предложена методика расчета пылевой нагрузки, учитывающая воздействие на работников пыли респирабельной фракции и различие в ее концентрации на рабочих местах;

– получены математические модели, позволяющие прогнозировать в очистных забоях угольных шахт концентрацию витающей пыли и содержание в ней респирабельных и торакальных фракций;

– разработан состав шахтного смачивателя на основе неионогенных и амфотерных ПАВ, даны рекомендации по его применению, позволяющие повысить эффективность пылеподавления;

– разработана принципиальная технологическая схема производства предлагаемого шахтного смачивателя на базе АО «СУЭК-Кузбасс» и проведены технико-экономические расчеты, подтверждающие целесообразность ее реализации на практике.

Основные защищаемые положения:

1. Прогноз запыленности и содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле, а также выбор мероприятий по их снижению должен осуществляться с учетом состава и физико-механических свойств углей, горно-геологических и горнотехнических факторов.

2. Для своевременного проведения мероприятий по предупреждению у работников угольных шахт заболеваний пылевой этиологии и объективного определения максимально допустимого рабочего стажа в условиях

воздействия АПФД при расчете пылевой нагрузки необходимо учитывать содержание респираторной фракции в пылевом аэрозоле.

3. Повышение эффективности пылеподавления, в том числе тонкодисперсных частиц, достигается применением раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных поверхностно-активных веществ, оптимальная концентрация которого зависит от физико-химических свойств углеродной пыли.

Методология и методы исследований. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие анализ условий труда и профессиональной заболеваемости пылевой этиологии на угольных шахтах; обзор отечественного и зарубежного опыта по борьбе с пылью на предприятиях горнодобывающей отрасли; патентный поиск; метод электронной микроскопии с применением микроскопа «Leica DM4000 B LED» и программного обеспечения «Leica Application Suite»; лабораторные методы определения физико-химических свойств и смачивающей способности ПАВ и смачивателей, такие как химический анализ, инфракрасная спектроскопия, пленочная флоатация, pH-метрия, определение динамической вязкости; гравиметрический метод и метод изменения аэродинамического сопротивления фильтра, лежащие в основе работы пылемеров АЭРА, СІР-10 и ПКА-01, используемых для проведения шахтных исследований динамики запыленности дисперсного состава пылевого аэрозоля; корреляционно-регрессионный анализ.

Достоверность научных положений подтверждается значительным объемом теоретических, лабораторных и шахтных исследований при удовлетворительной их сходимости, применением современных методик и оборудования для анализа физико-химических свойств углей и их смачиваемости, свойств и смачивающей способности ПАВ, положительным опытом применения предлагаемых в работе мероприятий и рекомендаций на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на III и IV международных научно-практических конференциях «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2016 г., 2018 г.), международной 57-ой научной конференции студентов и молодых ученых (Краковская горно-металлургическая академия, г. Краков, Польша, 2016 г.), международной конференции на базе Фрайбергской Горной Академии, (г. Фрайберг, Германия, 2017 г.), международной научно-практической конференции «Поземная угледобыча в 21 веке»

(г. Ленинск-Кузнецкий, 2018 г.), а также на заседаниях НТС АО «СУЭК-Кузбасс» (г. Ленинск-Кузнецкий, 2017-2019 гг.).

Реализация результатов работы. Разработанные мероприятия и рекомендации по оценке и снижению концентрации пыли тонкодисперсных фракций в воздухе горных выработок учтены при планировании противопылевых мероприятий на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Личный вклад автора заключается в проведении анализа мирового опыта по борьбе с пылью на угольных шахтах, рассмотрении подходов к оценке пылевой нагрузки на органы дыхания работников, состояния условий труда по пылевому фактору и уровню профессиональной заболеваемости пылевой этиологии в угольной отрасли, выборе методики исследований, проведении теоретических исследований пылединамических процессов в горных выработках, проведении лабораторных исследований по разработке смачивателя, проведении шахтных экспериментов по изучению дисперсного состава пылевого аэрозоля на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» и снижению запыленности, обработке и анализе полученных результатов, формулировании основных научных положений и выводов.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 6 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, из них 3 статьи – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка и одного приложения. Работа изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 66 таблиц и 55 рисунков. Библиографический список включает 138 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, показана ее актуальность, приведены цель, идея, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные защищаемые положения, приведены сведения об апробации и реализации результатов работы, указан личный вклад автора.

В первой главе представлен анализ состояния условий труда по пылевому фактору на угольных шахтах, приведены данные по профессиональной заболеваемости пылевой этиологии. Рассмотрены основные способы и средства по борьбе с пылью на угледобывающих

предприятиях. Приведен обзор мирового опыта по оценке и улучшению условий труда, связанных с воздействием на работников АПФД. Представлены результаты патентных исследований пылесмачивающих и пылезакрепляющих составов.

Во второй главе представлены результаты шахтных исследований запыленности и дисперсного состава пылевого аэрозоля в очистных забоях угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс», рассмотрены условия ведения горных работ и свойства добываемых углей. Проанализирована эффективность применяемых на шахтах методов, способов и средств снижения запыленности. Проведен корреляционно-регрессионный анализ факторов, влияющих на запыленность и содержание тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле. Предложены рекомендации по учету концентрации пыли респираторной фракции при оценке пылевых нагрузок на работников.

В третьей главе приведены результаты лабораторных исследований физико-химических свойств шахтных смачивателей, применяемых в настоящее время. Изучена смачивающая способность и физико-химические свойства растворов ПАВ при взаимодействии их с пылью углей различных марок. Разработан состав шахтного смачивателя на основе смеси неионогенных и амфотерных ПАВ, определена оптимальная концентрация его рабочего раствора для различных шахтопластов.

