

На правах рукописи

Каримов Артур Маратович



**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОДАВЛЕНИЯ
РЕСПИРАБЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПЫЛИ ПРИ
ПРОИЗВОДСТВЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА ГРАНИТНЫХ
КАРЬЕРАХ**

Специальность 2.10.3. Безопасность труда

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

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

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 3.4. Моделирования пожаров и нестандартного проектирования, ведущий научный сотрудник;

Кобылкин Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, лаборатория 2.2. Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится **24 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

В настоящее время около 70% всех полезных ископаемых в мире добывается открытым способом, который представляет собой ряд технологических процессов: буровзрывные работы, экскавация, отвалообразование, транспортирование и др. Каждый процесс сопровождается выделением пылевых частиц различных фракций, масса которых достигает 40-500 г на 1 м³ горных пород. Значительная часть выделяемой пыли приходится на буровзрывные работы и достигает 1/3 от общего объема пылевыделения горнодобывающего предприятия.

Интенсификация всех технологических процессов и увеличение объемов добычи полезного ископаемого приводят к росту запыленности на рабочих местах и повышенному риску развития заболеваний органов дыхания, что является особенностью современного ведения открытых горных работ. При производстве массовых взрывов происходит переизмельчение взрываеваемой породы и, как следствие, образование мельчайших частиц пыли респираторной фракции.

Респираторная фракция пыли размером частиц 10 мкм и менее является основным фактором развития легочных профессиональных заболеваний. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, влияние респираторной фракции пыли, как кратковременной, так и долговременной экспозиции, приводит к возникновению заболеваний респираторной и/или сердечно-сосудистой систем. Повышение среднесменной концентрации респираторной фракции пыли на 10% приводит к увеличению уровня общей заболеваемости на 17%, а заболеваемости органов дыхания на 26%.

В период с 2017 по 2022 год средний показатель профессиональной заболеваемости в Российской Федерации снизился с 1,31 заболевших на десять тысяч работающих до 1,00. На предприятиях по добыче полезных ископаемых этот показатель в настоящее время составляет 16,44. В 2017 году профессиональные заболевания органов дыхания рабочих карьеров и разрезов составили 14,6% от всех профессиональных заболеваний в отрасли, а доля приведших к временной нетрудоспособности составила 40,0%, к 2021 году это значение выросло до 42,3%. На гранитном карьере «Гавриловский» 40,4% работников подвергаются вредному воздействию пылевых аэрозолей, превышающему значения контрольной пылевой нагрузки,

у 10,1% работников класс условий труда по воздействию аэрозолей преимущественно фиброгенного действия 3.2-3.3.

Степень разработанности темы исследования:

Значительный вклад в исследования процессов образования, распространения и подавления пыли при производстве массовых взрывов внесли: Адушкин В.В., Белин В.А., Бересневич П.В., Виноградов Ю.И., Воронина Л.Д., Дремова В.И., Замышляев Б.В., Ильченкова С.А., Кирина Б.Ф., Кобылкин А.С., Кобылкин С.С., Колесник В.Е., Кудряшов В.В., Лещинский А.В., Лидина Г.Д., Менжулин М.Г., Озерной И.П., Очиров В.С., Парамонов Г.П., Позднякова Г.А., Романченко С.Б., Сметанин М.М., Соболев В.В., Спивак А.А., Тихонова О.В., Цирель С.В., Шевкун Е.Б., Шувалов Ю.В., Юрченко А.А., Chen M., Hasegawa Y., Itahashi S., Mason R., Wang H., Zhang Y. и др. В этих исследованиях предложены методы прогнозирования выделения пыли и разработаны способы ее подавления в различных условиях. Однако, в работах недостаточно внимания уделено прогнозированию доли респирабельной фракции в пылевом аэрозоле, образующемся при производстве массовых взрывов.

В этой связи разработка научно обоснованных способов снижения пылевой нагрузки на работников объектов ведения открытых горных работ и прогнозирование доли респирабельной фракции в пылевом аэрозоле, образующемся при производстве массовых взрывов, является актуальной задачей на гранитных карьерах.

Объект исследования - формирование пылевой нагрузки на работников гранитных карьеров.

Предмет исследования - смачивание и осаждение пылевых частиц респирабельной фракции на гранитных карьерах при производстве массовых взрывов.

Цель работы – снижение пылевой нагрузки на работников гранитных карьеров при производстве взрывных работ за счет повышения эффективности способов подавления респирабельной фракции пыли.

Идея работы - снижение пылевой нагрузки на работников гранитных карьеров достигается подавлением респираторной фракции пыли за счет применения гидрозабойки скважин, в состав которой входят поверхностно-активные вещества при положительных температурах воздуха, и снежного покрова на взрываемом блоке при отрицательных температурах.

Основные **задачи** исследования:

1. Анализ источников пылевыделения, механизма пылеобразования и статистики профессиональных заболеваний на горнодобывающих предприятиях, ведущих разработку месторождений открытым способом.

2. Изучение существующих методов прогнозирования гранулометрического состава пыли при производстве массовых взрывов, средств и способов обеспыливания воздуха на отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятиях.

3. Натурные исследования влияния взрывных работ на массовую концентрацию респираторной фракции пыли в атмосфере горнодобывающего предприятия.

4. Разработка методики прогнозирования гранулометрического состава респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов.

5. Разработка состава смачивателя для подавления респираторной фракции гранитной пыли пород карьера «Гавриловский».

6. Разработка мероприятий по борьбе с респираторной фракцией пыли при производстве массовых взрывов на гранитных карьерах.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость времени смачивания частиц гранитной пыли, образующихся при производстве массовых взрывов, от состава и концентрации поверхностно-активных веществ в составе гидрозабойки.

