

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

Горный институт

Кафедра безопасности и экологии горного производства

На правах рукописи

Тимченко Александр Николаевич

**Обоснование эффективных средств и параметров аспирационного обеспыливания
высокопроизводительных проходческих забоев угольных шахт**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность
(в горной промышленности)»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор Кобылкин Сергей Сергеевич

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ АСПИРАЦИОННОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ ЗАБОЕВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ.....	14
1.1 Динамика развития угледобывающей промышленности.....	14
1.2 Динамика аварийности и профзаболеваемости, в том числе обусловленная пылевым фактором.....	16
1.3 Обзор основных современных мероприятий, применяемых для снижения уровня запыленности рудничной атмосферы при ведении проходческих работ.....	21
1.4 Фактический и технически достижимый уровни запыленности воздуха в подготовительных забоях угольных шахт.....	30
1.5 Рассмотрение базовых принципов построения обеспыливающих систем.....	33
1.6 Постановка задач исследования.....	42
Выводы.....	43
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЯХ.....	45
2.1 Разработка классификации систем обеспыливания рудничной атмосферы при проходке тупиковых горных	45
2.2 Оценка состояния применяемого комплекса обеспыливания на обследуемых шахтах.....	48

2.3 Шахтные исследования запыленности рудничной атмосферы в проходческих забоях с учетом работы пылеотсоса.....	54
2.4 Результаты анализа состава рудничной пыли, собранной при проведении шахтных исследований.....	68
2.5 Исследования по определению коэффициента запыленности рудничной атмосферы призабойной части тупиковой горной выработки.....	79
Выводы.....	83
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ И РЕЖИМОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ.....	85
3.1 Порядок и требования к построению виртуальных аналогов подземных аэро- пылединамических систем и расчётных сеток.....	86
3.2 Выбор начальных и граничных условий численных расчетов....	91
3.3 Анализ результатов моделирования.....	95
3.4 Верификация полученных результатов трехмерного моделирования с данными шахтных исследований.....	101
Выводы.....	103
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЯХ....	105
4.1 Разработка матриц взаимного влияния производительности пылеотсоса и поступающего в забой воздуха.....	105
4.2 Разработка критериев оценки эффективности работы систем пылеотсоса с учетом организации проветривания проходческого участка.....	109
4.3 Разработка методики системного проектирования	115

проветривания (включающей элементы искусственного интеллекта) с учетом пылеотсасывающих установок, встраиваемых в проходческие комбайны.....	
4.4 Предложения по повышению эффективности проветривания проходческого забоя по пылевому фактору.....	130
Выводы.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Угольная отрасль России поступательно развивается, спрос на уголь остается стабильным, даже несмотря на пандемию и общий мировой спад энергопотребления. Истощение запасов нефти и газа, а также развитие углехимии способствуют расширению угольной отрасли.

С повышением производительности труда, внедрением компьютерных технологий, искусственного интеллекта для обработки больших массивов данных, созданием новых технических средств, автоматизацией и роботизацией всех процессов растет необходимость научного обоснования применяемых решений по безопасности ведения горных работ.

Аэрологическая безопасность горных предприятий, как один из ключевых элементов безопасности, складывается из комплекса мероприятий и решений по организации проветривания для всех этапов развития угольных шахт. Проходка горных выработок является одним из основных этапов развития горных работ и подготовки месторождения к добыче угля.

В настоящее время аэрологическая безопасность проходческих участков преимущественно складывается из обеспечения безопасных условий труда по газовому и пылевому факторам.

Условия труда рабочих, занятых подземной добычей угля, являются вредными. При этом лидирующее место по степени вредности принадлежит проходчикам и горнорабочим очистного забоя. К вредным производственным факторам при подземной добыче угля относятся аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия, которые приводят к росту профзаболеваемости.

Снижение концентрации вредных газов до установленных норм достигается реализацией аэрологических и газодинамических способов (режимами, схемами и способами проветривания с выбором соответствующего вентиляционного оборудования и средств контроля,

дегазацией, газоотсосом и т.п.). А снижение запыленности рудничной атмосферы достигается путем применения локальных мероприятий, включающих различные виды пылеподавления и пылеотсос. Для увеличения темпов проходки горных выработок применяют современные высокотехнологичные проходческие комплексы, которые позволяют ставить мировые рекорды по скорости проходки – до 1650 м на комбайне Sandvik MB670 за год (на шахте «Листвяжная»). Это в свою очередь, приводит к образованию большего количества угольной пыли (зафиксированные максимально разовые концентрации до 191 мг/м^3 с размером пылинок до 1 мм), т.е. к возрастанию роли пылевого фактора в обеспечении аэрологической безопасности. При этом взрывы с участием угольной пыли приводят к тяжелым последствиям с большим числом погибших и пострадавших, порой приводящими к потере месторождений. Горнорабочие проходческих забоев чаще остальных страдают заболеваниями верхних и нижних дыхательных путей пылевой этиологии.

Значительный вклад в исследования динамики и свойств аэрозолей, комплексного обеспыливания и пылевзрывобезопасности в шахтах внесли выдающиеся ученые: академик А.А. Скочинский, Л.И. Барон, В.Н. Воронин, Л.Д. Воронина, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, И.Г. Ищук, Б.Ф. Кирин, А.И. Ксенофонтова, С.Я. Хейфиц, А.С. Бурчаков, В.В. Кудряшов, Г.И. Коршунов, К.П. Медников, П.И. Мустель, М.И. Нецепляев, С.Н. Подображин, Г.А. Поздняков, П.М. Петрухин, С.Б. Романченко, О.В. Скопинцева, А.А. Трубицын, Н.А. Фукс, Ю.В. Шувалов, а также зарубежные исследователи В. Цибульски, К. Лебецки, П. Райст, Й. Михелис, S. Arya и другие авторы.

Сегодня на угольных шахтах России при проходке горных выработок применяют комплекс мероприятий для снижения уровня запыленности рудничной атмосферы и пылеотложения. Все разрабатываемые и внедряемые решения имеют цель предотвращения возможных взрывов и улучшения условий труда горнорабочих. К данным мероприятиям относятся системы орошения (с подачей воды под рабочий орган в местах разрушения массива и

в виде водяных завес в местах перегрузки горной массы), а также системы пылеотсосов. При использовании воды для повышения смачиваемости часто в нее добавляют поверхностно-активные вещества. Все решения рассматриваются с учетом режима проветривания тупикового забоя, а также применяемых вентиляционных средств и устройств. Увлажнение массива вследствие трудоёмкости процесса применяется редко.

В последующем получено развитие направления мероприятия по обеспыливанию рудничной атмосферы путем применения систем аспирационного обеспыливания. В настоящее время ни методическими, ни нормативными документами не регламентированы параметры работы таких систем.

Сейчас все ведущие компании по изготовлению проходческих комбайнов встраивают в них системы пылеотсоса. При этом расчет совместной работы системы проветривания и систем пылеотсоса не проводится.

Поэтому тема диссертации посвящена разработке способа научного обоснования оптимальных параметров аспирационного обеспыливания проходческих забоев угольных шахт.

Цель работы: научное обоснование выбора эффективных параметров систем аспирационного обеспыливания (пылеотсосов), встраиваемых в проходческие комбайны, для снижения запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок.

Идея работы заключается в том, что для выбора параметров работы систем аспирационного обеспыливания (пылеотсосов) необходимо использовать искусственный интеллект, который для виртуальных аналогов аэродинамических систем тупиковых забоев, позволяет в заданном диапазоне влияющих факторов автоматически определять эффективные режимы, схемы и способы их применения.

Основные задачи исследования:

- провести анализ существующих мероприятий по снижению запыленности рудничной атмосферы подготовительных забоев;
- исследовать эффективность схем, способов и режимов вентиляции подготовительных забоев, в которых применяются системы пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны;
- исследовать основные параметры, определяющие эффективность систем пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны;
- провести шахтные испытания систем пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны, для выявления параметров, определяющих эффективность снижения запыленности и уточнения действующих методик;
- разработать способ определения эффективных параметров работы системы пылеотсосов с учетом системы проветривания проходческих забоев.
- разработать рекомендации по системному проектированию проветривания проходческих забоев с учетом встраиваемых в комбайн пылеотсасывающих систем.

Научная новизна:

1. Разработаны критерии эффективности работы систем пылеотсосов, позволяющие определить эффективные режимы совместной работы скрубберов и вентиляторов местного проветривания в тупиковом забое;
2. Предложена классификация аспирационных систем снижения уровня запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок (при их проходке);

3. Установлено значение коэффициента (k_v) снижения уровня запыленности $k_v = 0,01041$ в уравнении М.И. Нецепляева $c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \frac{\Delta x}{v_{\text{возд}, x}}}$ для условий угольных шахт Кузнецкого бассейна;
4. Разработан алгоритм использования искусственного интеллекта для обоснования параметров систем аэрологической безопасности проходческого забоя с учетом совместной работы систем вентиляции и систем пылеотсоса;
5. Научно обоснованы факторы, влияющие на эффективность работы скруббера и возможные диапазоны их изменения;
6. Установлена величина критического прироста депрессии пылеотсасывающей установки Ноeko Vent Scrubber (HCN) CFT, равная 15 %, при которой необходимо производить очистку фильтров;
7. Разработаны матрица взаимного влияния производительности пылеотсоса и поступающего в забой воздуха и матрица взаимного влияния качества пылеочистки отработанного воздуха от производительности скруббера и воздуха, поступающего в забой.

Основные защищаемые положения:

- 1 Эффективность аспирационного пылеудаления при нагнетательном способе проветривания тупиковой горной выработки зависит от разработанных критериев:
 - критерию очистки воздуха от пыли ($K_{\text{ск1}}$), при достижении им значения 0,
 - критерию отсутствия рециркуляции ($K_{\text{ск2}}$) при достижении им значения 1.
- 2 Использование разработанного алгоритма работы искусственного интеллекта позволяет обосновать эффективные параметры аспирационного обеспыливания проходческих забоев угольных шахт.

- 3 Коэффициент снижения уровня запыленности (k_v) в уравнении М.И. Нецепляева $c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.х}}}}$, учитывающий диффузию пыли в вентиляционном потоке для инженерных расчетов уровня запыленности на произвольном расстоянии от плоскости забоя для условий угольных шахт Кузнецкого бассейна в расчётах может быть принят равным 0,01041. Данный коэффициент учитывает физические свойства пыли и может быть использован для расчета распределения концентрации пыли вдоль выработок в условиях использования комплексного обеспыливания (орошения и пылеотсоса) при проектировании новых проходческих участков;

Методы исследований:

1. Шахтные исследования динамики пылевых аэрозолей при применении систем аспирационного обеспыливания;
2. Шахтные исследования эффективности внедрения современных систем пылеотсоса Hoesco Vent Scrubber (HCN) CFT;
3. Компьютерное численное моделирование распределения пыли в призабойном пространстве проходческих забоев, с применением системного проектирования, реализованного в ANSYS Design Explorer;
4. Электронно-микроскопические методы исследования дисперсного состава аэрозолей Analysette 22 Compact;
5. Весовой метод определения концентрации пыли.

Достоверность научных положений подтверждается:

- значительным объемом шахтных экспериментальных исследований (8 шахт, 23 проходческих забоя);
- повторяющимися значениями измеренных параметров, полученных при работе системы аспирационного обеспыливания, встраиваемой в проходческие комбайны;

- большим объемом компьютерного моделирования процессов перемещения и осаждения аэрозолей с твердой дисперсной фазой в вентиляционных потоках;
- положительным эффектом от внедрения современных систем аспирации и всасывающего способа вентиляции подготовительных забоев на угольных шахтах.
- Успешным внедрением результатов исследований в корпоративные нормативные документы и их практической апробацией;

Практическая значимость работы заключается:

1. В использовании разработанных научно-обоснованных решений по применению встраиваемых в проходческие комбайны систем пылеотсоса на шахтах АО «СУЭК» в качестве одной части концепции пылевзрывобезопасности горных выработок (лава – подготовительные забои – транспортные и технологические выработки);
2. В применении компьютерного моделирования с элементами искусственного интеллекта для решения задач выбора оптимальных параметров работы пылеотсасывающих установок;
3. Во внедрении предложенных технических средств и технологий аспирационного пылеудаления (пылеотсосов 3-х различных типов) на 4-х шахтах АО «СУЭК» в 10 забоях;
4. В обосновании состава и разработке опытно-промышленных версий систем всасывающего и нагнетательно-всасывающего проветривания подготовительных выработок;
5. Во включении результатов исследований в отраслевые и корпоративные нормативные документы, используемые на шахтах практически.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных

научно-практических конференциях и форумах: Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», на научном симпозиуме МГГУ «Неделя горняка – 2016, 2020»; III Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке», научных семинарах кафедры «Безопасность производств» Санкт-Петербургского горного университета и кафедры «Безопасность и экология горного производства» Горного института НИТУ «МИСиС».