В четвертой главе представлены результаты натурных испытаний эффективности разработанного смачивателя в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс». Приведена технологическая схема производства смачивателя и дано ее технико-экономическое обоснование. Представлены рекомендации по снижению содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле.

В заключении обобщены результаты проведенных исследований.

Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Прогноз запыленности и содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле, а также выбор мероприятий по их снижению должен осуществляться с учетом состава и физико-механических свойств углей, горно-геологических и горнотехнических факторов.

Из анализа данных Роспотребнадзора по профессиональной заболеваемости пылевой этиологии по всем видам экономической деятельности, включая угольную отрасль (таблица 1), следует, что доля пневмокониозов и пылевых бронхитов остается достаточно высокой.

Таблица 1 – Доля пневмокониозов и пылевых бронхитов в структуре профессиональной патологии, обусловленной воздействием АПФД

Наименование формы профзаболевания	Доля профзаболевания в общей структуре (%)				
	2014	2015	2016	2017	2018
Пневмокониозы (силикозы)	24,42	22,05	23,2	25,87	22,56
Пылевые бронхиты	16,79	20,37	18,58	21,54	20,24

На угольных шахтах заболевания пылевой этиологии занимают третье-четвертое место по распространенности после заболеваний от физических перегрузок, нейросенсорной тугоухости и вибрационной болезни. Только в период с 2012 по 2016 гг. на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» впервые зафиксировано среди работников 14 случаев заболеваний пылевым бронхитом (рисунок 1), не считая случаев силикозов и антракозов. Доля заболеваний органов дыхания в структуре профессиональной патологии зависит от пылевой обстановки на рабочих местах в конкретной шахте, определяемой в том числе эффективностью применяемых средств обеспыливания (рисунок 2). Например, на шахте «имени С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс» в 2011-2017 гг. зафиксировано 3 случая заболевания пневмокониозом и 1 случай заболевания пылевым бронхитом при 78 выявленных профзаболеваниях. На шахте «Обуховская» в Ростовской области, за меньший период времени – с 2012 по 2017 гг. зафиксировано 321 профессиональное заболевание, включая 102 заболевания органов дыхания (рисунок 3). Неблагоприятная пылевая обстановка на шахтах Восточного Донбасса объясняется тем, что большинство добываемых там углей относится к антрацитам, являющимся наиболее крепкими и гидрофобными. Применяемые традиционные средства гидрообеспыливания оказываются недостаточно эффективными. Результаты специальной оценки условий труда (СОУТ) на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» свидетельствуют о том, что наиболее неблагоприятные условия труда по пылевому фактору наблюдаются у горнорабочих очистного забоя, горнорабочих подземных, машинистов горных выемочных машин и проходчиков. Количество рабочих мест с вредными по воздействию АПФД условиями труда составило 2186 (79 % от общего числа мест с вредными условиями труда). Пневмокониозы, как правило, фиксируются среди работников с условиями труда класса 3.2-3.3, пылевой бронхит – с условиями труда класса 3.1.

Для своевременного проведения мероприятий по предупреждению профессиональных заболеваний пылевой этиологии и улучшению пылевой обстановки требуется ведение систематического контроля запыленности и дисперсного состава пылевого аэрозоля, а также прогноза их динамики.

Результаты натуральных измерений запыленности на 4-х шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (таблица 2) показали, что невозможно достичь максимальной эффективности пылеподавления на различных шахтах при использовании одинакового подхода и средств. Очистные забои отличаются нагрузкой, мощностью обрабатываемого пласта, крепостью, влажностью, зольностью, мацеральным составом добываемых углей (таблица 3), что влияет на величину пылевыделения и запыленности и требует адресного подхода при выборе противопылевых мероприятий.

Таблица 2 – Результаты шахтных исследований динамики запыленности

Место замера	Шахта							
	Имени А.Д. Рубана		Талдинская-Западная-2		Имени В.Д. Ялевского		Имени С.М. Кирова	
	С, мг/м ³ (АЭРА)	С, мг/м ³ (ПКА)	С, мг/м ³ (АЭРА)	С, мг/м ³ (ПКА)	С, мг/м ³ (АЭРА)	С, мг/м ³ (ПКА)	С, мг/м ³ (АЭРА)	С, мг/м ³ ПКА
На месте машиниста комбайна	194,44	178,29	184,38	200,57	221,57	238,8	47,67	42,5
На месте машиниста крепи	138,89	155,01	100,00	85,48	198,67	198,17	27,86	26,61
В 10-15м от комбайна	83,33	81,16	25	39,23	172,2	184,8	40,61	40,73

Таблица 3 – Условия ведения работ и свойства углей на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс»

Характеристика	Шахта			
	Имени А.Д. Рубана	Талдинская-Западная-2	Имени В.Д. Ялевского	Имени С.М. Кирова
Пласт	Польсаевский-2	70	52	Болдыревский
Лава		70-10	52-13	24-60
Марка угля	Д	Д	ДГ	Г
Мощность пласта, м	4,70	4,81	4,34	2,55
Коэффициент крепости угля, f	2,5	1,8	2,5	1,5
Влажность угля, W_t , %	8,5	11,9	9,0	4,11
Зольность угля, $A_{зс}^d$, %	12,0	13,0	13,5	35,4
Содержание инертинита I , %	8,0	15,0	15,6	5,0
Производительность комбайна, P , т/мин	11,99-12,15	14,70-14,80	20,71-20,82	14,19-14,25
Скорость воздуха, v , м/с	1,15-1,38	0,79-1,11	2,10-3,54	3,67

Отдельные качественные характеристики углей (например, эксплуатационная зольность, влажность), а также условия ведения очистных работ (например, интенсивность резания угля), влияющие на пылевую обстановку, периодически меняются в процессе угледобычи и требуют оперативного внесения корректировок в параметры работы системы комплексного обеспыливания.