2. Установлена зависимость снижения выхода респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов от мощности снежного покрова на взрываемом блоке.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.10.3. Безопасность труда, пунктам 1 и 5.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены зависимости времени смачивания гранитной пыли от концентрации поверхностно-активных веществ и массовой концентрации респирабельной фракции пыли, выделяемой при производстве массовых взрывов, от мощности снежного покрова.

2. Разработан состав гидрозабойки с добавлением поверхностно-активных веществ каприлил/каприл глюкозида и кокоамфодиацетата натрия.

3. Разработана технологическая схема производства предлагаемой гидрозабойки и ее применения в скважинах при проведении буровзрывных работ.

4. Разработана технология применения снежного покрова на взрываемом блоке при производстве массовых взрывов.

5. Разработана программа, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав частиц пыли, выделяемых в результате массового взрыва на основе функции распределения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663908 «Программа для определения гранулометрического и дисперсного состава частиц образованных в результате массового взрыва» от 21.07.2022 г.

6. Результаты и рекомендации диссертационного исследования приняты к использованию для планирования мероприятий по подавлению пыли при производстве массовых взрывов (акт об использовании результатов от 09.04.2024 г.).

Методология и методы исследования:

Анализ литературных источников и патентный поиск по вопросам борьбы с пылью при производстве массовых взрывов на карьерах.

Теоретическое исследование законов распределения частиц для прогнозирования гранулометрического состава пыли и доли респирабельной фракции, образующейся при производстве массовых взрывов.

Натурные и лабораторные исследования параметров воздушной среды по пылевому фактору с использованием счетчика частиц «СЕМ DT-9880» и анализатора размеров частиц «Camsizer XT».

Лабораторные исследования смачивающей способности поверхностно-активных веществ методом пленочной флотации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Подавление респирабельной фракции пыли при производстве массовых взрывов достигается применением гидрозабойки, в состав которой входят поверхностно-активные вещества, выбираемые с учетом времени смачивания пылевых частиц взрываеваемой породы.

2. Для подавления респирабельной фракции пыли, образующейся в результате производства массовых взрывов при отрицательных температурах, следует формировать снегоочистителями или снегогенераторами снежный покров на взрываеваемом блоке, мощностью, прямо пропорциональной массовой концентрации выделяемой респирабельной фракции пыли.

3. Прогнозирование гранулометрического состава и доли респирабельной фракции в пылевом аэрозоле предлагается проводить по методике, учитывающей параметры буровзрывных работ и физико-механические свойства взрываеваемой породы.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается значительным объемом теоретических, натуральных и лабораторных исследований при достаточно точной сходимости результатов. В работе применялись современные методики и оборудование для анализа количества частиц респирабельной фракции, а также исследования времени смачивания частиц гранитной пыли и прогнозирования гранулометрического состава респирабельной фракции пыли при производстве массовых взрывов. Имеется положительный опыт применения разработанных способов пылеподавления и рекомендаций на карьере «Гавриловский» предприятия АО «Гавриловское карьероуправление».

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVI Всероссийской научно-практической конференции «Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения» (Санкт-Петербургский медико-социальный институт, Санкт-Петербург, 2021), XVI Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Ин-

ститут горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 2022), V Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности» (Санкт-Петербургский институт природопользования, промышленной безопасности и охраны окружающей среды, Санкт-Петербург, 2022).

Личный вклад автора заключается в анализе уровня профессиональных заболеваний, вызванных воздействием пылевых аэрозолей на работников горнодобывающих предприятий, и мирового опыта борьбы с пылью при производстве массовых взрывов, выборе методики исследований, проведении теоретических исследований образования пыли различной фракции при производстве массовых взрывов, лабораторных исследований смачивающей способности поверхностно-активных веществ и натуральных исследований массовой концентрации респирабельной фракции пыли, разработке способов снижения пылевой нагрузки на органы дыхания работников карьера «Гавриловский», обработке и анализе полученных результатов, формулировании основных научных положений и выводов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 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 (далее Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 42 таблицы и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, показана ее актуальность, представлены цель, идея, задачи, научная новизна, сформулированы основные защищаемые положения, практическая значимость и личный вклад автора.

В первой главе рассмотрено влияние различных технологических процессов на пылеобразование, приведены данные по профессиональной заболеваемости пылевой этиологии. Представлены основные способы борьбы с пылью при производстве массовых взрывов на карьерах. Приведен обзор мирового опыта по оценке и улучшению условий труда, связанных с воздействием на работников пылевых аэрозолей.

Во второй главе проведены теоретические исследования законов распределения пылевых частиц, образующихся при производстве массовых взрывов. Изучены горно-геологические условия и свойства гранитной породы карьера «Гавриловский». Рассмотрено влияние параметров буровзрывных работ на формирование пылевых фракций. Проведено сравнение результатов прогнозирования гранулометрического состава пыли с использованием законов распределения частиц, образующихся при производстве массовых взрывов.

В третьей главе представлены результаты натурных и лабораторных исследований гранулометрического состава выделяемой пыли при производстве массовых взрывов на карьере «Гавриловский». Проведен анализ физико-химических свойств пылеподавляющих реагентов, применяемых в настоящее время. Приведены результаты лабораторных исследований смачивающей способности растворов поверхностно-активных веществ, используемых в качестве гидрозабойки скважин при производстве массовых взрывов. Представлены результаты натурных исследований эффективности подавления респирабельной фракции пыли снежным покровом, применяемым на взрываемом блоке. Определена мощность снежного покрова, пропорциональная массовой концентрации выделяемой респирабельной фракции пыли.