Реализация результатов работы. Полученные результаты и выводы по диссертационной работе использованы при внедрении техники и технологий на 10 шахтах компании АО «СУЭК», а также в Стандартах Компании АО «СУЭК» - «СК 16.2.40. Методы установления технически достижимых уровней запыленности воздуха»; «СК 16.2.41. Методы контроля параметров пылевзрывобезопасности выработок различного производственного назначения»; «Временная методика расчета увеличенных объемов осланцевания горных выработок шахт ОАО «СУЭК», предложениях по корректировке состава ТЗ на проектирование систем обеспыливания рудничного воздуха.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; обобщении и анализе данных по запыленности воздуха и дисперсному составу пыли на шахтах Кузбасса в высокопроизводительных проходческих забоях с системами пылеотсоса, встроенными в комбайны; обосновании направлений и методов решения поставленных задач; проведении натурных измерений; а также численного компьютерного моделирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи

опубликованы в журналах зарегистрированных в базе данных Scopus, выпущено 3 монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц и 84 рисунка. Библиография включает 88 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ АСПИРАЦИОННОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ ЗАБОЕВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

1.1 Динамика развития угледобывающей промышленности

В мире добыча угля подвержена некоторым колебаниям при общей тенденции к суммарному росту. Период с 1993 по 2018 года характеризовался устойчивым ростом до 4 млрд тонн эквивалент нефти (1 ТОЕ = 41,868 ГДж = 11,63 МВт·ч) (рисунок 1.1) [1], прирост к уровню 2018 года составил 4,3 % по отношению к 2017 году. При относительно небольшом снижении в кризисные периоды за последние 10 лет наблюдается рост объема добычи угля на 1,3 %.

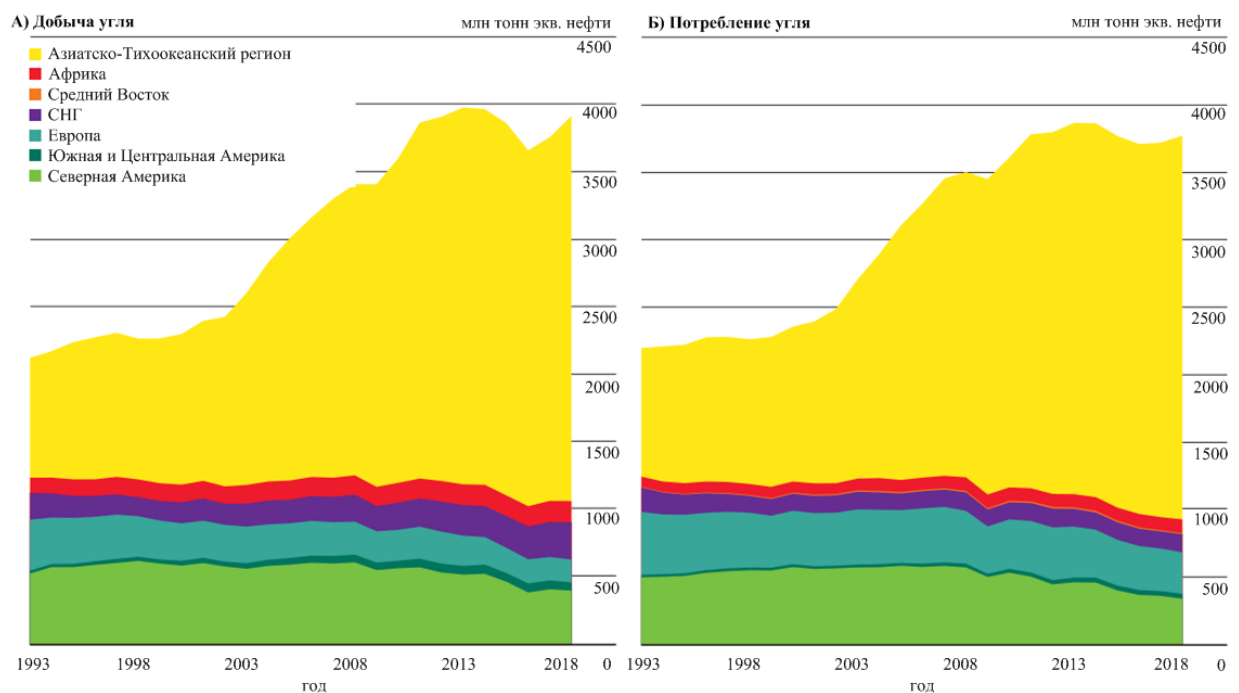


Рисунок 1.1 – Динамика мировой добычи угля с 1993 по 2018 год [1]

Максимальные объемы добычи достигнуты в Китае, где в 2018 г. добыто более 1828,8 млн тонн нефтяного эквивалента. США находятся на втором месте в мире по объему добычи угля (364,5 млн тонн нефтяного эквивалента в 2018 г.) [1]. По итогам 2018 года, Россия по суммарным объемам угледобычи занимала шестое место в мире [1] – 220,2 млн тонн

нефтяного эквивалента. Угольная промышленность РФ, являясь одной из основных отраслей топливно-энергетического комплекса страны, добывает около 5,0 % угля от общемировых объемов. При этом в России наблюдается устойчивый рост по добыче угля при низком уровне его внутреннего потребления угля (88 млн тонн нефтяного эквивалента в 2018 г.).

По состоянию на 24.12.2018 г. в России зарегистрировано:

- 97 шахт, из которых на 59 предприятиях осуществляется добыча угля и 37 предприятий находятся в состоянии ликвидации, консервации или строительства;
- 279 разрезов и 107 объектов обогащения угля.

Суммарная добыча каменного угля и лигнита (бурый уголь) в РФ за 2000-2019 гг. выросла более чем на 58,0 % или на 150,5 млн тонн (рисунок 1.2).

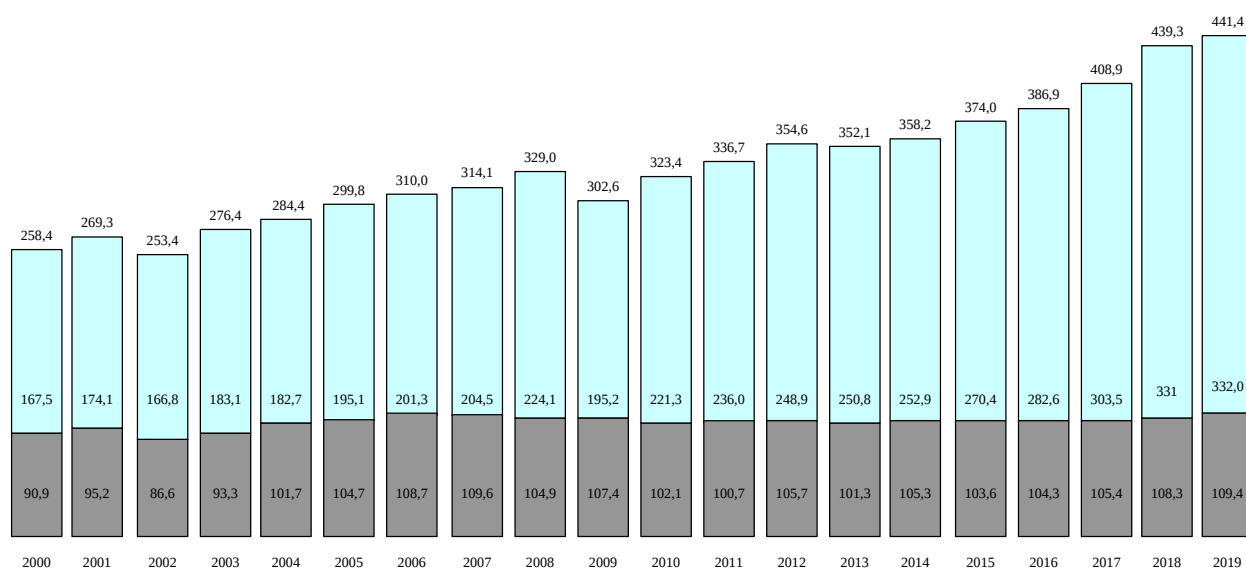


Рисунок 1.2 – Динамика добычи угля открытым (голубой цвет) и подземным (серый цвет) способом в РФ (млн тонн) [2]

Добыча угля в РФ ведется в основном 18 компаниями, при этом крупнейшим производителем – компанией АО «СУЭК» (27,3 % угледобычи РФ) в 2019 г. было добыто почти 100 млн тонн угля (рисунок 1.3).

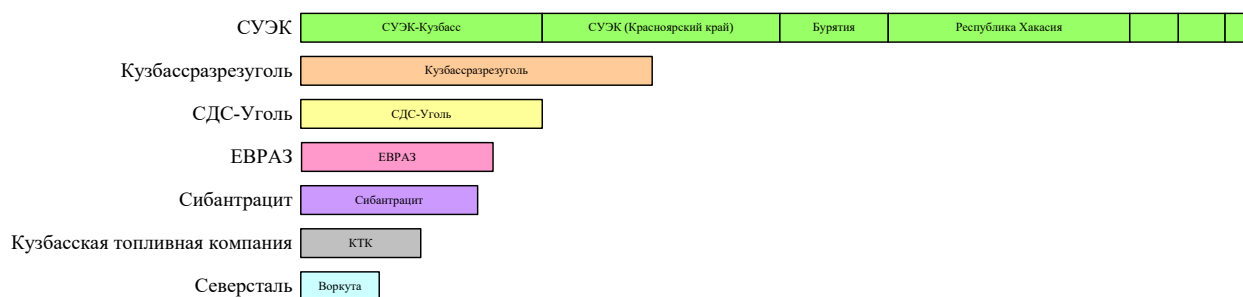


Рисунок 1.3 – Объемы добычи угля крупнейшими компаниями России за 2019 г. (млн тонн) [2]

На угольных шахтах, входящих в АО «СУЭК», в период с 2018-2020 гг. внедрено 40 проходческих комбайнов Sandvik со встроенной системой пылеотсоса. На других шахтах России наблюдается сокращение затрат на закупку современного оборудования, в том числе современных пылеотсасывающих установок, идут массовые сокращения по добыче угля и проходке горных выработок в связи с резким падением цен на уголь с сентября 2018 года (~80 \$ за тонну) по апрель 2020 год (~34 \$ за тонну) [34]. Применение современных проходческих комплексов со встроенной системой обеспыливания и большие темпы проходки горных выработок обусловили выбор шахт АО «СУЭК» для проведения исследований.

1.2 Динамика аварийности и профзаболеваемости, в том числе обусловленная пылевым фактором

В процессе добычи и переработки угля возникают два основных аспекта пылевой опасности:

- взрывоопасность угольной пыли, представляющей собой угрозу для жизни горнорабочих, вывода из строя оборудования, отдельных выработок и всей шахты в целом;
- опасность развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии при работе в среде с повышенными концентрациями пыли в течение длительного времени.

Во всех угледобывающих странах наиболее представительным показателем уровня безопасности горного производства является относительный показатель смертельного травматизма ($N_{\text{отн.}}$), определяемый как отношение числа смертельно травмированных работников ($n_{\text{см.т.}}$, чел.) к объему добычи ($A_{\text{год}}$, млн т/г.) (рисунок 1.4).

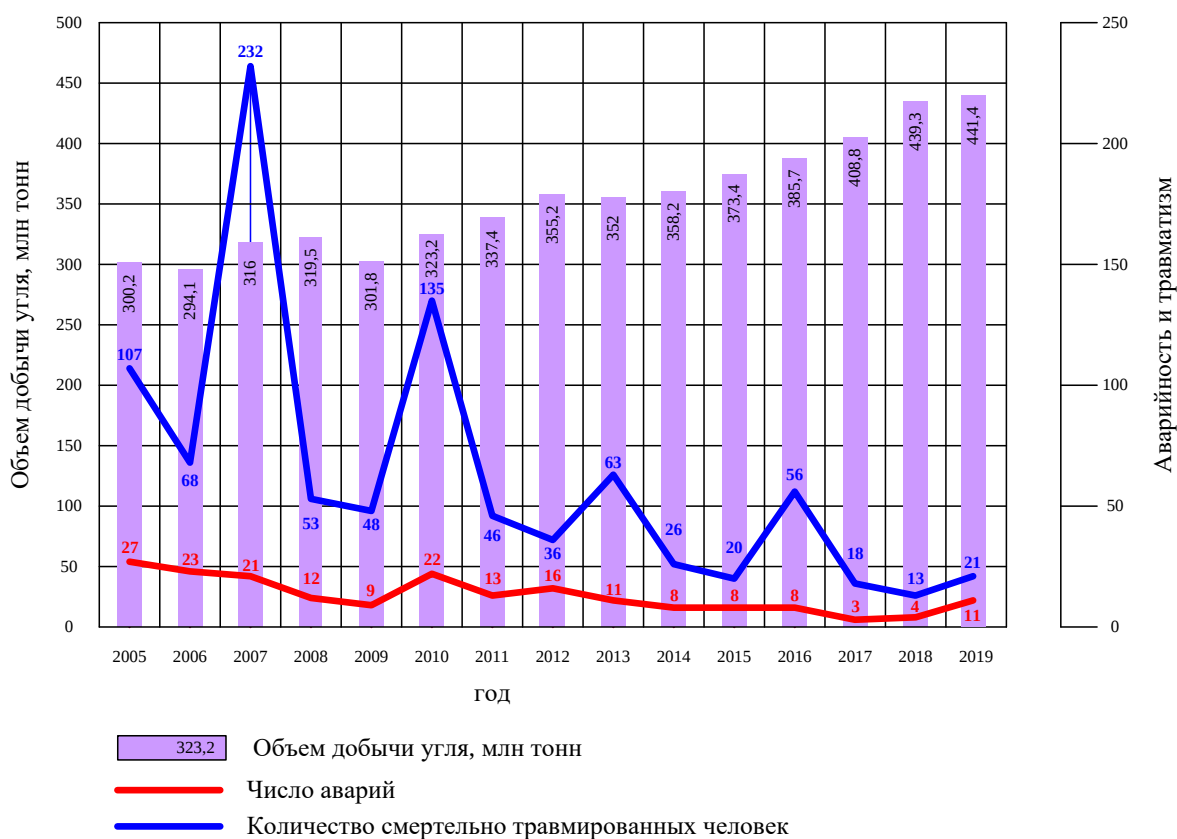


Рисунок 1.4 – Динамика объемов добычи угля и аварийности на шахтах РФ

Показатель $N_{\text{отн.}}$ за последние 12 лет для наиболее опасного подземного способа добычи угля существенно возрастал в 2007 ($N_{\text{отн.}} = 0,73$), 2010 ($N_{\text{отн.}} = 0,42$), 2013 ($N_{\text{отн.}} = 0,18$) и 2016 гг. ($N_{\text{отн.}} = 0,15$) [3], что обусловлено произошедшими на шахтах взрывами с участием угольной пыли в указанные годы.