Для прогноза и управления пылевой обстановкой необходимо знать какие факторы в наибольшей степени и каким образом влияют на формирование запыленности. С этой целью был проведен многофакторный корреляционно-регрессионный анализ и получено линейное уравнение регрессии (1), позволяющее произвести прогнозную оценку запыленности в очистных забоях угольных шахт при отработке мощных пластов и пластов средней мощности:

$$C = -232,71 + 57,88 \cdot f + 0,94 \cdot t + 24,92 \cdot m + 7,73 \cdot P - 5,23 \cdot R \quad (1)$$

где C – фактическая концентрация пыли в месте замера, мг/м³; f – коэффициент крепости угля по шкале проф. М.М. Протодьяконова; t – время смачивания мелкодисперсных частиц угля, с; m – вынимаемая мощность пласта, м; P – производительность комбайна, т/мин.; R – расстояние от комбайна до точки замера концентрации пыли, м.

Множественный коэффициент корреляции составил $R=0,927$, коэффициент детерминации – $R^2=0,856$. Полученная модель значима при факторах, принимающих значения в диапазонах, приведенных в таблице 3.

Так как тонкодисперсные фракции пыли вносят основной вклад в развитие профессиональных заболеваний органов дыхания и влияют на эффективность противопылевых мероприятий, важно знать их фактическое содержание в пылевом аэрозоле. С этой целью в очистных забоях ранее указанных угольных шахт были проведены исследования дисперсного состава витающей пыли (рисунки 4-5). Максимальное содержание тонкодисперсной пыли зафиксировано в воздухе на рабочем месте машиниста комбайна: доля частиц торакальной фракции (0,1-35 мкм) составила в среднем от 91,8 % до 98,1 %, пыли респираторной фракции (0,1-10 мкм) – от 74,3 до 90,0 %. По мере увеличения расстояния от источника пылеобразования концентрация тонкодисперсных частиц снижалась и на расстоянии 15 м от комбайна составила в среднем 52,5-74,9 % – для респираторной фракции и 75,6-89,7 % – для торакальной фракции. Наибольшее содержание тонкодисперсных частиц в воздухе на рабочем месте машиниста комбайна в лавах шахт «имени В.Д. Ялевского» и «имени А.Д. Рубана»: соответственно $\gamma_{0,1-10} = 90,0 \%$, $\gamma_{0,1-10} = 88,8 \%$; $\gamma_{0,1-35} = 97,4 \%$, $\gamma_{0,1-35} = 98,1 \%$.

Для предварительной оценки содержания пыли торакальной фракции в воздухе очистных выработок с доверительной вероятностью 95 % может быть использовано следующее уравнение регрессии:

$$\gamma_{0,1-35} = 80,4 + 4,65 \cdot f - 0,04 \cdot W_t^r + 0,45 \cdot P - 0,96 \cdot R \quad (2)$$

где $\gamma_{0,1-35}$ – содержание в пылевом аэрозоле пыли торакальной фракции, %; f – коэффициент крепости угля; W_t^r – общая влага угля в рабочем состоянии, %; P – производительность комбайна, т/мин.; R – расстояние от комбайна до точки замера концентрации пыли, м. При этом коэффициент корреляции равен $R=0,907$, коэффициент детерминации $R^2=0,823$.

Для оценки содержания тонкодисперсных торакальных фракций непосредственно возле комбайна на рабочем месте машиниста следует учитывать и скорость смачивания пылевидных частиц. С этой целью предлагается использовать следующее уравнение:

$$\gamma_{0,1-35} = 88,47 + 3,66 \cdot f - 0,53 \cdot W_t^r + 0,03 \cdot P + 0,1 \cdot t \quad (3)$$

Для прогноза содержания респираторных частиц ($\gamma_{0,1-10}$) возле очистного комбайна и на некотором расстоянии от него получены линейные уравнения множественной регрессии (4-5) соответственно:

$$\gamma_{0,1-10} = 65,2 + 16,51 \cdot f - 1,85 \cdot W_t^r + 0,34 \cdot P + 0,1 \cdot t \quad (4)$$

$$\gamma_{0,1-10} = 50,18 + 12,35 \cdot f - 0,43 \cdot W_t^r + 0,83 \cdot P - 1,58 \cdot R \quad (5)$$

Таким образом, применение на практике полученных зависимостей (1-5) позволит более достоверно прогнозировать изменение запыленности и концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле и своевременно предпринимать мероприятия по их снижению.

2. Для своевременного проведения мероприятий по предупреждению у работников угольных шахт заболеваний пылевой этиологии и объективного определения максимально допустимого рабочего стажа в условиях воздействия АПФД при расчете пылевой нагрузки необходимо учитывать содержание респираторной фракции в пылевом аэрозоле.

Анализ результатов СОУТ и экспериментальных исследований пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт показал, что на одних и тех же рабочих местах (например, машиниста комбайна) условия труда отличаются не только запыленностью, но и дисперсным составом пылевого аэрозоля. Если сравнивать рабочие места в забоях различных

шахт с примерно одинаковой концентрацией витающей пыли, то очевидно, что доля пыли тонкодисперсных фракций в воздухе все равно заметно отличается. Протекающие в горных выработках пылединамические процессы обуславливают дифференциацию концентрации пылевых тонкодисперсных фракций. Это, в свою очередь, предопределяет различие в скорости развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии среди работников с одинаковым классом условий труда и в величине допустимого стажа работы.