В четвертой главе приведена методика расчета гранулометрического состава респирабельной фракции пыли при производстве массовых взрывов. Разработаны технологические схемы применения снежного покрова на взрываемом блоке при отрицательных температурах и гидрозабойки скважин с разработанным составом при положительных температурах. Даны рекомендации по снижению содержания частиц респирабельной фракции в пылегазовом облаке и приведено их технико-экономическое обоснование.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Подавление респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов достигается применением гидрозабойки, в состав которой входят поверхностно-активные вещества, выбираемые с учетом времени смачивания пылевых частиц взрывающей породы.

Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (далее АПФД), а конкретно частицы пыли респираторной фракции, проникают в легкие с дыханием и приводят к развитию заболеваний органов дыхания. По данным Росстата, в 2021 году доля заболеваний, вызванных АПФД и приведших к временной нетрудоспособности работников горнодобывающих предприятий, составила 42,3% (рисунок 1). Частицы респираторной фракции пыли, образованные в результате ведения буровзрывных работ, распространяются с пылегазовым облаком на значительные расстояния (рисунок 2). Подавление респираторной фракции пыли, выделяемой при производстве массовых взрывов, имеет приоритетное значение для снижения количества заболеваний органов дыхания работников горнодобывающих предприятий.

Для смачивания и дальнейшего осаждения пылевых частиц при производстве массовых взрывов применяют различные способы пылеподавления: орошение взрывающего блока, туманообразование, оптимизация параметров буровзрывных работ, использование забоек из различных материалов и др. Анализ опыта применения гидрозабойки при производстве массовых взрывов показал, что применение внутренней гидрозабойки позволяет повысить эффективность пылеподавления на 33,8-50,4% по сравнению с забойкой из отсева дробильно-сортировочной фабрики. Для повышения смачивающих свойств в гидрозабойку добавляют поверхностно-активные вещества (далее ПАВ). Известны составы гидрозабойки, применяемые на разрезах и железорудных карьерах, с добавлением неонала АФ 9-12, лаурилсульфата натрия и промышленных смачивателей Эльфор М, Заслон. Состав на основе неонала и лаурилсульфата натрия позволяет

повысить эффективность пылеподавления по сравнению с забойкой из отсева в 1,8-2,5 раза. Для достижения подобной эффективности состав гидрозабойки необходимо подбирать с учетом свойств взрываемой породы. С этой целью в работе были проведены лабораторные исследования, включающие: отбор проб гранитной пыли с карьера «Гавриловский» с помощью пылесборников на расстоянии 10-50 м от взрываемого блока; лабораторный анализ гранулометрического состава пыли; подготовка навесок гранитной пыли фракции 63 мкм; выбор ПАВ; приготовление растворов смачивателей различной концентрации; оценка их смачивающей способности на подготовленных навесках методом пленочной флотации.

В лабораторных условиях исследовались смачивающие свойства 16 составов с добавлением ПАВ, в таблице 1 представлены результаты исследований веществ с наименьшим временем смачивания навески гранитной пыли.

Таблица 1 – Время смачивания навески гранитной пыли разработанным составом смачивателя и применяемыми аналогами при различной концентрации

Вещество	Время смачивания (с) навески пыли при различной концентрации				
	1%	0,5%	0,1%	0,05%	0,01%
Заслон	12,48	19,81	25,49	49,26	Н/С
Эльфор М	11,51	16,32	21,57	44,71	92,07
Лаурилсульфат натрия	5,84	6,98	9,12	12,40	Н/С
Каприлил/каприл глюкозид	3,48	4,63	7,50	27,70	Н/С
Неонол АФ 9-12	23,51	41,80	82,22	Н/С	Н/С
Разработанный состав	2,95	3,58	6,17	17,31	44,30

Время смачивания навески гранитной пыли крупностью менее 63 мкм определялось высыпанием в воздушно-сухом состоянии в емкость с раствором объемом 100 мл³. Гранитная пыль, высыпая на поверхность водного раствора ПАВ, смачивается и осаждается, плотность частиц пыли составила 2,70 г/см³, а содержание диоксида

кремния 60%. Время смачивания определяет эффективность подавления пыли данным раствором. Вода без добавления ПАВ не смачивала гранитную пыль фракции менее 63 мкм, частицы пыли оставались на поверхности.

В результате проведенных лабораторных исследований был разработан состав гидрозабойки, включающий каприлил/каприл глюкозид и кокоамфодиацетат натрия в соотношении 85:15. Разработанный состав показал высокую смачивающую способность при различных концентрациях раствора, определена оптимальная концентрация разработанного состава 0,5% (рисунок 3). Установлена степенная зависимость времени смачивания навески гранитной пыли от концентрации разработанного состава (рисунок 3). Корреляционное уравнение представлено формулой (1).

$$t = 2,4\omega^{-0,6}, \quad (1)$$

где t – время смачивания навески гранитной пыли, с;

ω – концентрация разработанного состава.

По результатам проведенного сравнительного анализа смачивающей способности разработанного состава с аналогами установлено, что при концентрации разработанного состава 0,5% время смачивания навески гранитной пыли меньше в 1,9 раза по сравнению с лаурилсульфатом натрия и в 4,5-11,5 раз меньше по сравнению со смачивателями Заслон, Эльфор М и неонол АФ 9-12.

2. Для подавления респирабельной фракции пыли, образующейся в результате производства массовых взрывов при отрицательных температурах, следует формировать снегоочистителями или снегогенераторами снежный покров на взрывае-мом блоке, мощностью, прямо пропорциональной массовой концентрации выделяемой респирабельной фракции пыли.