Как видно из статистических данных, состояние промышленной безопасности в угольной отрасли РФ остается достаточно напряженным. Годы с относительно невысокой аварийностью (2006, 2009, 2012, 2015)

сменяются годами с резкими всплесками аварийности и смертельного травматизма (2004, 2007, 2010, 2013, 2016).

Значения аналогичного показателя $N_{\text{отн.}}$ в странах с интенсивной добычей угля (США, Австралия) не превышают 0,05, для европейских угледобывающих стран (Германия, Польша) средние значения $N_{\text{отн.}}$ составляют соответственно 0,15 и 0,25 чел./млн тонн.

По статистике [3] чаще всего на угольных шахтах России происходят пожары (33%), на втором месте по количеству находятся взрывы метана и угольной пыли (26 %), далее следуют обрушения (рисунок 1.5).

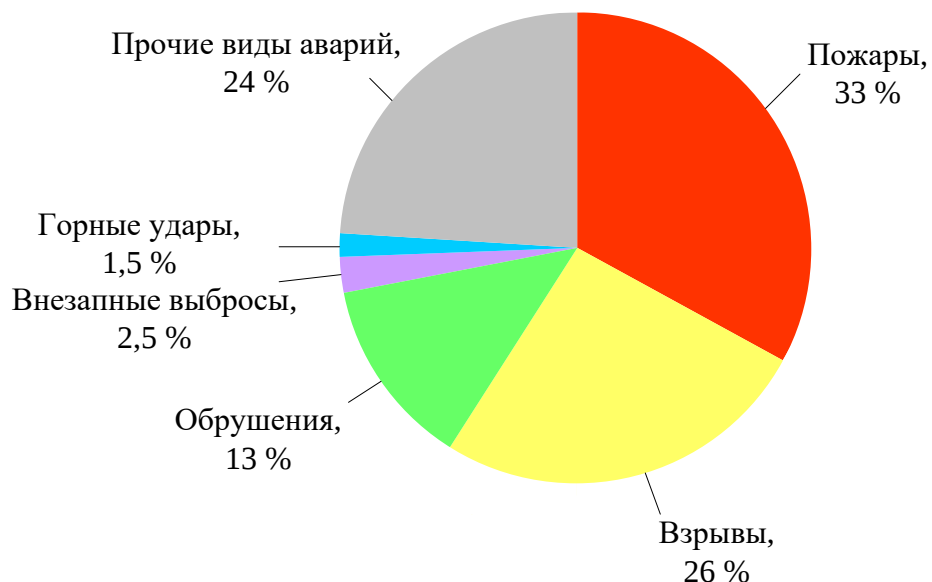


Рисунок 1.5 – Соотношение видов аварий в шахтах России за период 2000-2017 гг.

Последствия взрывов являются катастрофическими [4]: за период с 1991 (начало реструктуризации угледобывающей отрасли) по 2019 гг. произошло не менее 200 взрывов метана и угольной пыли, в результате которых погибло более 800 горнорабочих, в том числе и горноспасатели. Общее число пострадавших составило более 2000 человек.

Присутствие в воздухе взвешенной угольной пыли снижает нижний предел взрываемости метана, при этом пыль может привести к расширению ограниченной вспышки метана и взрыву, носящему характер общешахтной

аварии. Участие пыли во взрыве характеризуется высокой температурой, выделением значительных объемов оксида углерода, высоким избыточным давлением во фронте ударной взрывной волны, в десятки и сотни раз превосходящим безопасные для человека значения. Наличие в горных выработках взвешенной или отложившейся пыли, превосходящей ее нижний предел взрываемости, при воспламенении приводит к эффекту динамически расширяющегося объемного взрыва. Это резко выделяет взрывы пылеметановых аэрозолей в более опасную сторону по сравнению с взрывами (вспышками) ограниченного объема метана.

Предотвращение взрывов рудничной пыли, как одного из основных факторов промышленной безопасности, определяет актуальность борьбы с пылью, а также необходимость исследования процессов витания, седиментации, коагуляции (иными словами динамических состояний) частиц, образованных при диспергации вещества, т.е. аэрозолей с твердой дисперсной фазой.

Анализ воздействия факторов производственной среды на здоровье работников, занятых на подземных работах, был проведен по данным Клинского института охраны и условий труда [7] по данным специальной оценки условий труда, проверок Ростехнадзора, Рострудинспекции и Роспотребнадзора. Исследования были проведены согласно данным, собранным в период с 2011 по 2017 гг. по 30 ведущим угольным компаниям АО «СУЭК», АО «Воркутауголь», АО «СДС-Уголь», ПАО «ЮК» и др. При проведении анализа рассматривались восемь основных профессий, связанных с подземной добычей угля, в том числе:

- проходчик (721 рабочее место),
- машинист буровой установки (148 рабочих мест),
- машинист горных выемочных машин (336 рабочих мест),
- машинист электровоза подземный (44 рабочих мест) и др.

По данным исследований у проходчиков, как и у горнорабочих очистного забоя, условия труда наиболее вредные по сравнению с другими

профессиями (соответственно 78,9 % и 82,2 % рабочих мест с классом условий труда 3.3). При этом у проходчиков удельный вес рабочих мест, отнесенных к вредным условиям труда по фактору аэрозоли преимущественно фиброгенного действия, - 41,6 %, у горнорабочих очистного забоя - 22,3 %. В целом свыше 90 % суммарной нагрузки вредными факторами рабочей среды и трудового процесса приходится на аэрозоли преимущественно фиброгенного действия - 25,61 % (рисунок 1.6).

Угольными шахтами на анализ было представлено 674 случая профессиональных заболеваний, которые были выявлены у 654 работников, (у 20 работников одновременно было выявлено два профессиональных заболевания). Второе место в структуре профессиональных заболеваний (28,2%) после заболеваний, связанных с физическими перегрузками и функциональным перенапряжением отдельных органов и систем, в структуре профессиональных заболеваний (28,2%) заняли профессиональные бронхиты и профессиональная обструктивная болезнь легких, связанные с воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия. В эту группу профессиональных заболеваний вошли:

- хронический пылевой необструктивный бронхит,
- хроническая обструктивная болезнь легких,
- пневмокониозы (силикоз, антракосиликоз).

Профессиональные заболевания, связанные с воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия, в соответствии с Приказом № 417н [8] относятся к весьма опасным и распространенным на угольных шахтах России (коды заболевания по международной классификации болезней МКБ-10 J41.0, J44.8, J62.8).

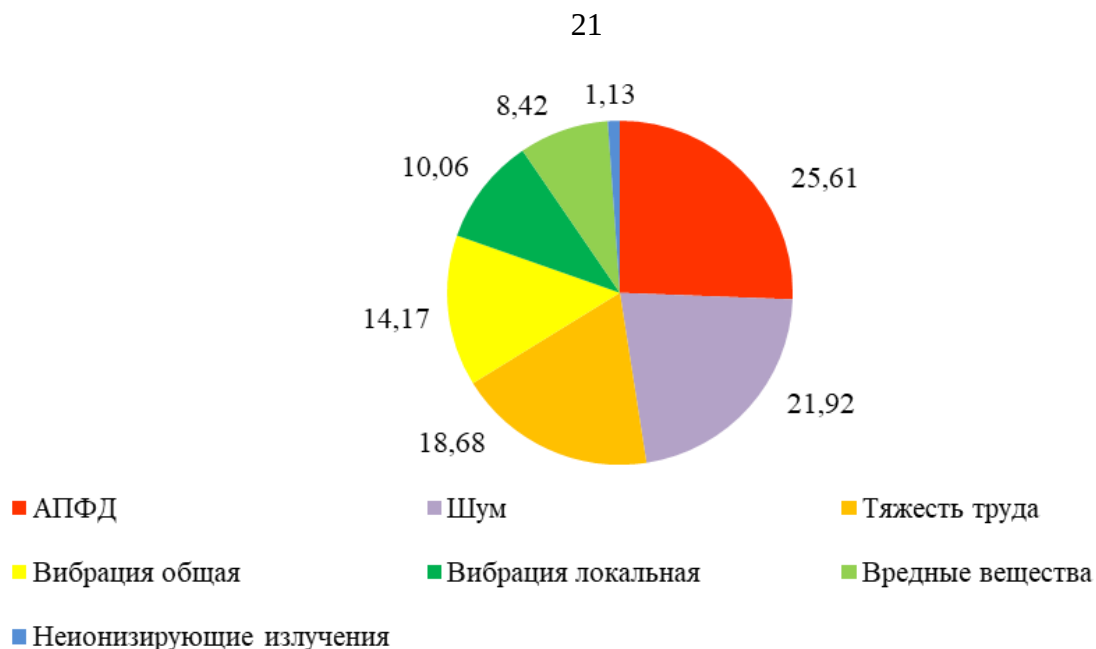


Рисунок 1.6 – Структура распределения по влиянию на горнорабочих вредных факторов производственной среды и трудового процесса за период 2011-2017 гг.

Поэтому при интенсивной проходке горных выработок важным вопросом является исследование пылединамических процессов в шахтах, а также методов и средств по снижению запыленности рудничной атмосферы.

1.3 Обзор основных современных мероприятий, применяемых для снижения уровня запыленности рудничной атмосферы при ведении проходческих работ

В настоящее время на угольных шахтах применяются комплексные мероприятия по снижению запыленности в горных выработках. Выбор мероприятий осуществляется исходя из имеющихся возможностей на горном предприятии (от простых до высокотехнологичных решений).

Наиболее распространенным способом снижения запыленности при ведении проходческих работ является орошение. Оно осуществляется в местах работы исполнительного органа проходческого комбайна (рисунок 1.7) и местах погрузки и перегрузки.

Данное решение весьма эффективно при отлаженной работе систем подачи воды и ее распыления для пылеподавления. Однако форсунки,

расположенные на шнеке или баре, периодически выходят из строя по причине залипания отверстий. Также проведенные исследования на шахтах показали недостаточную смачиваемость пылинок. Отдельно в рудничной атмосфере находятся две составляющие – мелкодисперсная вода и витающая угольная пыль. Рабочее место горнорабочих (призабойная часть) находится в облаке тумана с пылинками. Работа в таких условиях становится весьма затруднительной: высокая влажность, запыленность и тяжелый физический труд снижают производительность труда, повышают риск профессиональных заболеваний, приводят к потере концентрации, что в совокупности существенно повышает уровень опасности. Противопылевые респираторы при высокой влажности быстрее забиваются, что увеличивает сопротивление дыхания. Горнорабочие в таких случаях или перестают использовать средства индивидуальной защиты от пыли, или отключают системы орошения, или ищут места, где за счет аэродинамики создается область с воздухом без пыли и капель воды (непосредственно под воздухопроводом при нагнетательной схеме проветривания).

Форсунки, расположенные на баре комбайна Sandvik



Рисунок 1.7 – Фотография месторасположения форсунок на баре проходческого комбайна Sandvik

Также в горных выработках применяют отдельные системы орошения мелкодисперсной водой. Трубопровод с форсунками располагают под

кровлей в местах интенсивного пылевыведения (в зонах разрушения массива и перегрузки (рисунок 1.8) или в произвольном сечении горной выработки (рисунок 1.9)). Данный способ имеет аналогичные недостатки, описанные чуть выше. Нормами в России регламентируется давление в трубопроводе у водяной завесы, составляющее не менее 0,5 МПа, а для туманообразующей – не менее 1 МПа [13]. По требованиям [13] при уровне запыленности более 150 мг/м³ должны быть организованы обеспыливающие завесы, расстояние от забоя горной выработки и от места перегруза горной массы с комбайна не регламентируется нормативными документами.