В настоящее время оценка условий труда по пылевому фактору осуществляется, исключительно, на основе среднесменной концентрации пыли без учета влияния и различий на рабочих местах содержания фиброгенных фракций пыли. Однако, именно тонкодисперсная пыль респираторной фракции приводит к развитию наиболее тяжелых легочных заболеваний (силикозов, антракозов и др.). Зарубежом, в частности, на шахтах США для предотвращения легочных заболеваний контролируют в основном среднесменную концентрацию респираторной пыли (TWA), которая не должна превышать 1 мг/м^3 . Из результатов исследований по влиянию различных факторов на скорость и тяжесть развития профессиональных заболеваний органов дыхания среди шахтеров, проведенных на шахтах США и Великобритании в течении последних 50 лет, следует, что при повышении концентрации угольной пыли респираторной фракции на 1 мг/м^3 вероятность развития прогрессивного массивного фиброза и пневмокониоза возрастает на 0,6-1 %.

Одним из недостатков известных предлагаемых решений по совершенствованию методики расчета пылевых нагрузок и профессионального риска заболеваний органов дыхания является отсутствие взаимосвязи предлагаемых расчетных коэффициентов, учитывающих дисперсный состав витающей пыли, с вероятностью нанесения вреда здоровью и смертностью от заболеваний пылевой этиологии.

На основе вышесказанного, расчет пылевой нагрузки (*ПН*) предлагается производить по следующей формуле:

$$ПН = C \cdot N \cdot T \cdot Q \cdot D, \quad (6)$$

где *ПН* – пылевая нагрузка, мг; *C* – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м^3 ; *N* – число рабочих смен, отработанных в календарном году в условиях воздействия АПФД; *T* – стаж работы, лет; *Q* – объем легочной вентиляции за смену, м^3 , величина которого зависит от категории тяжести работ; *D* – коэффициент, учитывающий влияние пыли респираторной фракции и зависящий от ее массовой концентрации в пылевом аэрозоле.

Коэффициент D предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$D = 1 + \frac{C \cdot (\gamma_{0,1-10} - 30)}{100 \cdot ПДК_{р.п.}} \cdot \frac{R}{100}, \quad (7)$$

где C – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м³; $\gamma_{0,1-10}$ – фактическое содержание в пылевом аэрозоле пыли респираторной фракции, %; $ПДК_{р.п.}$ – предельно допустимая концентрация респираторной пыли, $ПДК_{р.п.} = 1$ мг/м³ (принята на основе зарубежного опыта); R – вероятность развития легочных заболеваний при каждом повышении концентрации угольной пыли респираторной фракции на 1 мг/м³, %, $R = 0,6$ %.

При концентрации витающей пыли от 1 до 250 мг/м³ и варьировании доли респираторной фракции от 30 до 95 % коэффициент D принимает значения от 1,0 до 1,98 (таблица 4).

Таблица 4 – Некоторые рассчитанные значения коэффициента D

C , мг/м ³	γ , %	D	C , мг/м ³	γ , %	D	C , мг/м ³	γ , %	D
1	95	1,00	100	55	1,15	200	80	1,60
10	35	1,00	100	60	1,18	200	85	1,66
10	40	1,01	100	65	1,21	200	90	1,72
10	45	1,01	100	70	1,24	200	95	1,78
10	50	1,01	100	75	1,27	250	30	1,00
10	55	1,02	100	80	1,30	250	35	1,08
10	60	1,02	100	85	1,33	250	40	1,15
10	65	1,02	100	90	1,36	250	45	1,23
10	70	1,02	100	95	1,39	250	50	1,30
10	75	1,03	200	35	1,06	250	55	1,38
10	80	1,03	200	40	1,12	250	60	1,45
10	85	1,03	200	45	1,18	250	65	1,53
10	90	1,04	200	50	1,24	250	70	1,60
10	95	1,04	200	55	1,30	250	75	1,68
100	35	1,03	200	60	1,36	250	80	1,75
100	40	1,06	200	65	1,42	250	85	1,83
100	45	1,09	200	70	1,48	250	90	1,90
100	50	1,12	200	75	1,54	250	95	1,98

Использование рекомендуемой формулы (6) расчета пылевой нагрузки на органы дыхания работников с коэффициентом D (7) на примере машиниста комбайна в очистных забоях 4-х выше ранее рассмотренных шахт показывает значительное отличие полученных результатов от данных, рассчитанных по стандартной методике (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение результатов расчета ПН на рабочем месте машиниста очистного комбайна по стандартной и рекомендуемой формулам

Шахта	Концентрация пыли, мг/м ³	Содержание респираторной пыли, % _{0,1-10}	<i>D</i>	ПН _{25лет} (стандарт. формула), г	ПН _{лет} (рекоменд. формула), г	ΔПН _{25лет} г
Имени А.Д. Рубана	194,4	88,8	1,69	12 055	20 325	8 270
Талдинская-Западная-2	184,38	74,3	1,49	11 431	17 034	5 602
Имени В.Д. Ялевского	221,57	90,0	1,80	13 737	24 695	10 958
Имени С.М.Кирова	47,67	83,4	1,15	2 955	3 407	452

Таким образом, предлагаемая формула расчета пылевой нагрузки позволяет учитывать вредное воздействие на работников пыли респираторной фракции и различие в ее концентрации на рабочих местах, что позволит повысить объективность оценки условий труда и максимально допустимого рабочего стажа работы.

3. Повышение эффективности пылеподавления, в том числе тонкодисперсных частиц, достигается применением раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных поверхностно-активных веществ, оптимальная концентрация которого зависит от физико-химических свойств углеродной пыли.

Анализ мирового опыта по борьбе с пылью на угольных шахтах показал, что одним из ряда мероприятий, позволяющих повысить эффективность пылеподавления, является добавка смачивателя. В настоящее время, на большинстве российских шахт применяется смачиватель «Эльфур-М», представляющий собой водный раствор сбалансированной смеси анионных и неионогенных поверхностно-активных веществ. Для повышения смачиваемости угольной пыли были проведены исследования по разработке более эффективного, экологичного и безвредного для человека смачивателя. Разработка состава шахтного смачивателя предусматривала анализ и выбор ПАВ, приготовление растворов смачивателей различной концентрации и оценку их смачивающей способности в сравнении с аналогом на навесках пыли углей различных типов в лабораторных условиях, оценку эффективности предлагаемого смачивателя в натуральных условиях.