При отрицательных температурах применение пылесвязывающих составов на основе водных растворов ограничено замерзанием воды, что требует дополнительных затрат. Для улучшения условий труда по пылевому фактору при отрицательных температурах необходимо применять пылесвязывающие компоненты, которые должны обладать следующими качествами: хорошее смачивание и/или связывание респирабельной фракции пыли; соответствие вязкостно-температурных свойств условиям применения; отсутствие

агрессивных свойств по отношению к резине и металлу; нетоксичность; недефицитность, экономичность применения. Всеми этими свойствами обладает снег, который предлагается применять на взрываемом блоке при отрицательных температурах, он является доступным и простым в использовании пылесвязывающим компонентом.

Подавление пыли снегом осуществляется за счет адгезии пылевых частиц к ледяной поверхности, частицы пыли притягиваются к отдельным снежинкам, увеличивают их массу и оседают вместе с ними. Частицы пыли, образующиеся при производстве массового взрыва, могут иметь положительный заряд, что повышает адгезионные свойства снега. Благодаря пористой структуре снежный покров может накапливать и удерживать частицы пыли респираторной фракции.

Для изучения эффективности подавления респираторной фракции пыли снежным покровом, нанесенным на взрываемый блок, были проведены натурные исследования запыленности воздуха вблизи взрываемого блока на карьере «Гавриловский» до массового взрыва и после при переменной мощности снежного покрова на удалении 10-50 м (таблица 2).

Исследования проводились в соответствии с руководящим документом РД 52.04.830-2015 «Массовая концентрация взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе», с применением счетчика пылевых частиц Particle Counter CEM DT-9880.

Таблица 2 – Результаты натурных исследований массовой концентрации респираторной фракции пыли PM_{10}

№	Снежный покров, см	Сезон	Массовая концентрация, мг/м ³	
			До взрыва	После взрыва
1	20	Зима, январь, 2022	0,007	0,013-0,033
2	0	Лето, август, 2022	0,014	0,031-0,069
3	15	Зима, декабрь, 2022	0,009	0,016-0,038
4	25	Зима, январь, 2023	0,007	0,013-0,032
5	10	Зима, февраль, 2023	0,009	0,017-0,043
6	5	Весна, март, 2023	0,012	0,026-0,053

Установлена экспоненциальная зависимость массовой концентрации респираторной фракции пыли от мощности снежного покрова на взрываемом блоке (рисунок 4). Корреляционное уравнение представлено формулой (2).

$$C_{10} = 0,05e^{-0,03h}, \quad (2)$$

где C_{10} – массовая концентрация частиц пыли фракции PM_{10} , mg/m^3 ;
 h – мощность снежного покрова на взрываемом блоке, см.

Снежный покров, применяемый на взрываемом блоке, позволяет снизить массовую концентрацию респираторной фракции пыли. Предлагается расположить на территории карьера «Гавриловский» склад для сбора снега, транспортировать снежный покров автосамосвалами на взрываемый блок и наносить с помощью турбинных снегоочистителей, применяемых для уборки снега на предприятии.

При отрицательных температурах в отсутствие достаточного количества снега для формирования снежного покрова необходимой мощности предлагается применять снегогенератор Northwind-450. Снегогенератор работает в диапазоне температур от - 2 до - 25 °С.

Была разработана технологическая схема применения снежного покрова для подавления респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов на АО «Гавриловское карьероуправление», проведено ее технико-экономическое обоснование. Схема отличается простотой реализации, включает в себя операции сбора, хранения, транспортировки и нанесения снежного покрова на взрываемый блок.

Таким образом, применение снежного покрова на взрываемом блоке при производстве массовых взрывов приводит к снижению массовой концентрации выделяемой респираторной фракции пыли в 2,1 раза.

3. Прогнозирование гранулометрического состава и доли респираторной фракции в пылевом аэрозоле предлагается проводить по методике, учитывающей параметры буровзрывных работ и физико-механические свойства взрывающей породы.

Гранулометрический состав пыли, выделяемой при производстве массовых взрывов, зависит от параметров буровзрывных работ и физико-механических свойств взрывающей породы. Прогно-

зировать гранулометрический состав образующейся пыли следует с помощью функции распределения, учитывающей параметры буровзрывных работ и физико-механические свойства взрывае­мой породы. Рассматривались следующие законы распределения: логарифмически-нормальный, Swebrec и Розина-Раммлера, которые позволяют определить массовое распределение частиц различного диаметра.

Закон распределения частиц Swebrec (3).

$$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{\ln \frac{x_{max}}{x}}{\ln \frac{x_{max}}{x_{50}}} \right)^b}, \quad (3)$$

где y – процент образованных частиц пыли указанного диаметра от массы взрывае­мого блока;

x – диаметр частиц пыли, м;

x_{max} – максимальный предполагаемый размер выделяемой частицы;

x_{50} – медиана распределения частиц пыли;

b – показатель равномерности дробления.

Закон распределения частиц Розина-Раммлера (4).

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c \cdot x_c^*} \right)^{n \cdot n^*} \right], \quad (4)$$

где x_c – средневзвешенный кусок породы, см;

n – коэффициент равномерности дробления;

n^* – определяется в зависимости от табличного значения n ;

x_c^* – определяется в зависимости от табличного значения n .

Логарифмически-нормальный закон распределения наиболее точно рассчитывает выход пылевых частиц респирабельной фракции (5).

$$y = \exp \left[\frac{(\ln x - \ln x_{50})}{\sigma_{\ln x}} \right], \quad (5)$$

где $\sigma_{\ln x}$ – среднеквадратический параметр распределения частиц пыли.