Трубопровод и форсунка, размещенные под кровлей горной выработки, для орошения места перегрузки горной массы в самоходный вагон



Рисунок 1.8 – Фотография месторасположения трубопровода и форсунки, размещенные под кровлей горной выработки



Рисунок 1.9 – Фотография работы системы обеспыливания [28]

В настоящее время на угольных шахтах, применяют пылеотсасывающие установки или скрубберы. Пылеотсасывающие установки располагают на проходческих комбайнах или в горных выработках. Скрубберы встраивают в единую систему с проходческим вентилятором или располагают отдельно.

Все современные проходческие комбайны имеют конструктивные решения позволяющие установить на них пылеотсасывающие системы. У проходческого комбайна Sanvik MB670-1LN пылеотсасывающая система устанавливается сверху (рисунок 1.10). При работе проходческого комбайна резиновые щиты, прикрепленные к временной крепи проходческого комбайна, подняты. Забор части воздуха осуществляется в верхней части в непосредственной близости от плоскости забоя. Однако при такой конструкции пыль с мелкими каплями воды частично попадает за ограждающие щитки.

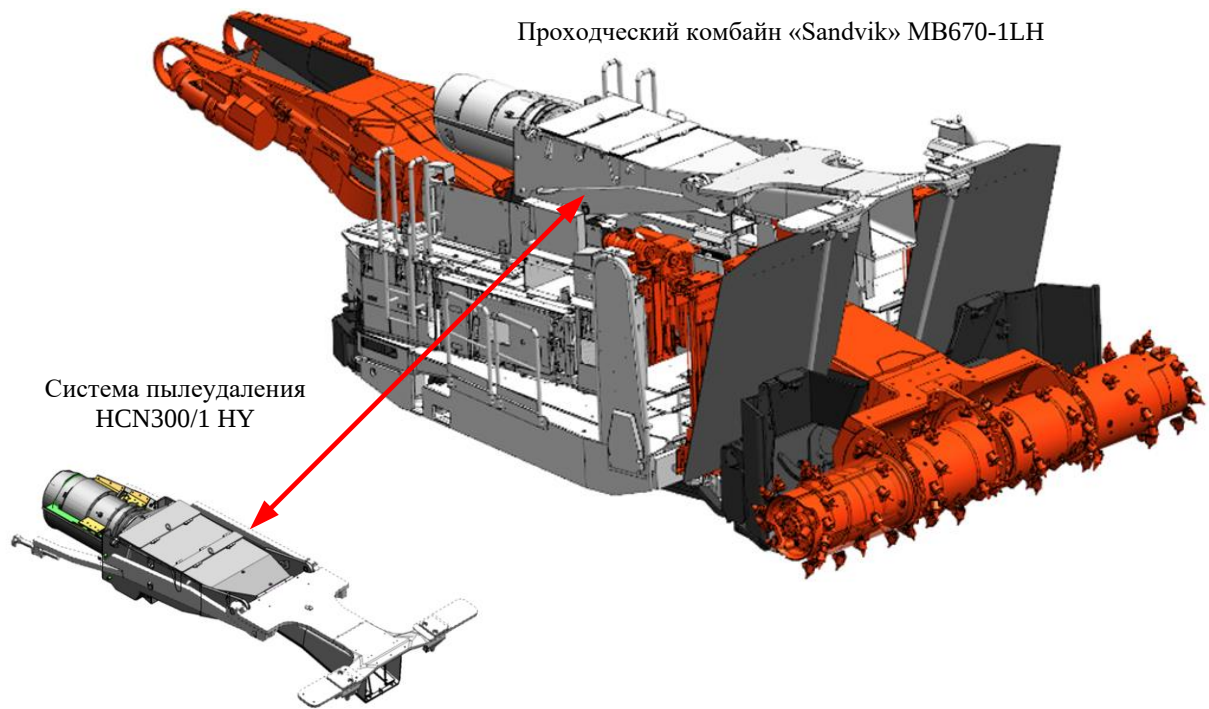


Рисунок 1.10 – Система встроенного пылеудаления проходческого комбайна Sandvik MB670-1LN

Похожий вариант размещения пылеотсасывающей установки, только со смещением влево, можно видеть на установке Sandvik MB670-1 (рисунок 1.11). Здесь также предусмотрено отверстие под воздухозабор. Односторонний всас, однако, не позволяет равномерно забирать запыленный воздух, а при условии различного размещения воздухоподающего трубопровода делает применение описанной конструкции скрубберов менее эффективным.

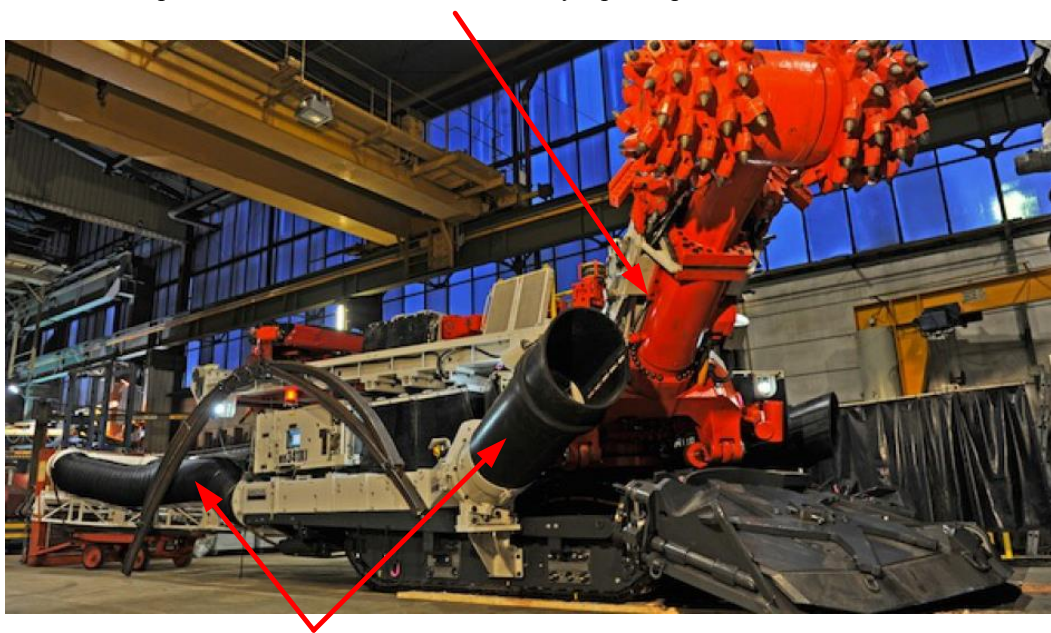
Второй тип размещения пылеотсасывающих патрубков можно увидеть на проходческом комбайне Sandvik MR-341 (рисунок 1.12). Воздухозаборные элементы здесь расположены в нижней части с двух сторон. Без наличия ограждающих щитков из-за аэродинамики в призабойной части так же, как и в первом варианте размещения элементов скруббера в зависимости от режима проветривания, часть запыленного воздуха попадает в места нахождения горнорабочих.



Рисунок 1.11 – Система встроенного пылеудаления проходческого комбайна Sandvik MB670-1

Третий тип встречающихся пылеотсасывающих установок представлен на рисунке 1.13. Здесь скруббер расположен перед щитками. Однако форсунки, установленные расположенные впереди, повышают влажность рудничной атмосферы в призабойной части.

Проходческий комбайн «Sandvik» с ударным рыхлителем - MR341



Система пылеудаления

Рисунок 1.12 – Система встроенного пылеудаления проходческого комбайна Sandvik MR-341

Пролодческий комбайн
Salz Werke AG

Скруббер CFT



Форсунки

Рисунок 1.13 – Система встроенного пылеудаления пролодческого комбайна
Salz Werke AG

У пролодческих комбайнов компании Komatsu – Joy 12HM31 и Joy 12HM31 опционально есть возможность установить скрубберы, забирающие запыленный воздух из забоя (рисунок 1.14 и 1.15) аналогично комбайнам Sandvik и со стороны бортов горной выработки.

В России на угольных шахтах применяются комбайны с установленными на них пылеотсасывающими установками, однако рекомендаций по режимам их работы в настоящее время нет.

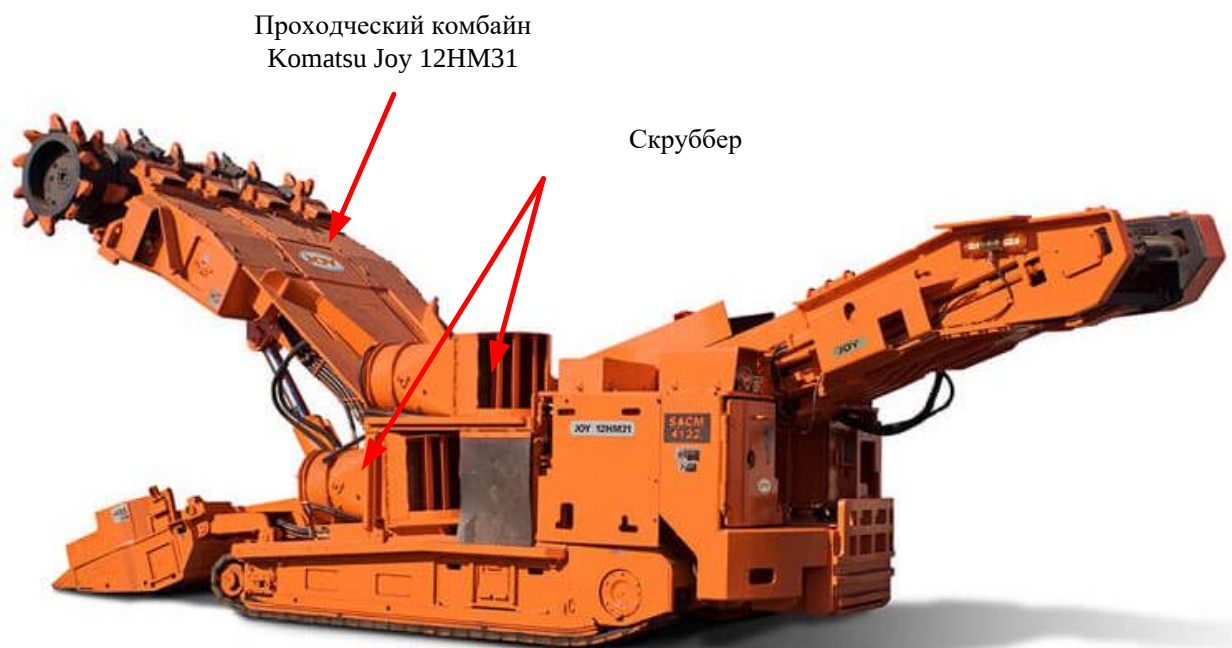


Рисунок 1.14 – Система встроенного пылеудаления проходческого комбайна Joy 12HM31 [26]

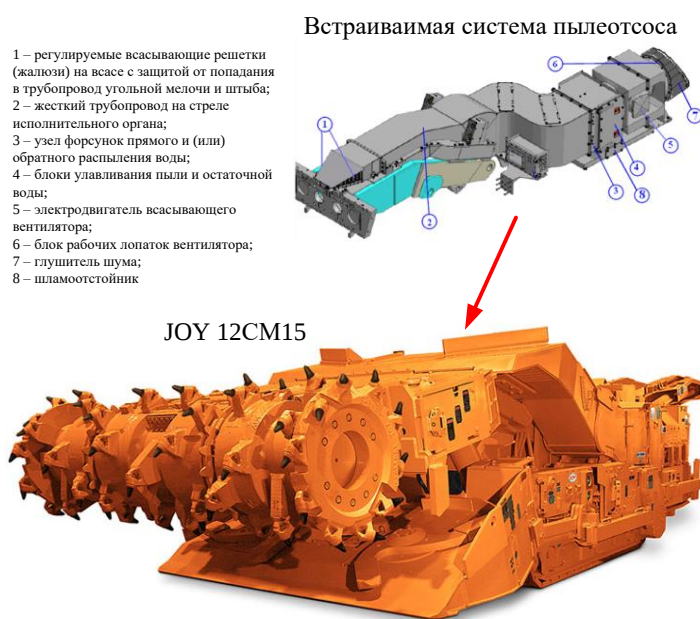


Рисунок 1.15 – Система встроенного пылеудаления проходческого комбайна Joy 12CM15 [24, 26]

Следующий тип пылеотсасывающих установок относится к стационарным. Они устанавливаются и работают как самостоятельные элементы вентиляционной сети со своим вентилятором и воздуховодом.

Стационарные пылеотсасывающие установки применяются как для обеспыливания призабойной части, так и для снижения уровня запыленности в местах пересыпки горной массы.

Скрубберы от Wet Scrubbers CFT мокрого принципа действия (рисунок 1.16) применяются для снижения уровня запыленности в местах пересыпки горной массы с одного конвейера на другой.