При проведении лабораторных исследований использованы пробы угля, отобранные с различных шахтопластов шахт АО «СУЭК-Кузбасс»,

отличающиеся вещественным составом и физико-механическими свойствами (таблица 6). Оптимальная концентрация и эффективность составов определялись исходя из времени смачивания (не более 60 с) навески угля крупностью менее 63 мкм и массой $0,1 \pm 0,0001$ г в воздушно-сухом состоянии, высыпанной в стакан с раствором объемом 100 мл³ (рисунок 6). Эксперименты проводились в соответствии со стандартом СТО-00173769-005-2014 «Методы определения смачивающей способности растворов поверхностно-активных веществ по отношению к пыли угольных шахт». В результате проведенных исследований был разработан состав шахтного смачивателя, включающий натуральные, полностью биоразлагаемые и безвредные для человека неионогенные и амфотерные поверхностно-активные вещества. В качестве неионогенных ПАВ взяты алкилполигликозиды, амфотерных – кокамидопропилбетаин. Смачиватель показал высокую смачивающую способность по сравнению с применяемым на угольных шахтах аналогом при различных концентрациях рабочего раствора (рисунок 7) и в отношении углей различных типов. Кроме того, установлены оптимальные концентрации рабочего раствора применяемого и предлагаемого смачивателей для углей семи шахтопластов. Оптимальная концентрация для применяемого смачивателя составляет 0,03-0,05 % (рисунок 8), разработанного состава – 0,023-0,04 % (рисунок 9).

Важно отметить, что при выборе оптимальной концентрации смачивателя необходимо учитывать различие в смачиваемости углей, не только относящихся к разным маркам, но и углей одной марки с отличающимися физико-химическими свойствами и составом. Наглядно продемонстрировано различие во времени смачиваемости углей одной марки на рисунках 8 и 9. Последующие натурные эксперименты на шахте «Польсаевская» подтвердили эффективность разработанного состава, как в отношении снижения общей запыленности, так и содержания тонкодисперсных фракций пыли. Эффективность пылеподавления при использовании 0,05 %-ного раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных ПАВ по сравнению с аналогом увеличилась на 10,3-15,7 %. Запыленность на месте машиниста комбайна в подготовительном забое снижалась с 224,0 мг/м³ до 188,8 мг/м³, и с 160,0 мг/м³ до 143,6 мг/м³ в 30 м от комбайна. Содержание респираторной фракции в пылевом аэрозоле снизилось на 19,1-23,0 % и торакальной фракции на 23,4-25,9 % (Рисунки 10-11). С учетом фактических значений запыленности, концентрация респираторной фракции уменьшилась на рабочем месте машиниста комбайна с 168,7 мг/м³ до 111,7 мг/м³; на расстоянии 30 м от комбайна – с 102,0 мг/м³ до 70,0 мг/м³. Концентрация торакальной фракции

уменьшилась на рабочем месте машиниста комбайна с $221,6 \text{ мг/м}^3$ до $140,8 \text{ мг/м}^3$; на расстоянии 30 м от комбайна – с $132,8 \text{ мг/м}^3$ до $92,4 \text{ мг/м}^3$.

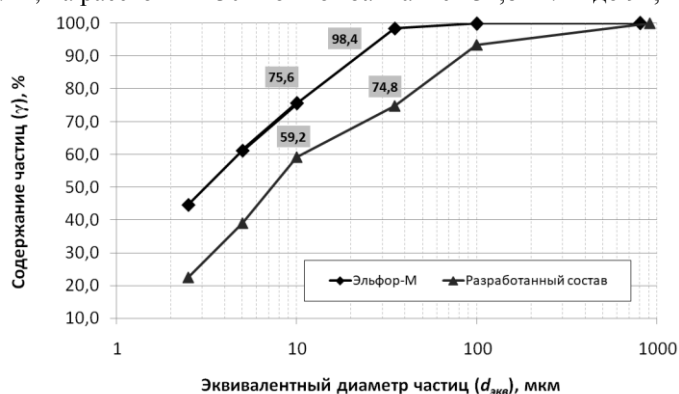


Рисунок 11 – Интегральные кривые (по минусу) дисперсного состава витающей угольной пыли на месте машиниста комбайна в подготовительном забое шахты «Польсаевская»

Для оценки конкурентоспособности предлагаемого шахтного смачивателя была разработана принципиальная технологическая схема его производства на базе АО «СУЭК-Кузбасс», и проведено технико-экономическое обоснование. Схема отличается простотой реализации, включает операции дробного дозирования компонентов, подачу воды, четыре стадии размешивания и розлив готового продукта. Экономия от использования предлагаемого смачивателя на шахтах Компании составит 6 млн. руб. в год. Срок окупаемости не превышает двух лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – снижение запыленности и содержания тонкодисперсных частиц в пылевом аэрозоле очистных и подготовительных забоев угольных шахт.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ современного состояния условий труда по пылевому фактору показал, что количество рабочих мест с вредными по АПФД условиями труда на российских угольных шахтах достигает 79,2 % и более.

2. Выбор противопылевых мероприятий должен производиться на основе достоверной информации о запыленности и дисперсном составе витающей пыли. Применяемые средства и методы обеспыливания должны иметь комплексный характер, обеспечивая снижение пылеобразования, пылеудаление и пылеподавление.

3. Доказано, что для прогноза запыленности в очистных забоях при отработке мощных пластов и пластов средней мощности может быть использовано линейное уравнение множественной регрессии, учитывающее влияние на концентрацию пыли в пункте замера крепости разрушаемого угля, вынимаемой мощности пласта, времени смачивания взвешенной угольной пыли и производительности комбайна.