Среднеквадратический параметр массового распределения частиц взрывае­мой породы различной фракции можно рассчитать по формуле (6) предложенной М.Г. Менжулиным, либо по формуле (7), предложенной Б.В. Замышляевым.

$$\sigma_{lnx} = \frac{1}{B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot U}{R \cdot T \cdot K^3}, \quad (6)$$

где U – температурный коэффициент;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – температура плавления породы;
 K – концентрационный критерий.

$$\sigma_{lnx} = 1,77 + 0,03 \cdot \ln\left(\frac{q_e}{q_0}\right), \quad (7)$$

где q_0 – идеальная энергия взрыва, кДж;
 q_e – полная энергия взрыва, кДж.

Массовое распределение частиц пыли респираторной фракции, установленное в результате теоретических исследований с использованием законов распределения, натуральных и лабораторных исследований, представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение респираторных частиц пыли по массе

Класс крупности частиц d , мкм		0,3	0,3- 0,5	0,5- 1	1-2,5	2,5-5	5-10
Про- цент- ное со- держан ие по γ массе, %	Замер 1	1,4	2,5	4,4	8,9	18,3	64,5
	Замер 2	2,4	4,2	6,2	9,3	16,5	61,4
	Замер 3	5,9	7,5	8,1	13,2	17,2	48,1
	Замер 4	4,8	7,1	8,5	12,5	19,1	48,0
	Замер 5	3,1	5,6	5,9	8,8	18,2	58,4
	Замер 6	1,3	2,8	3,9	7,5	19,2	65,3
	Лаб. Иссл.	0,3	0,8	2,2	8,6	15,5	72,6
	Swebrec	48,9	4,8	7,6	12,5	11,8	14,4
	Розина- Раммлера	2,1	1,6	4,2	13,8	24,9	53,4
	Логнормальное (6)	39,3	5,7	9,1	15,0	14,0	16,9
Логнормальное (7)	8,2	3,6	7,5	17,9	23,8	39,0	

По данным исследований массового распределения частиц пыли установлено, что при замерах 1 и 2 содержание фракции $PM_{2,5}$ от общего количества исследованной пыли составляет 17,2 и 22,1% соответственно, тогда как при замере 3 равно 38,3% (рисунок 5). На

рисунке 6 представлены результаты лабораторных исследований гранулометрического состава осевших частиц пыли с использованием анализатора размеров частиц Samsizer XT, фракция PM₁₀ составляет 1,3% от общего количества осевших частиц, а на долю фракции PM_{2,5} приходится 11,5% массы всей респираторной фракции пыли. Прогнозирование массового распределения частиц респираторной фракции пыли логарифмически-нормальным законом распределения с использованием формулы (6), Swebrec и Розина-Раммлера (рисунок 7) не сопоставимо с данными натурных исследований. Результаты прогнозирования массового распределения частиц респираторной фракции пыли логарифмически-нормальным законом распределения с применением формулы (7) (рисунок 8) сопоставимы со значениями, полученными при проведении натурных исследований.

Для прогнозирования пылевой нагрузки на органы дыхания работников карьера предлагается применять формулу (8), которая учитывает долю респираторной фракции в пылевом аэрозоле.

$$ПН_{1год} = C_{cc} \cdot N \cdot Q \cdot D, \quad (8)$$

где C_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли, мг/м³;

N – число рабочих смен, отработанных в календарном году в условиях воздействия АПФД;

Q – объем воздуха, проходящего через легкие работника в течение смены, м³;

D – коэффициент, учитывающий влияние частиц пыли респираторной фракции на пылевую нагрузку.

Коэффициент, учитывающий долю респираторной фракции пыли, рассчитывается по формуле (9).

$$D = 1 + \frac{C_{cc} \gamma_{0,1-10}}{100 \cdot ПДК_{р.п.}} \cdot \frac{R}{100}, \quad (9)$$

где $\gamma_{0,1-10}$ – фактическое содержание в пылевом аэрозоле пыли респираторной фракции, %;

ПДК_{р.п.} – предельно допустимая концентрация респираторной фракции пыли, мг/м³;

R – увеличение вероятности развития легочных заболеваний при повышении на 10% среднесменной концентрации респираторной фракции пыли, %.

Приведенная методика расчета позволяет прогнозировать гранулометрический состав выделяемой при производстве массовых взрывов респирабельной фракции пыли и определять параметры пылеподавления для достижения контрольных значений пылевой нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение пылевой нагрузки на органы дыхания работников горнодобывающих предприятий является актуальной задачей для обеспечения комфортных и безопасных условий труда, поскольку работники подвергаются воздействию пылевых аэрозолей и в частности респирабельной фракции.

В диссертации обоснованы способы подавления респирабельной фракции пыли при производстве массовых взрывов. Применение рассмотренных способов позволит снизить пылевую нагрузку на органы дыхания работников гранитных карьеров. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ современного состояния условий труда по пылевому фактору показал, что временная нетрудоспособность, вызванная заболеваниями органов дыхания под воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия, на горнодобывающих предприятиях РФ достигает 42,3%, при этом на гранитном карьере «Гавриловский» пылевая нагрузка на органы дыхания у 40,4% работников превышает контрольные значения.

2. Натурными исследованиями на карьере «Гавриловский» установлено, что при производстве массовых взрывов происходит повышение массовой концентрации респирабельной фракции пыли в 5 раз и более.

3. Для прогнозирования доли респирабельной фракции в пылевом аэрозоле предложена методика расчета ее гранулометрического состава, учитывающая параметры буровзрывных работ и физико-механические свойства взрываеваемой породы. Проведен сравнительный анализ массового распределения частиц пыли респирабельной фракции, который показал высокую сходимость прогнозируемых и натурных результатов.

4. В результате лабораторных исследований смачивающей способности ПАВ разработан состав гидрозабойки, включающий каприлил/каприл глюкозид и кокоамфодиацетат натрия, при концентрации которого 0,5% время смачивания навески гранитной пыли ниже в 1,9-11,5 раз по сравнению с аналогами.