Рисунок 1.16 – Система пылеудаления Wet Scrubbers CFT в месте перегрузки угля с одной конвейерной ленты на другую [27]

Система сухого обеспыливания компании CFT применяется совместно с вентиляторами местного проветривания (рисунок 1.17).

Способ снижения запыленности, который редко рассматривается как основной, но при этом является основополагающим, это непосредственное проветривание. Оно включает в себя способ и схему проветривания, режимы работы вентиляционных устройств, параметры работы горного оборудования. При наличии всех существующих технологических решений по снижению величины витающей пыли в горных выработках (т.е. пылеулавливающих установок, устройств и конструкций) их эффективность во многом будет зависеть от проветривания в целом.

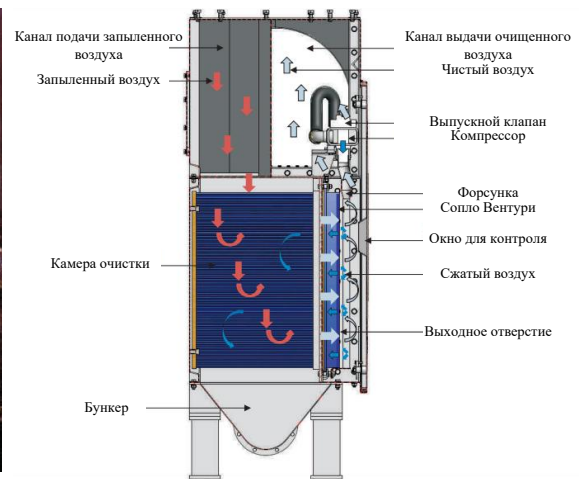


Рисунок 1.17 – Система сухого обеспыливания компании CFT (фотография и принципиальная схема работы) [27]

1.4 Фактический и технически достижимый уровень запыленности воздуха в подготовительных забоях угольных шахт

Пыль является одним из составных элементов аэрозолей. Аэрозоли – многофазные системы, включающие твердые или жидкие частицы, которые распределены в воздухе или других газах [5, 6].

Для горнодобывающей отрасли наиболее характерны аэрозоли, образованные вследствие витания в рудничной атмосфере мелких частиц диспергируемой (т.е. разрушаемой) горной массы: угля, руды или вмещающих пород – дисперсионные аэрозоли с твердой фазой. Такие дисперсионные аэрозоли состоят из индивидуальных или слабо агрегированных (объединенных в одно целое) частиц неправильной формы с широким диапазоном размеров [5, 6].

Кроме этого, в рудничной атмосфере присутствует диспергированная вода как следствие работы систем орошения.

Предельная допустимая концентрация витающей пыли регламентируется по санитарно-гигиеническим нормам в зависимости от ее состава (таблица 1.1) [25]. Как видно из представленных данных, максимальное значение запыленности для угольной пыли без содержания SiO_2 равно 10 мг/м^3 . Концентрация витающей пыли (при допущении отсутствия в ней SiO_2) в 3-18 раз выше допустимых значений при всех

существующих технических и технологических решениях, применяемых сегодня.

При этом данные нормы в современных условиях практически не могут быть выполнены, даже при применении комплексных мероприятий по обеспыливанию (см. табл. 1.2).

Таблица 1.1 – Уровни предельно допустимой концентрации витающей пыли [25]

Характеристика пыли	Величина предельно допустимой концентрации, мг/м ³
Пыль свинца и его неорганических соединений	0,01
Пыль с содержанием хромистых веществ (хроматов, бихроматов, хромового ангидрида)	0,01
Уран (растворимые соединения)	0,015
Уран (нерастворимые соединения)	0,075
Пыль марганца	0,3
Пыль, содержащая более 70 % свободной SiO ₂	1
Пыль, содержащая от 10 % до 70 % свободной SiO ₂	2
Асбестовая пыль и пыль смешанная, содержащая более 10 % асбеста	2
Пыль угольная и угольно-породная, содержащая более 10 % свободной SiO ₂	2
Пыль силикатов (тальк, оливин и др.), содержащая менее 10 % свободной SiO ₂	4
Пыль барита, апатита, фосфорита, содержащая менее 10 % свободной SiO ₂	5
Пыль глин, минералов и их смесей, не содержащая свободной SiO ₂	6
Пыль с оксидом алюминия в виде аэрозоля дезинтеграции (глинозем, корунд)	6
Пыль с оксидом железа и оксидами марганца до 3 %	6
Пыль угольная, содержащая до 10 % свободной SiO ₂	4
Пыль угольная, не содержащая свободной SiO ₂	10
Магнезитовая пыль	10

Основными параметрами, отражающими состояние пылевой обстановки на горнодобывающих предприятиях и, в частности, на угольных шахтах, а также эффективность применяемых мероприятий по снижению запыленности, являются среднесменная концентрация (ССК) пыли, максимально разовая концентрация (МРК) пыли и технически достижимый уровень (ТДУ) запыленности.

С целью анализа пылевой обстановки и эффективности проводимых мероприятий по комплексному обеспыливанию на восьми шахтах были проведены замеры максимально разовой концентрации пыли в подготовительных забоях. Средние значения МРК пыли и полученных на шахтах ТДУ запыленности приведены в таблице 1.1.

Исходя из представленных в таблице 1.2 данных, следует, что величины ТДУ запыленности на различных шахтах значительно отличаются друг от друга. Это связано прежде всего с существующими на шахтах горно-геологическими условиями, пылеобразующей способностью добываемых углей, применяемым горно-шахтным оборудованием и особенностями систем обеспыливания.

Полученные на шахтах технически достижимые уровни запыленности воздуха, несмотря на то что не превышают значений, установленных в соответствии с требованиями Инструкции по борьбе с пылью в угольных шахтах [13], существенно выше ПДК (1-10 мг/м³), что обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования систем обеспыливания.

Таблица 1.2 – Сопоставление ТДУ и МРК (I квартал 2017 г.) при проходке горных выработок

№ п/п	Шахта	Уровни запыленности рудничной атмосферы проходческого забоя, мг/м ³	
		ТДУ	МРК
1.	Им. С.М. Кирова	110÷240	61÷131
2.	Им. А.Д. Рубана	43÷210	40÷168
3.	Им. 7 Ноября	185	141
4.	Полысаевская	99÷214	58÷140
5.	Комсомольская	126÷238	71÷191
6.	Им. В.Д. Ялевского	155÷200	86÷131
7.	Талдинская Западная-1	168÷231	46÷106
8.	Талдинская Западная-2	211	43

Для совершенствования мероприятий по снижению уровня запыленности на первом этапе необходимо рассмотреть основные (базовые) принципы построения обеспыливающих систем и схем их применения.

1.5 Рассмотрение базовых принципов построения обеспыливающих систем

Основные способы очистки рудничной атмосферы от пыли [30, 35, 63, 64, 89]: вентиляционный, мокрый и сухой, которые по применяемым физическим явлениям подразделяют на следующие группы:

- гравитационный (пылеосадительные (пылеотстойные) камеры),
- инерционные (сухое пылеулавливание),
- мокрое пылеулавливание или промывка воздуха (орошение) распыленной водой (с ПАВ и без них),
- электроочистка и др.

Рассматриваемые установки пылеочистки (скрубберы) относятся к мокрым пылеулавливающим системам.

В пылеосадительных камерах основной принцип состоит в резком уменьшении скорости движения воздуха при входе его из воздухоприводного канала в пылеосадительной камеру. Достигается это путем придания сечению камеры (перпендикулярному потоку воздуха) значительных размеров по сравнению с сечением воздухоприводного канала. Скорость воздуха должна быть настолько мала, чтобы собственный вес пылинок, т.е. сила, действующая вертикально вниз, складываемая с горизонтальной силой уноса пылинки движущимся воздухом, была достаточной для того, чтобы пылинки успели осесть на дно камеры раньше, чем воздух покинет ее.

Пыль, осевшую на дно камеры, движущемуся с малой скоростью потоку воздуха труднее взметывать и вновь уносить вследствие трения и сил притяжения пылинок к поверхности дна и друг к другу.

При ведении проходческих работ в рудничную атмосферу попадают пылинки различной крупности и различной плотности (из разных пород). Так

как вес пылинки представляет собой вертикальную силу, которая влечет пылинку осесть на дно отстойной камеры, наиболее крупные пылинки осядут раньше более мелких. Пылинки, имеющие меньший удельный вес, осядут гораздо позже, чем пылинки с большим удельным весом.

Момент достижения пылинки дна камеры можно считать окончательной остановкой частицы. Длина камеры должна быть такой, чтобы наиболее длинная траектория, т.е. наиболее легких пылинок, подлежащих осаждению, уместилась с некоторым запасом в длине отстойной камеры. Отсюда следует, что значительное поперечное сечение отстойной камеры должно достигаться не за счет высоты, а за счет ширины. Для того чтобы вся ширина камеры была задействована потоком запыленного воздуха в целях уменьшения скорости его движения необходимо путем конструктивных мер осуществить возможное равномерное распределение воздуха по ширине камеры и как можно ближе к месту входа в нее воздуха из воздухопроводного канала. Это достигается с помощью направляющих распределительных вертикальных стенок (рисунок 1.18).

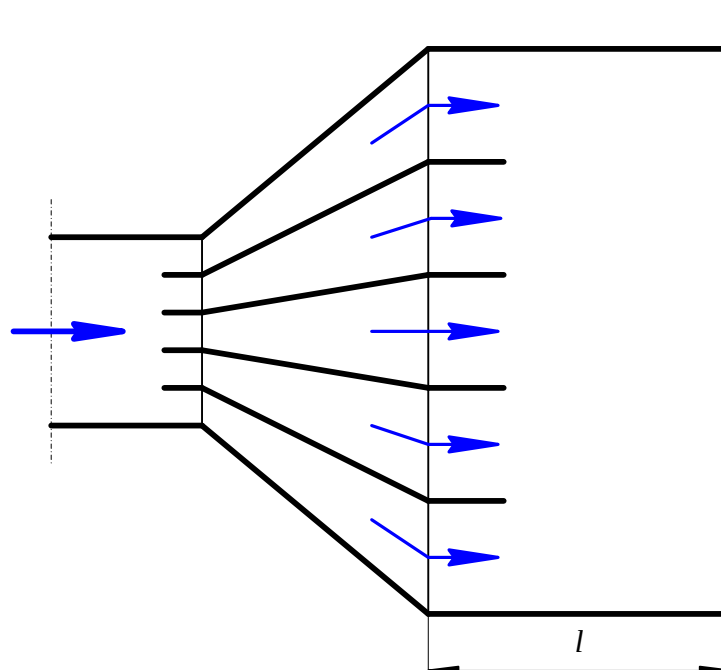


Рисунок 1.18 – Условная схема пылеосадительной камеры

Для ориентировочной оценки размеров пылеосадительные камеры с целью анализа возможности применения таких систем в горных выработках

рассмотрим расчет ее параметров (длины l и ширины b). Расчетная схема приведена на рисунке 1.19, высоту камеры обозначим как h , скорость горизонтального движения воздуха по камере $v_{\text{в}}$, скорость вертикального падения пылинки – $v_{\text{п}}$. Объем воздуха, который необходимо очистить от пыли, обозначим через Q .

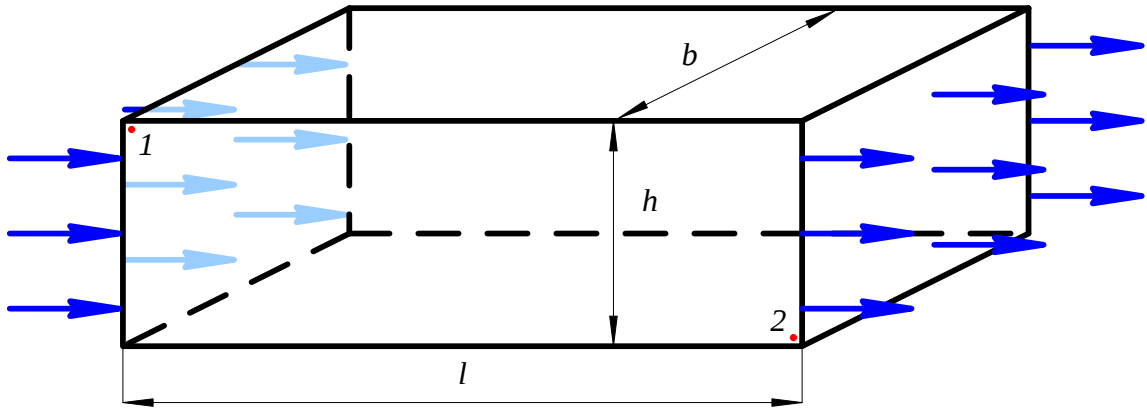


Рисунок 1.19 – Схема к расчету параметров пылеосадительной камеры

Принимая, что пылинка движется горизонтально со скоростью воздуха, и учитывая, что пылинка из точки 1 должна достичь дна камеры, т.е. упасть на дно в точке 2, за то же самое время, за которое воздух проносит ее по длине камеры, можно написать следующее уравнение

$$\frac{h}{v_{\text{п}}} = \frac{l}{v_{\text{в}}}, \quad (1.1)$$

где h – высота отстойной камеры, м;

l – длина отстойной камеры, м;

$v_{\text{п}}$ – скорость вертикального падения пылинки, м/с;

$v_{\text{в}}$ – скорость горизонтального движения воздуха по камере, м/с.