4. Установлено, что содержание респираторных фракций в пылевом аэрозоле очистных забоев варьируется в диапазоне от 50,5 до 91,5 %, торакальных – от 74,6 % до 98,7 %.

5. Для прогнозной оценки содержания в пылевом аэрозоле очистных забоев пыли тонкодисперсных фракций предложена регрессионная модель, учитывающая влияние крепости и влажности добываемого угля, производительности комбайна. Установлено, что непосредственно возле комбайна количество пыли респираторной и торакальной фракций сильно зависит от времени их смачивания в процессе орошения помимо указанных выше факторов.

6. Предложена методика расчета пылевой нагрузки на органы дыхания работников, учитывающая воздействие пыли респираторной фракции, применение которой позволит объективно определить максимально допустимый стаж работы в условиях воздействия АПФД и скорректировать периодичность лечебно-профилактических мероприятий по предупреждению заболеваний пылевой этиологии.

7. Разработан состав шахтного смачивателя на основе наиболее безвредных для человека и полностью биоразлагаемых неионогенных и амфотерных поверхностно-активных веществ.

8. Проведены лабораторные исследования смачиваемости разработанным составом пыли углей, обрабатываемых в АО «СУЭК-Кузбасс» шахтопластов, которые показали, что время смачивания зависит от химического и петрографического состава углей и снижается по сравнению со стандартным смачивателем на 61,4-61,6 % (109-419 с) при концентрации раствора смачивателя, равной 0,02 % и на 13,2-25,0 % (5-7 с) при концентрации 0,1 %. Определена оптимальная концентрация рабочего раствора разработанного смачивателя, составившая для углей марок «Г», «ДГ», «Д» шахт АО «СУЭК-Кузбасс» 0,023-0,04 % (при времени смачивания не более 60 с).

9. В результате шахтных (натурных) испытаний установлено, что применение 0,05 %-ного раствора смачивателя на основе неионогенных и амфотерных ПАВ позволяет снизить по сравнению с применяемым на шахтах аналогом концентрацию пыли в воздухе на 10,3-15,7 %, содержание пыли респираторной фракции на 19,1-24,6 % и торакальной фракции на 20,4-25,9 %.

10. Разработана технологическая схема производства смачивателя, отличающаяся простотой реализации, низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Проведено ее технико-экономическое обоснование, свидетельствующее о целесообразности производства смачивателя на базе угледобывающей компании. При проектной мощности 832,32 т/год срок окупаемости составит около 2-х лет, уровень рентабельности производства – более 55 %, экономия – 6 млн. руб. в год.

11. Научные положения диссертации и технические разработки обеспечивают дальнейшее развитие теории и технологии пылеподавления в очистных и подготовительных горных выработках угольных шахт. Диссертационное исследование может получить продолжение при совершенствовании существующих и разработке новых методов комплексного обеспыливания в очистных и подготовительных забоях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Корнев, А.В. Современные методы оценки смачивающей способности шахтных составов для пылеподавления / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4 (5-1). – С. 93-102.

2. Корнева, М.В. Исследование динамики пылевого аэрозоля угольных шахт для оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих / М.В. Корнева, Г.И. Коршунов, А.В. Корнев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4 (5-1). – С. 103-111.

3. Харитонов, И.Л. К вопросу улучшения санитарно-гигиенических условий труда по пылевому фактору рабочих очистных забоев угольных шахт / И.Л. Харитонов, А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 451-463.

4. Корнев, А.В. Исследование дисперсного состава витающей углепородной пыли в очистных забоях угольных шахт Кузбасса / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S6. – С. 120-131 (*Scopus*).

5. Родионов, В.А. Установление закономерностей процессов агрегации и седиментации каменноугольной пыли для целей повышения взрывопожарной безопасности и охраны труда на угольных шахтах / В.А. Родионов, А.В. Корнев, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S6 – С. 192-202 (*Scopus*).

6. Kharitonov, I.L. Development of measures on the improvement of dust environment in the coal mines working faces / I.L. Kharitonov, A.I. Tereshkin, A.V. Kornev, G.I. Korshunov, M.V. Korneva // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti – 2019. – № 12. – P. 53-59.

Харитонов, И.Л. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт / И.Л. Харитонов, А.И. Терёшкин, А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 53-59 (*Scopus*).

Публикации в прочих изданиях:

7. Корнева, М.В. Методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих угольных шахт на основе учета дисперсного состава пылевого аэрозоля / М.В. Корнева, Г.И. Коршунов // Тезисы докладов III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2016. – С. 36.

8. Корнев, А.В. Лабораторные методы определения эффективности шахтных смачивателей / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Тезисы докладов III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2016. – С. 35.

9. Корнев, А.В. Снижение опасности взрывов взвешенной пыли в очистных забоях / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Сборник тезисов VIII Международной горноспасательной конференции IMRB. – 2017. – С. 69.

10. Korneva, M.V. Assessment of the dust load on the respiratory organs of workers in coal mines, taking into account the dispersed composition of the dust aerosol / M.V. Korneva, G.I. Korshunov // Scientific Reports on Resource Issues. Vol. 1. – 2017. – pp. 416-421.

11. Корнева, М.В. Изучение дисперсного состава витающей углепородной пыли, образующейся при ведении очистных работ на угольных шахтах Кузбасса / М.В. Корнева, Г.И. Коршунов, А.В. Корнев // Тезисы докладов IV международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2018. – С. 39.

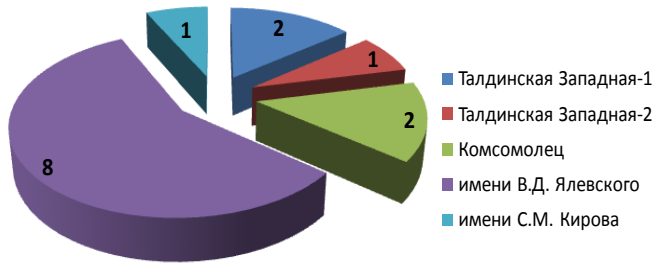


Рисунок 1 – Статистика профессиональных заболеваний пылевым бронхитом на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» в период с 2012 по 2016 гг.