5. В результате натуральных испытаний установлено, что применение снежного покрова на взрываемом блоке при производстве массовых взрывов приводит к снижению массовой концентрации выделяемой респираторной фракции пыли в 2,1 раза.

6. Разработана технологическая схема производства и применения гидрозабойки при положительных температурах на предприятии АО «Гавриловское карьероуправление», отличающаяся простотой реализации, низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

7. Разработана технологическая схема пылеподавления респираторной фракции снежным покровом, который формируется на взрываемом блоке при отрицательных температурах турбинным снегоочистителем или снегогенератором. Проведено ее технико-экономическое обоснование, свидетельствующее о целесообразности складирования и хранения снега для дальнейшего его применения на взрываемом блоке.

8. Предлагаемые способы пылеподавления снижают пылевую нагрузку на органы дыхания работников карьера более чем в 2 раза, что позволяет достичь контрольных значений.

9. Научные положения диссертации обеспечивают дальнейшее развитие теории и технологии подавления респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов на гранитных карьерах.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает применение разработанных способов пылеподавления на предприятиях по добыче строительных материалов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Коршунов, Г.И. Анализ способов борьбы с мелко-дисперсной респираторной фракцией пыли при производстве

взрывных работ / Г.И. Коршунов, **А.М. Каримов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 2. – С. 109-120.

2. Коршунов Г. И. Анализ различных способов борьбы с мелкодисперсной респиральной фракцией пыли на горнодобывающих предприятиях / Г.И. Коршунов, **А.М. Каримов**, В.С. Подсевалов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 1. – С. 190-199.

3. Коршунов Г.И. Исследование смачивающей способности поверхностно активных веществ для подавления респиральной фракции пыли при производстве массовых взрывов / Г.И. Коршунов, **А.М. Каримов** // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – № 1. – С. 113-118.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Korshunov, G.I. Research and analysis of the sources of emission of respirable fraction of dust at the coal mines / G.I. Korshunov, A.M. Safina, **А.М. Каримов** // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2021. – Issue 10. – PP. 65-70.

5. Korshunov, G.I. Reduction of respirable dust-induced impact on open pit mine personnel in large-scale blasting / G.I. Korshunov, **А.М. Каримов**, G.S. Magamedov, S.A. Tyulkin // Mining informational and analytical bulletin. – 2023. – Issue 7. – PP. 132-144.

Свидетельство:

6. Программа для ЭВМ Программа для определения гранулометрического и дисперсного состава частиц, образованных в результате массового взрыва / Г.И. Коршунов, П.И. Афанасьев, **А.М. Каримов**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет. - № 2022663908; опубл. 21.07.2022. – 1 с.

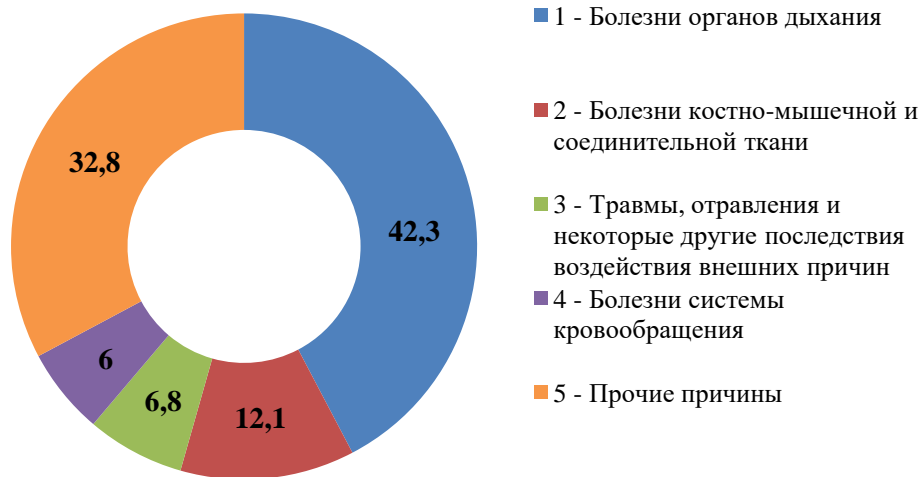


Рисунок 1 – Распределение заболеваний, приведших к временной нетрудоспособности работников предприятий по добыче полезных ископаемых, %

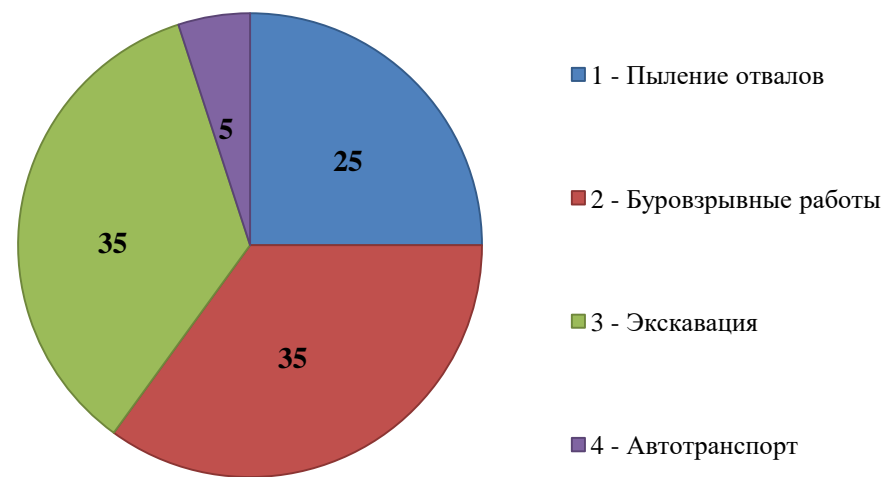


Рисунок 2 – Распределение выбросов пыли по различным технологическим процессам, %