С другой стороны площадь поперечного сечения пылеосадительной камеры, умноженная на скорость движения воздуха, должна быть равна объему проходящего воздуха

$$h \cdot b \cdot v_{\text{в}} = Q, \quad (1.2)$$

где b – ширина отстойной камеры, м;

Q – объем воздуха, проходящий через отстойную камеру, м³/с.

Выразив из уравнения (1.2) h и подставив его в уравнение (1.1) после сокращений получим

$$l = \frac{Q}{b \cdot v_{\text{в}}}, \quad (1.3)$$

$$b = \frac{Q}{l \cdot v_{\text{п}}}. \quad (1.4)$$

Уравнения (1.3) и (1.4) показывают, что при заданных объемах воздуха (Q) и имеющихся сведений о скорости падения пылинок ($v_{\text{п}}$) длина отстойной камеры (l) должна быть тем меньше, чем больше ее ширина (b).

Вертикальная скорость падения пылинки будет тем больше, чем больше удельный вес и ее размеры, что обуславливает силу, которая заставляет падать пылинку.

Однако такие системы неэффективны при наличии в воздухе мелкой и/или легкой пыли, скорость падения ($v_{\text{п}}$) которой очень низкая, что в свою очередь требует больших размеров отстойной камеры (l и b).

В шахтах такие системы не встречаются. Их применение возможно там, где есть возможность установки больших пылеулавливающих установок, например, на обогатительных фабриках.

Различные устройства фильтров и промывка воздуха имеют преимущества в компактности перед пыleosадительными камерами, поэтому именно они распространены на угольных шахтах.

По существу применяемые в настоящее время фильтры можно разделить на несколько типов:

- контактные фильтры (фильтры скользящего соприкосновения),
- сухие сквозные фильтры,
- влажные сквозные фильтры.

При первых воздух скользит вдоль некоторой шероховатой поверхности, оставляя на ней часть содержащейся в нем пыли. При втором и третьем типе фильтров воздух проходит сквозь фильтрующие материалы, чем и очищается от пыли.

Контактные фильтры изготовляют из полотнищ ворсистой ткани (чаще всего бумазеи), натянутых в вертикальных плоскостях таким образом, что они образуют узкие зигзагообразные проходы для воздуха. Ворсистая поверхность ткани обращается в сторону наибольшего трения воздуха о поверхность ткани (рисунок 1.20), скользя вдоль которой воздух оставляет между ворсинками часть содержащейся в нем пыли.

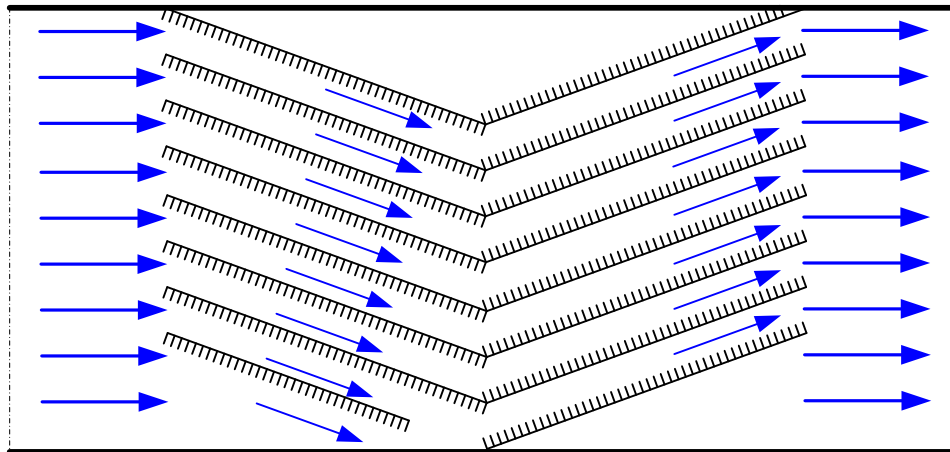


Рисунок 1.20 – Схема контактного фильтра

Недостатком является малый очищающий эффект, преимущество – очень малое сопротивление, оказываемое движущемуся воздуху. Поэтому он может применяться только в системах вентиляции, работающих без механических побудителей движения воздуха.

Сквозные фильтры применяются на угольных шахтах. Для сухих сквозных фильтров могут использоваться разнообразные материалы:

- ткань (бумазея, миткаль, кисея или чаще мешковина);
- хлопчатобумажная вата;
- древесная шерсть (тонкие, узкополосные упаковочные стружки);
- промытые гарь, шлак или кокс;
- щебенка кирпичная;
- синтетические материалы и другие.

Во всех конструкция сквозных фильтров используются шероховатость поверхности фильтрующего материала, пористость ее массы в каждом куске и пористость всей загрузки в целом.

Тканевые фильтры применяются в виде плоскостенных конструкций, натягиваемых (съемно) в поперечном сечении горных выработок, частично перекрывающих его (рисунок 1.21). Тканевые полотна перегородивают воздуху путь и вынуждают его проходить сквозь ткань.

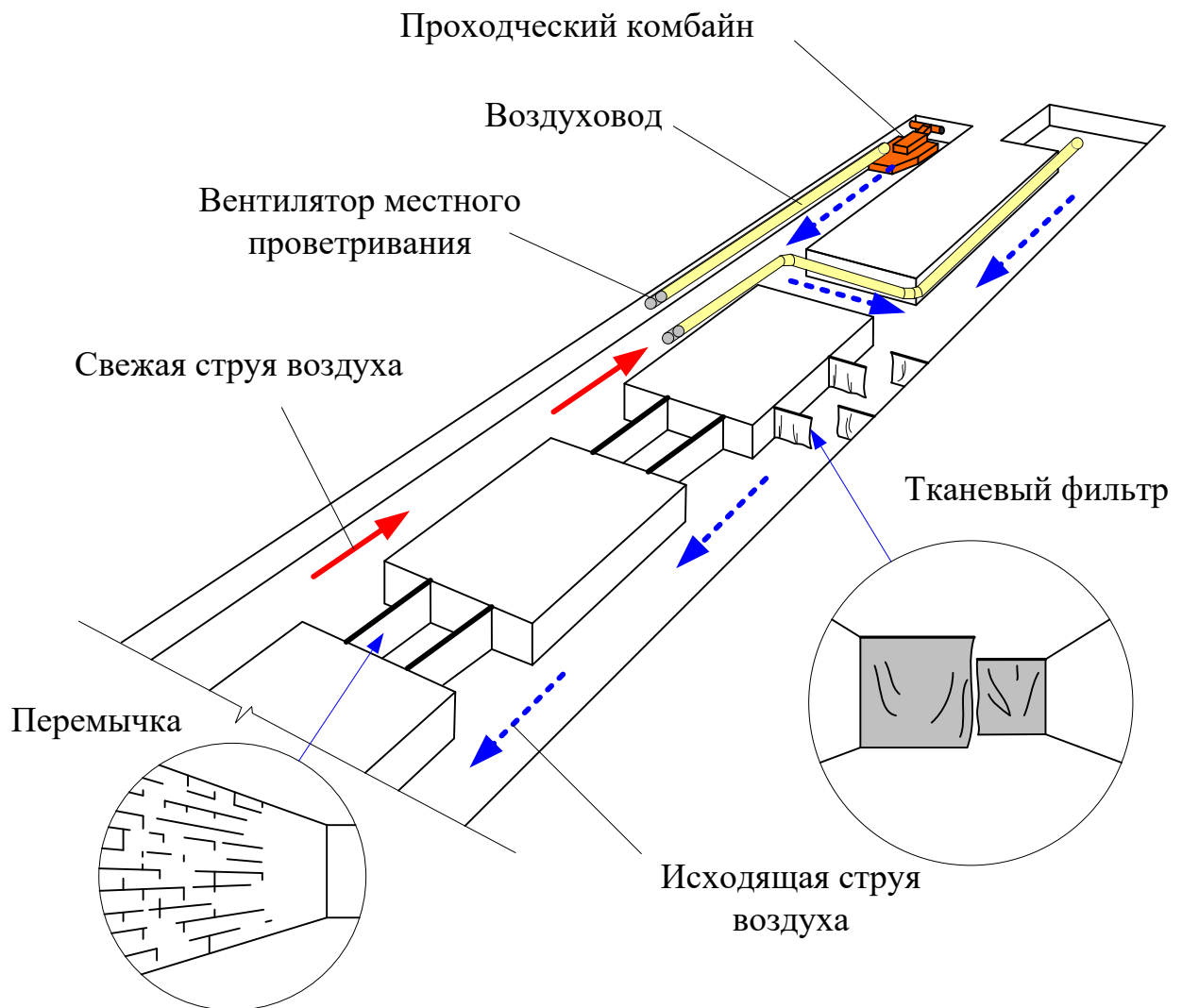


Рисунок 1.21 – Схема расположения тканевых фильтров в горных выработках проходческого участка

Аналогичный принцип используется и для фильтров пылеулавливающих установок (скрубберов). В них в целях наибольшего эффекта очистки воздуха и экономии места и размещения значительной

фильтрующей поверхности на возможно малой площади раму, в которой размещают фильтры, устанавливают зигзагообразно (рисунок 1.22).

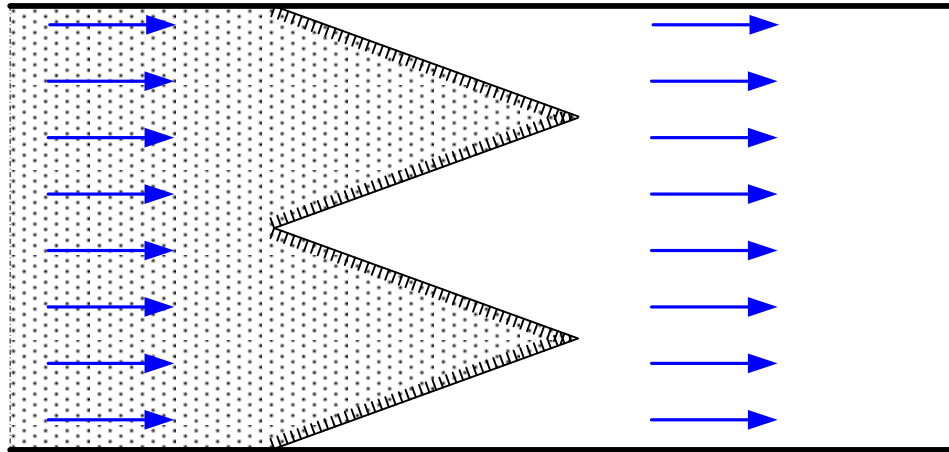


Рисунок 1.22 – Схема контактного фильтра

Встречается применение фильтров древесных, коксовых, шлаковых, граевых, щебневых и синтетических. Все эти фильтры по конструкции однородны. Между двумя рамками натянуты металлические сетки, внутри помещается более или менее толстым слоем фильтрующий материал. Рамки устанавливаются в виде стенки на пути потока фильтруемого воздуха. Расстояние между сетками делается для древесной шерсти составляет 75 мм, для коксовых, граевых, шлаковых и щебеночных 150-200 мм. Сеточные рамки ставятся вертикально или под небольшим углом, в плане они могут образовывать одну плоскую стенку или прямоугольно зубчатую (рисунок 1.23), что позволяет экономить размер поперечного сечения.

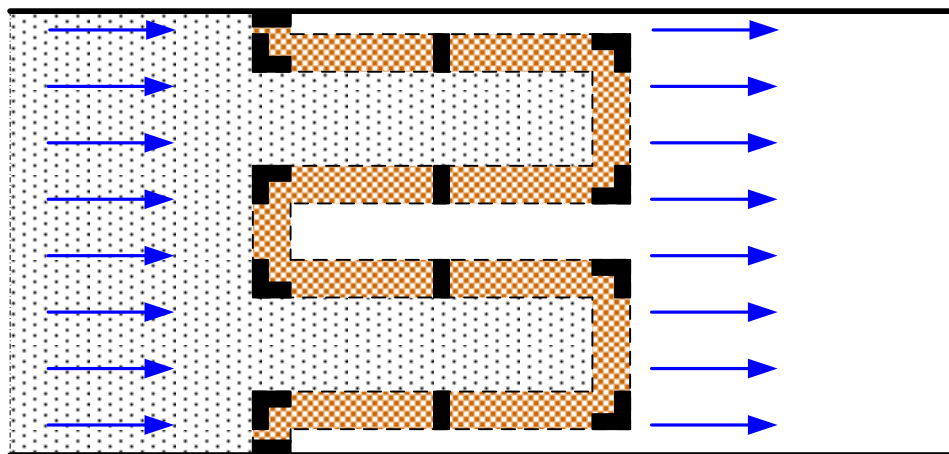


Рисунок 1.23 – Схема загрузочного контактного фильтра

Описанные выше фильтры могут применяться не только как сухие, но и как влажные, орошаемые водой. Для этого в толще фильтровой загрузки между сетками в верхней части прокладывается труба с отверстиями, в которую поступает вода (рисунок 1.24).