Рисунок 2 – Структура профессиональной патологии на шахте «Талдинская-Западная-2» АО «СУЭК-Кузбасс» за 2010-2019 гг.

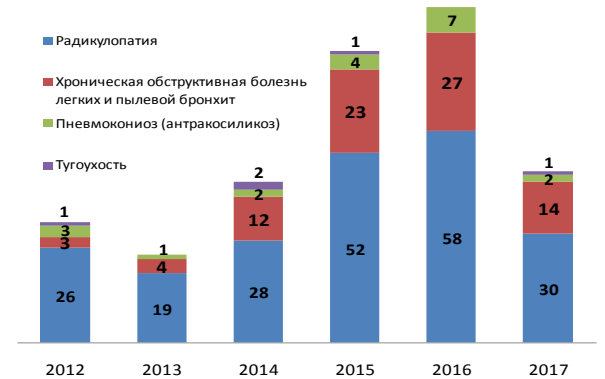
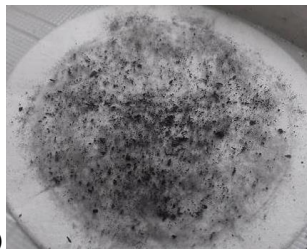
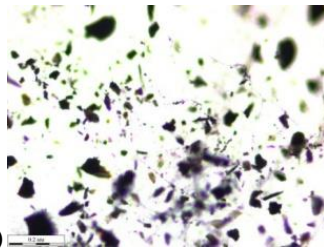


Рисунок 3 – Динамика профессиональных заболеваний на АО «Шахтоуправление «Обуховская» за 2012-2017 гг.



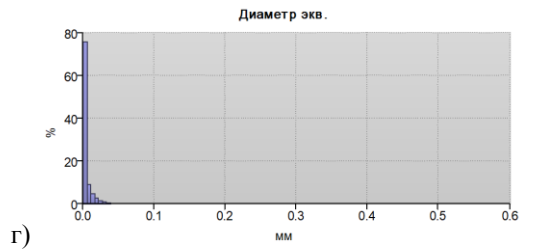
а)



б)



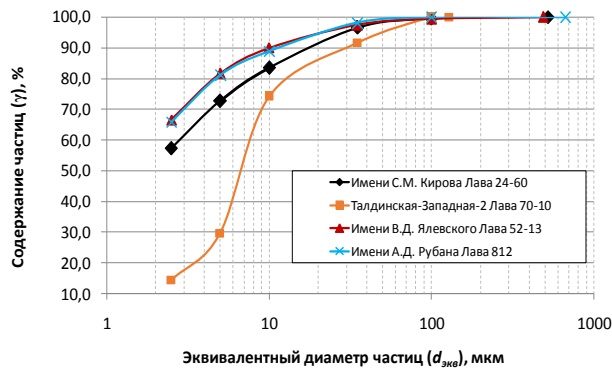
в)



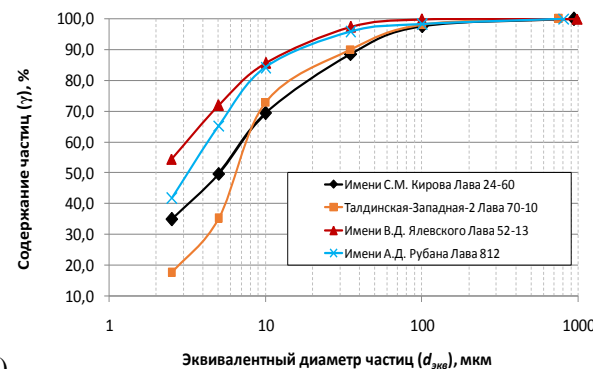
г)

Рисунок 4 – Анализ дисперсного состава пыли

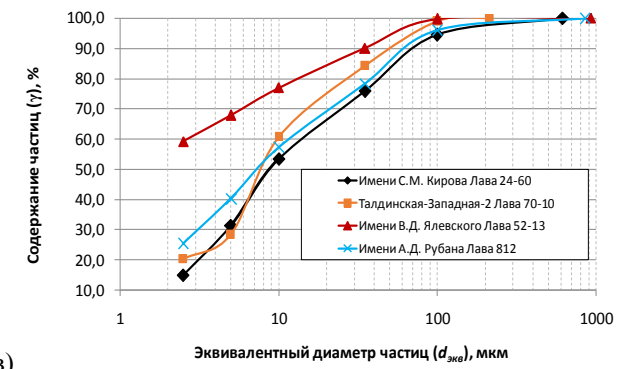
а) внешний вид фильтра с отобранной пылью; б) структура отобранной в 10-15 м от очистного комбайна на шахте «имени С.М. Кирова» витающей пыли при 100-кратном увеличении; в) изображение пыли, статистически обработанное в «Leica Application Suite» г) пример результата анализа, получаемого в программе в виде гистограммы



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Интегральные кривые (по минусу) дисперсного состава витающей в очистном забое угольной пыли а) на месте машиниста комбайна; б) месте машиниста крепи; в) в 10-15 м от очистного комбайна