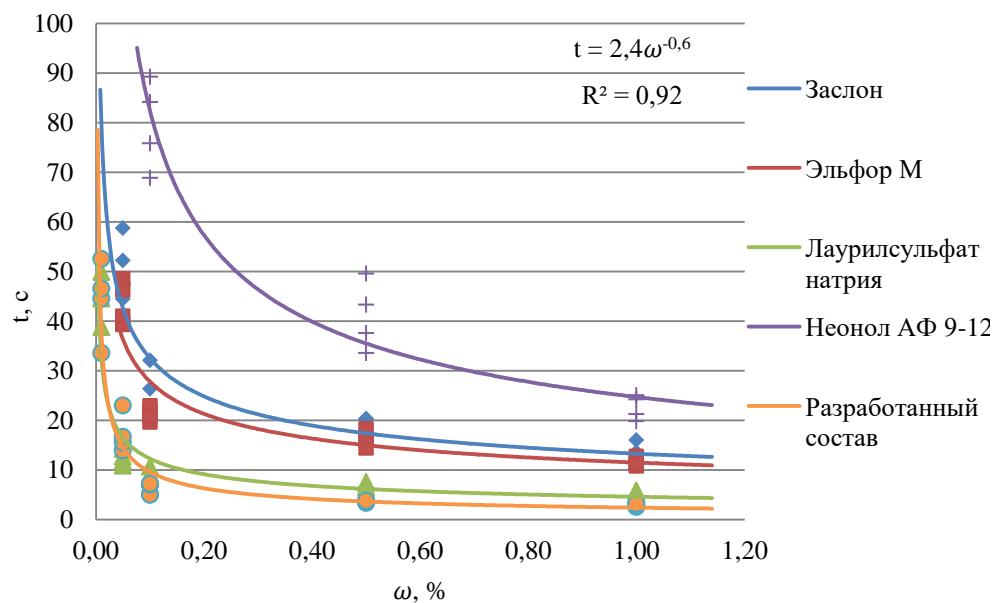


Рисунок 3 – Время смачивания навески гранитной пыли исследуемыми ПАВ при различной концентрации

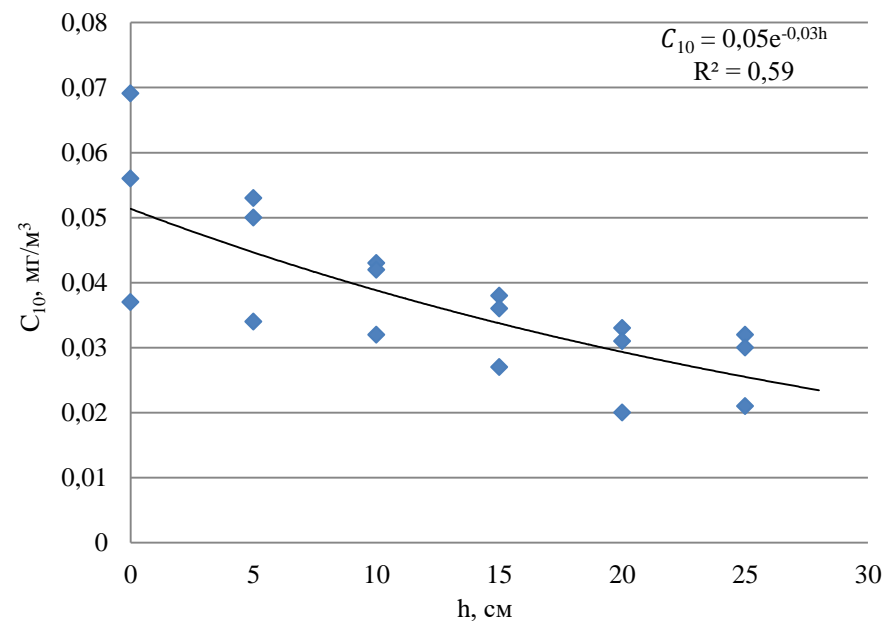


Рисунок 4 – Зависимость снижения массовой концентрации респираторной фракции пыли от мощности снежного покрова