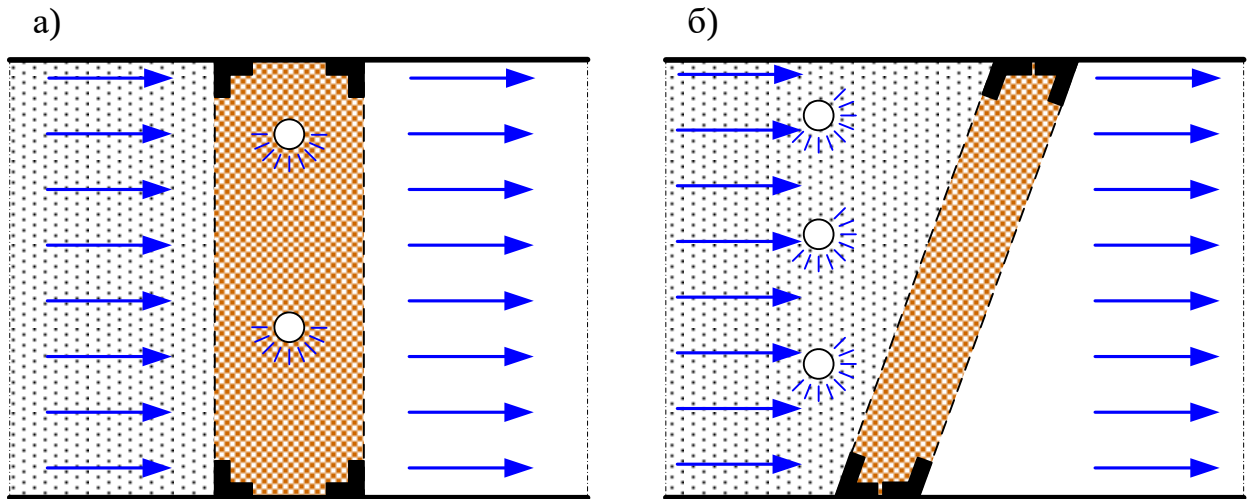


Рисунок 1.24 – Схема загрузочного контактного фильтра

Для увлажнения поверхностей фильтров могут применяться различные сорта негустеющих масел. При этом фильтры выполняются из металла. Конструкции масляных фильтров в общем виде состоят из плоских металлических коробок, затянутых сетками или металлическими листами с отверстиями. Между сетками засыпается металлическая фильтровая загрузка. Чаще всего она состоит из коротких тонкостенных железных омедненных трубочек диаметром 8-12 мм. Длина отрезков равна их диаметру. Загрузка располагается беспорядочно и образует сложную лабиринтовую преграду для запыленного воздуха. На 1 м² лобовой поверхности фильтра приходится около 12 м² фильтрующей поверхности. Смачивание осуществляется путем погружения каждой рабочей ячейки в резервуар с маслом. Загрязненные ячейки очищаются интенсивным полосканием в горячем содовом растворе.

Другой тип масляных фильтров собирается из отдельных вынимаемых ячеек, каждая из которых представляет собой полосы штампованного металла (рисунок 1.25).

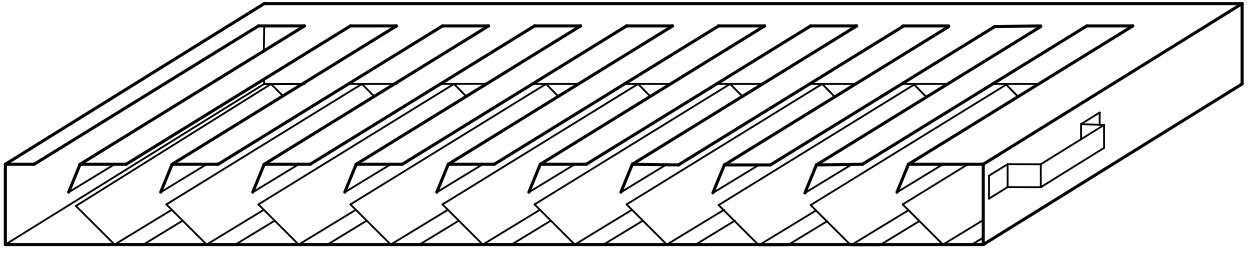


Рисунок 1.25 – Схема элемента (вынимаемой ячейки) масляного фильтра

Наиболее распространенный принцип очистки воздуха от пыли заключается в его промывке распыленной водой. Пылинки, смоченные капельками воды, падают на почву горной выработки или дно пылеотсасывающей установки. Выпуск воды в большинстве конструкций осуществляется через форсунки. В зависимости от конструкции форсунки вода подается под различным давлением (от 1 до 2 атм). Форсунки устанавливаются таким образом, чтобы перекрывалось все поперечное сечение.

При пылеочистке также применяют электрофильтры, с помощью которых улавливают самые мелкие частицы [35]. Однако их применение высокочастотное и взрывоопасно, поэтому они в горной промышленности не встречается.

Большое количество научно-исследовательских работ как отечественных [30], так и зарубежных [28, 31-34] посвящены конструкциям форсунок, расходам воды и определению давления. Цель исследований – это создание и поддержание эксплуатационных характеристик форсунок на длительном протяжении времени.

Данные базовые принципы обеспыливания применяются в различных комбинациях и сочетаниях как отдельные конструкции в горных выработках, так и отдельные устройства (самостоятельные, вмонтированные в горнопроходческие комплексы или в вентиляционные устройства).

1.6 Постановка задач исследования

Объектом диссертационного исследования являются системы по снижению уровня запыленности рудничной атмосферы горных выработок при их проходке.

Применение современных средств комплексного обеспыливания при интенсивной угледобыче не обеспечивает снижения технически достижимых уровней запыленности до минимального значения, которое определяется величиной предельно допустимой концентрации. Это обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования систем обеспыливания, контроля и управления процессами пылевой динамики.

Применение новых проходческих комбайнов и встраиваемых в них современных систем пылеотсосов требуют теоретические и натурные исследования. Так как их применение в настоящее время не учитывает систему вентиляции тупиковых горных выработок, что может привести к аварийным ситуациям, а также повысить риск возникновения профессиональных заболеваний фиброгенного действия.

Для разработки научного обоснования эффективных систем аспирационного пылеудаления в подготовительных выработках угольных шахт, а также адаптации этих систем к современным способам и схемам проветривания с учетом пылевой динамики необходимо решить следующие задачи:

1. исследовать аэродинамику проходческих забоев угольных шахт;
2. провести анализ существующих мероприятий по снижению запыленности рудничной атмосферы подготовительных забоев;
3. исследовать эффективность схем, способов и режимов вентиляции подготовительных забоев, в которых применяются системы пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны;
4. исследовать основные параметры, определяющие эффективность систем пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны;

5. провести шахтные испытания систем пылеотсосов, встраиваемых в проходческие комбайны, для выявления параметров, определяющих эффективность снижения запыленности и уточнения действующих методик;
6. разработать способ определения эффективных параметров работы системы пылеотсосов с учетом системы проветривания проходческих забоев.
7. разработать рекомендации по системному проектированию проветривания проходческих забоев с учетом встраиваемых в комбайн пылеотсасывающих систем.

Выводы

1. В настоящее время отмечается положительная динамика угледобычи в России и в некоторых зарубежных странах, занимающихся добычей угля. Прирост добычи угля подземным способом в РФ ежегодно в среднем равен 1 % (+ 1 млн тонн). Экономический кризис и снижение энергопотребления во всем мире замедлили рост добычи угля, но в перспективе ожидается рост и переход на современное высокопроизводительное горное оборудование (в том числе проходческие комбайны). Это может привести к росту поступления пыли в рудничную атмосферу.
2. Подтверждено, что условия труда рабочих, занятых подземной добычей угля, преимущественно являются вредными. При этом среди всех горнорабочих больше всего от вредных факторов страдают проходчики и горнорабочие очистного забоя. Ведущую группу вредных производственных факторов при подземной добыче угля формируют аэрозоли преимущественно фиброгенного действия, шум и тяжесть труда. При этом рудничная пыль является не только вредным (приводящим к профессиональным заболеваниям), но и опасным

производственным фактором. В случае взрыва метана угольная пыль существенно усугубляет последствия аварии, переводя ее в катастрофические с многомиллиардными убытками и потерей месторождения.

3. При ведении подготовительных работ на угольных шахтах применяются аспирационные системы пылеудаления, отличающиеся друг от друга конструктивными особенностями и техническими характеристиками.

Для эффективного использования систем пылеотсоса необходимо экспериментальное определение их аэродинамических параметров в шахтных условиях в зависимости от схем и способов проветривания, а также фактической запыленности и дисперсного состава пыли.

4. Натурные исследования показали, что фактический и технически достижимый уровень запыленности воздуха в подготовительных забоях угольных шахт в 3-18 раз выше допустимых значений при всех существующих технических и технологических решениях, применяемых сегодня.

5. Анализ применяемых пылеотсасывающих установок (или скрубберов) показал наличие большого числа различных конструкционных решений как по размещению воздухозаборных патрубков, так и по способам очистки воздуха от пыли.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЯХ

Для решения поставленных задач на первом этапе исследований был проведен анализ эффективности обеспыливания воздуха в горных выработках с системами аспирации и орошения призабойной части совместно.

Натурные эксперименты проводились на шахтах «Им. С.М. Кирова», «Им. 7 Ноября – Новая» и «Талдинская-Западная 2».

2.1 Разработка классификации систем обеспыливания рудничной атмосферы при проходке тупиковых горных

В настоящее время не существует единой классификации технических устройств и систем снижения уровня запыленности рудничной атмосферы горных выработок при ведении проходческих работ. Разработка классификации необходима для обоснования выбора мероприятий обеспечения аэрологической безопасности угольных шахт. Классификация составлена по данным исследований, представленных в разделах 1.4-1.5. В основу классификационных признаков положены различия по базовым принципам действия улавливания пыли, месту расположения устройств пылеотсоса (пыле осаждения или улавливания) и месту в системе шахтной вентиляционной сети проходческого участка.

Предлагаемая классификация (таблица 2.1) характеризует особенности всех вариантов применения пылеотсасывающих установок. В основе данной классификации лежит рациональность применения мероприятий по снижению запыленности рудничной атмосферы горных выработок при их проходке.

Первый классификационный признак касается расположения пылеотсасывающей установки с учетом ее перемещения в процессе ведения

проходческих работ. Стационарные установки монтируются исходя из их применения на протяжении всего времени ведения проходческих работ. Нестационарные установки устанавливаются на проходческих комбайнах или располагаются в призабойной части и перемещаются по мере продвижения забоя. Примеры таких систем приведены в разделе 1.5.

Пылеотсасывающие установки можно разделить на встроенные в систему вентиляции или в проходческие комбайны и на выносные (самостоятельные технические устройства обеспыливания воздуха). Встраиваемые установки в систему вентиляции, как правило, используются при всасывающем способе проветривания, пример такой схемы, применяемой на угольной шахте «Хакасская» в России, приведен в работе [24]. Перед вентилятором местного проветривания устанавливается пылеотсасывающая установка. Дополнительные источники тяги здесь не применяются, однако по воздуховоду движется пыле-газовоздушная смесь, для которой требуется разработка отдельных мероприятий контроля взрывобезопасности.

Системы, встраиваемые в проходческие комбайны, в настоящее время получили широкое применение, так как они компактны и позволяют снизить уровень запыленности непосредственно в месте образования пыли. Однако, режим работы пылеотсасывающей установки и проходческого вентилятора, общая схема проветривания в настоящее время методически не определены для применяемого оборудования.

Также в классификации все существующие системы подразделяются на 5 видов по способу обеспыливания воздуха в скруббере (орошение, пылеосаждение, фильтрации (через мокрые и сухие элементы), применение электрофильтрации). Принципы действия каждого вида описаны в разделе 1.3.

Предлагаемая классификация и представленные особенности применения пылеотсасывающих устройств позволяют методически обоснованно подойти к выбору необходимой системы обеспечения

аэрологической безопасности по пылевому фактору для конкретных горно-геологических и технологических условий.

Таблица 2.1 – Классификация пылеотсасывающих устройств снижения уровня запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок (при их проходке)

Классификация	Классификационный признак	Возможные варианты	Условные обозначения	Область применения			
				1	2	3	4
Тип	Расположение скруббера с учетом перемещения во времени	Стационарные	1				
		Нестационарные	2				
Класс	Место в системе проветривания проходческого забоя	Встраиваемые в систему вентиляции	Вв				
		Встраиваемые в проходческий комбайн	Вк				
		Самостоятельные	С				
Вид	Принцип действия	Фильтры мокрые	фм				
		Фильтры сухие	фс				
		Электрофильтры	эф				

-  – применяется часто при проходке горных выработок
 – применение возможно при проходке горных выработок / встречается в горном деле
 – в настоящее время не применяется при проходке горных выработок
1 – ширина горной выработки более 3 м и высота более 3 м
2 – высокая обводненность горной выработки
3 – высокая газообильность горной выработки
4 – влияние на систему проветривания тупиковой горной выработки

Примеры схем по разработанной классификации приведены на рисунке 2.1.