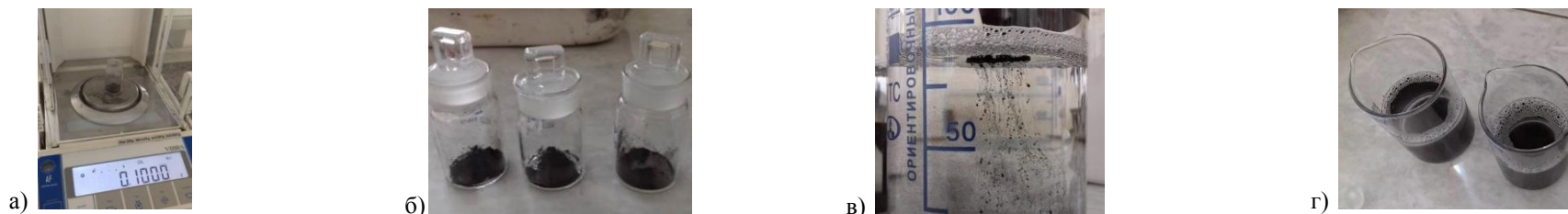


Рисунок 6 – Этапы проведения опытов по смачиваемости

а) взвешивание навески угольной пыли; б) подготовленные навески в бюксах; в) смачивание и осаждение частиц пыли; г) стаканы с осевшей в растворе смачивателя угольной пылью

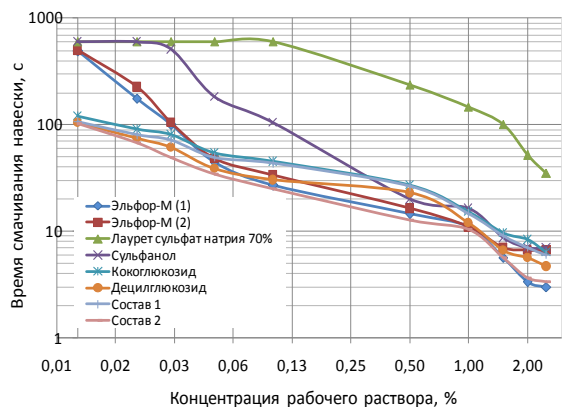


Рисунок 7 – Результаты оценки смачивающей способности поверхностно-активных веществ и смачивателей

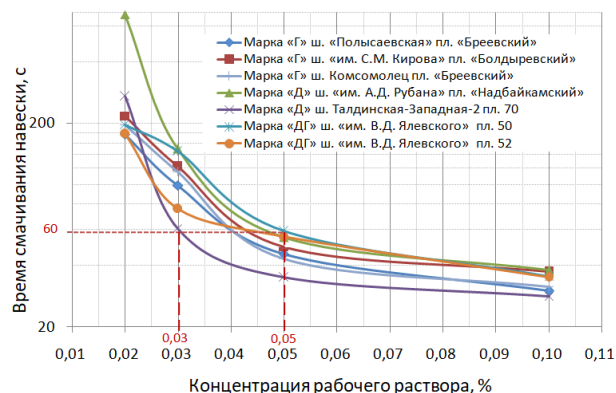


Рисунок 8 – Определение оптимальной концентрации смачивателя «Эльфор-М» для углей шахт АО «СУЭК-Кузбасс»

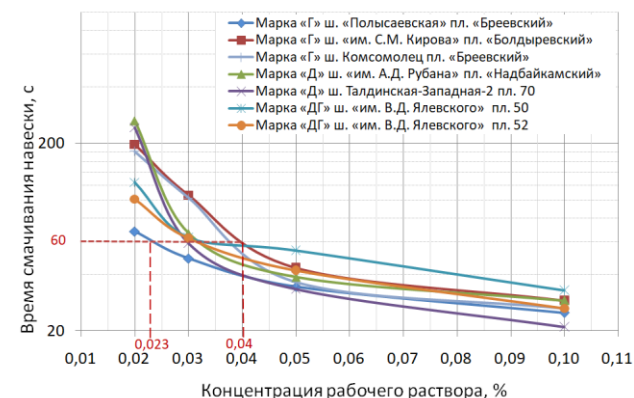


Рисунок 9 – Определение оптимальной концентрации разработанного смачивателя для углей шахт АО «СУЭК-Кузбасс»

Таблица 7 – Характеристики углей шахт АО «СУЭК-Кузбасс», используемых в экспериментах по смачиваемости

Шахта / пласт	Марка угля	Влага общая W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Содержание SiO_2 , β_{SiO_2} , %	Содержание Al_2O_3 , $\beta_{Al_2O_3}$, %	Содержание витринита, V_t , %	Содержание инертинита, I , %
Полысаевская пл. Бреевский	Г	7,3	23,5	61,3	18,3	65	3
им. С.М. Кирова пл. Болдыревский	Г	3,1	43,1	66,3	21,2	79	16
Комсомолец пл. Бреевский	Г	8,3	28,4	42,6	16,8	86	8
им. А.Д. Рубана пл. Надбайкаимский	Д	12,5	25,2	62,0	18,0	89	9
Талдинская-Западная-2 пл. 70	Д	12,4	12,0	60,9	23,4	83	15
им. В.Д. Ялевского пл. 50	ДГ	9,6	23,5	59,6	18,5	88	9
им. В.Д. Ялевского пл. 52	ДГ	8,2	14,8	59,3	22,8	80	9

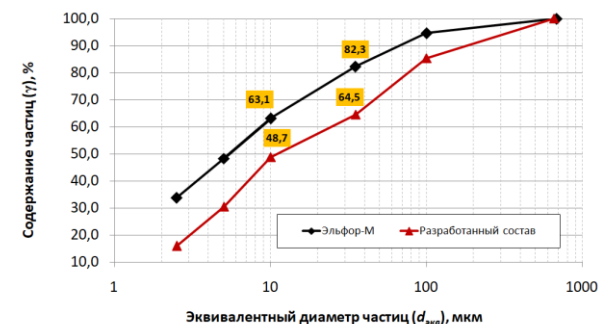


Рисунок 10 – Интегральные кривые (по минусу) дисперсного состава витающей угольной пыли в 30 м от комбайна в подготовительном забое шахты «Полысаевская»