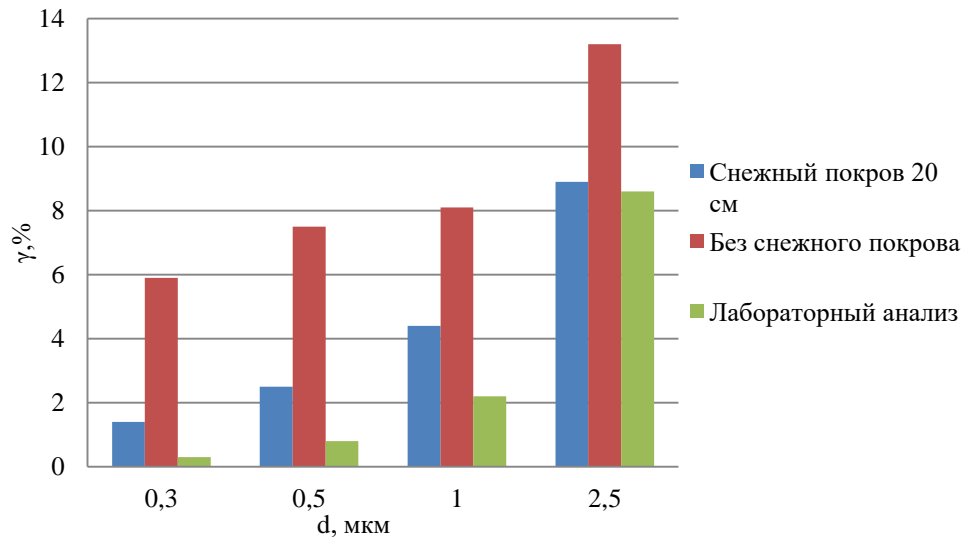


Рисунок 5 – Массовое распределение респирательной фракции пыли

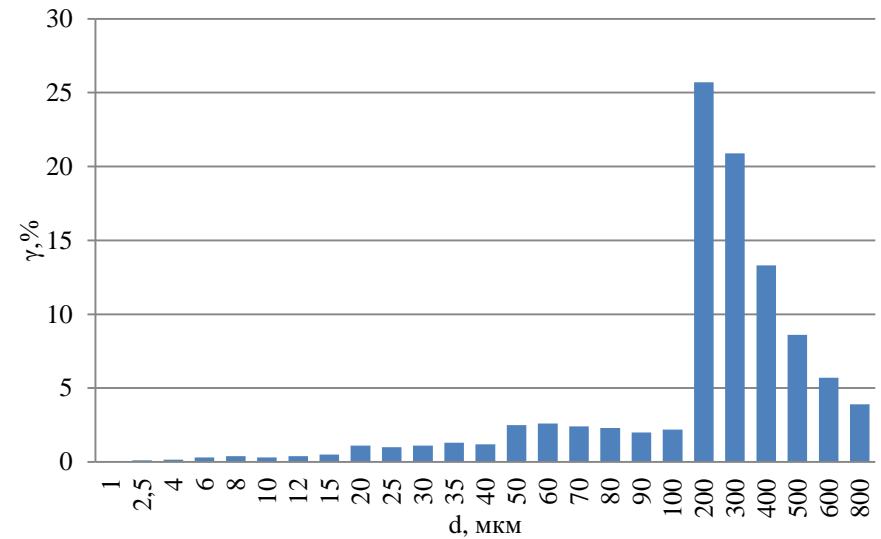


Рисунок 6 – Лабораторные исследования гранулометрического состава осевшей после производства массового взрыва пыли

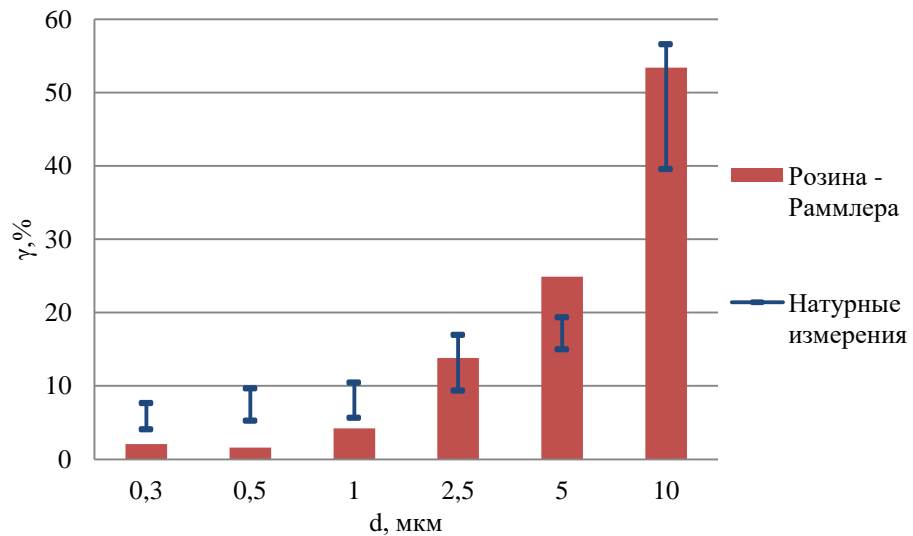


Рисунок 7 – Прогнозирование массового распределения респирательной фракции пыли законом распределения Розина-Раммлера

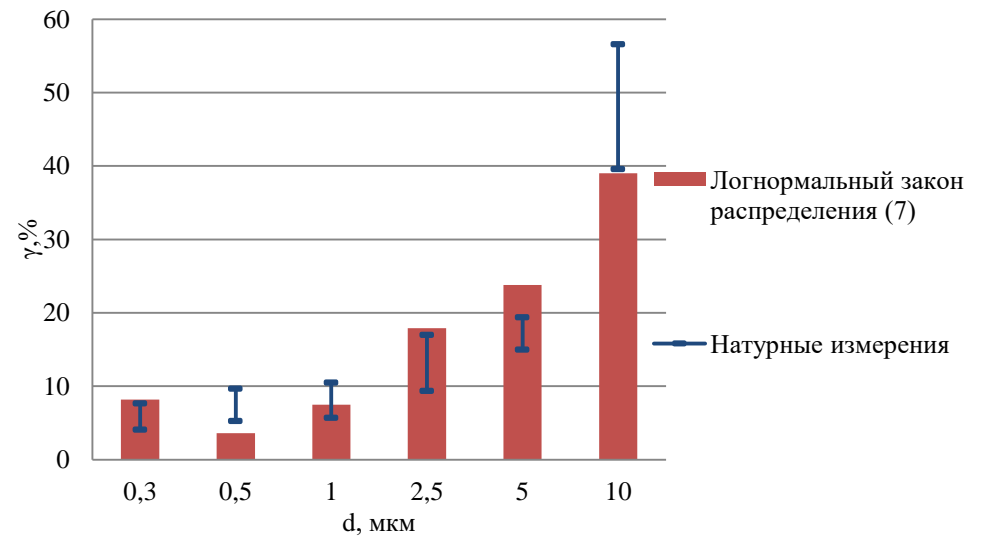


Рисунок 8 – Прогнозирование массового распределения респирательной фракции пыли логнормальным законом распределения (формула 7)