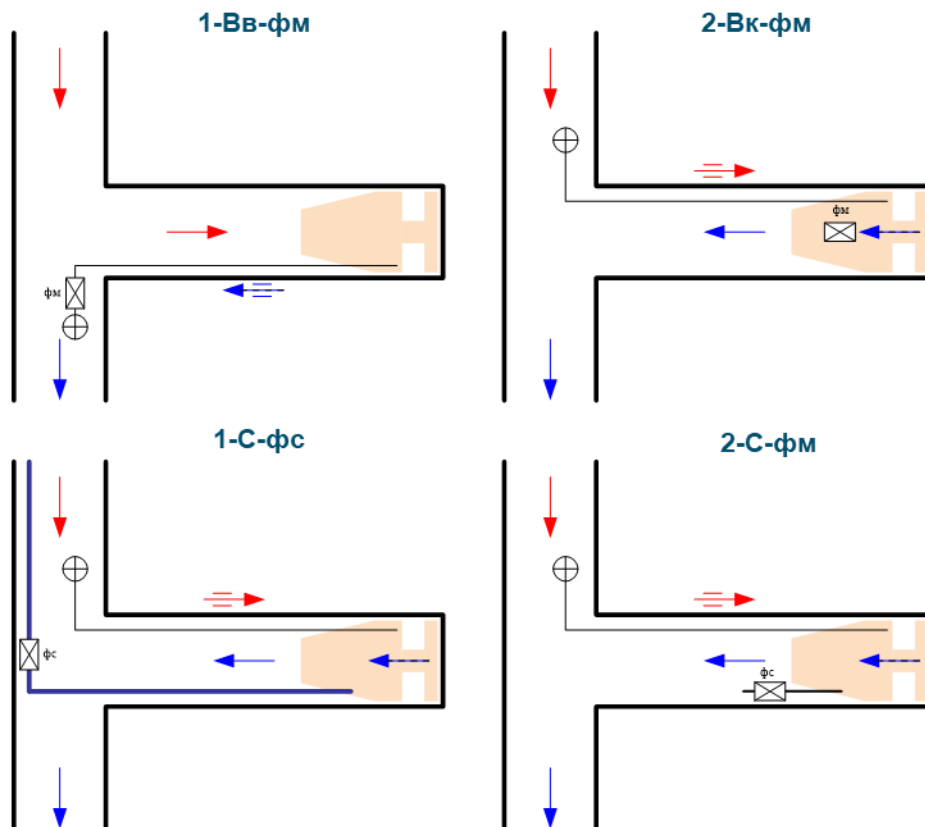


Рисунок 2.1 – Примеры схем по предложенной классификации

2.2 Оценка состояния применяемого комплекса обеспыливания на обследуемых шахтах

На обозначенных выше шахтах эксперименты проводились в проходческих забоях, в которых применяется современный комплекс Sandvik MB670-1LN с пылеотсосом Hоеко Vent Scrubber (HCN) CFT (рисунок 2.2). Часть воздуха, поступающего в забой по вентиляционному ставу, скруббер забирает у груди забоя при помощи жесточого става и встроенного в пылеотсасывающую установку вентилятора с последующим выпуском очищенного от пыли воздуха. Длина комбайна составляет 11 м, длина скруббера с трубопроводом – 6 м.

По данным завода – изготовителя, производительность скруббера (гидровентилятора ES6-150HYES6-150HY, установленного в системе обеспыливания), лежит в диапазоне от 2,5 до 5,0 м³/с, при этом контроль

параметров работы скруббера в настоящее время не производится. В случае, когда фактический расход воздуха, поступающий в забой, составляет $250 \div 300 \text{ м}^3/\text{мин}$, возможно образование непроветриваемых зон (местных, слоевых скоплений метана) над комбайном или возникновение рециркуляции воздуха через скруббер.

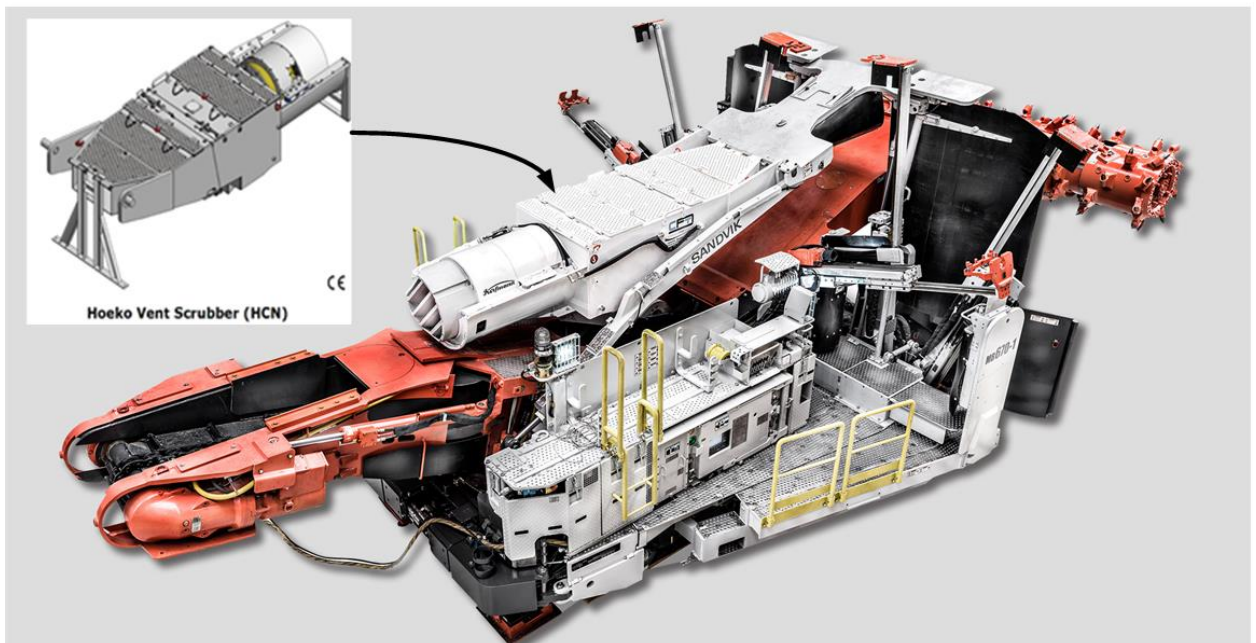
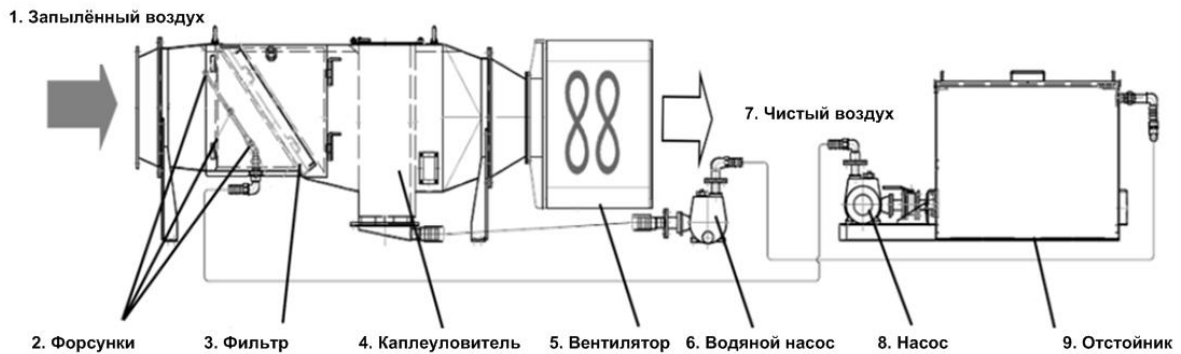


Рисунок 2.2 – Структура скруббера Hoeko Vent Scrubber (HCN), установленного на проходческом комбайне Sandvik MB670-1LN

Фотографии элементов пылеотсасывающей установки комбайна приведены на рисунке 2.3. Условно скруббер состоит из трех частей. Первая – всасывающий патрубок (рисунок 2.3а), представляющий собой две металлические пластины (верхняя является частью временной крепи) соединенные по бокам резиновыми частями. При опускании крепи или при поднятии стрелы проходческого комбайна происходит изменение сечения и,

соответственно, изменение аэродинамического сопротивления. На заводе-изготовителе это учли и сообщают о незначительных изменениях расхода воздуха (рисунок 2.4).

Вторая часть представлена системой обеспыливания воздуха (форсунки (рисунок 2.3б) для орошения поступающего запыленного воздуха (поток капель направлен навстречу движущемуся воздуху), пластиковым сетчатым фильтром (рисунок 2.3в), форсунками для очистки фильтра (рисунок 2.3г), каплеуловителем (рисунок 2.3д)).

Третья часть – гидровентильатор ES6-150HY/ES6-150HY (рисунок 2.3е) компании Korfmann, входящей в холдинг CFT.

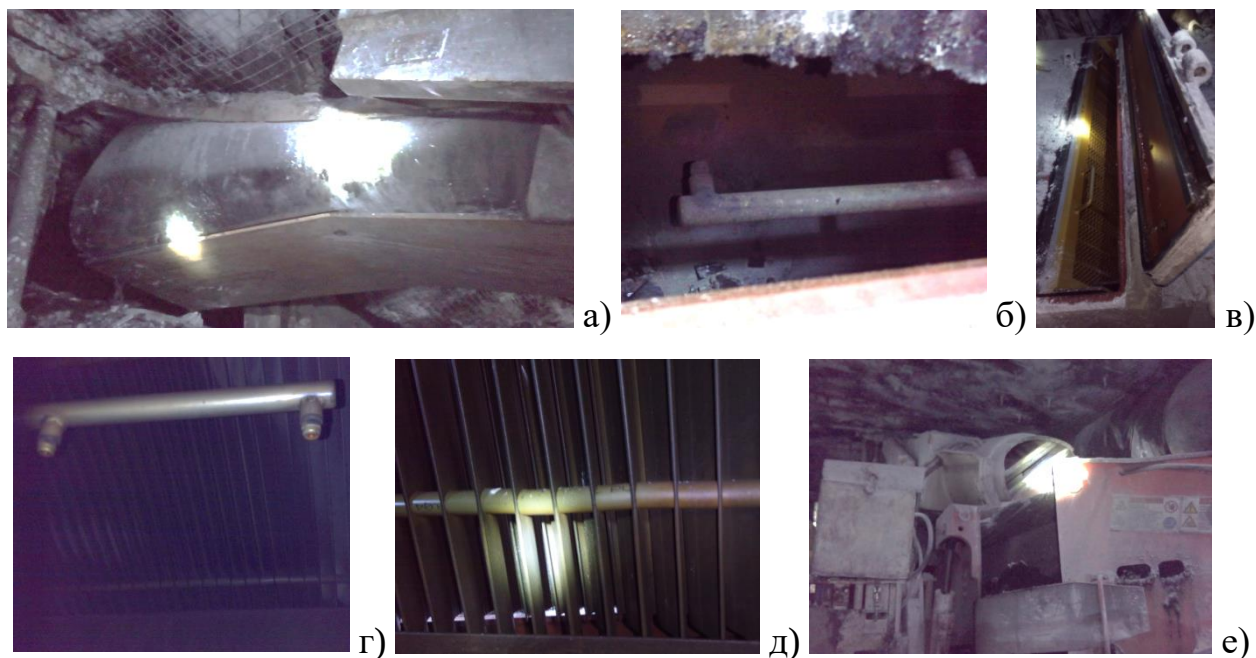


Рисунок 2.3 – Фотографии внешних элементов скруббера



Рисунок 2.4 – Фотографии первой части скруббера (а) и экспериментальные значения работы гидравлического вентильатора ES6-150HY при работе в лаборатории без пыли и воды (б)

Сведения по параметрам работы гидравлического вентилятора и форсунок в скруббере, представленные в технических документах, также проверялись непосредственно при проведении натурных исследований. Изучив гидравлическую схему (рисунок 2.5), было выявлено, что на комбайне установлена комплексная система орошения. Вода подается на 24 форсунки исполнительного органа комбайна (бара), на систему орошения верхней части призабойного пространства, на 6 форсунок, орошающих конвейер, а также на 8 форсунок скруббера. Вода поступает из системы пожарно-оросительного трубопровода, предварительно проходя через фильтры и насос. Для пылеподавления работают 3 форсунки; для очистки фильтра работают 5 форсунок; на одну форсунку – 6,2 л/мин; на работу вентилятора 10 бар/30 л/мин (запуск от 2 бар, максимальное давление 30 бар). Промывка фильтра осуществляется 1 раз в сутки (в 1 смену).

Следует отметить, что комбайн может вести проходку без работы установленного скруббера. Также существующие системы контроля не позволяют определить текущий режим работы пылеотсасывающей установки как в целом, так и отдельных ее частей.

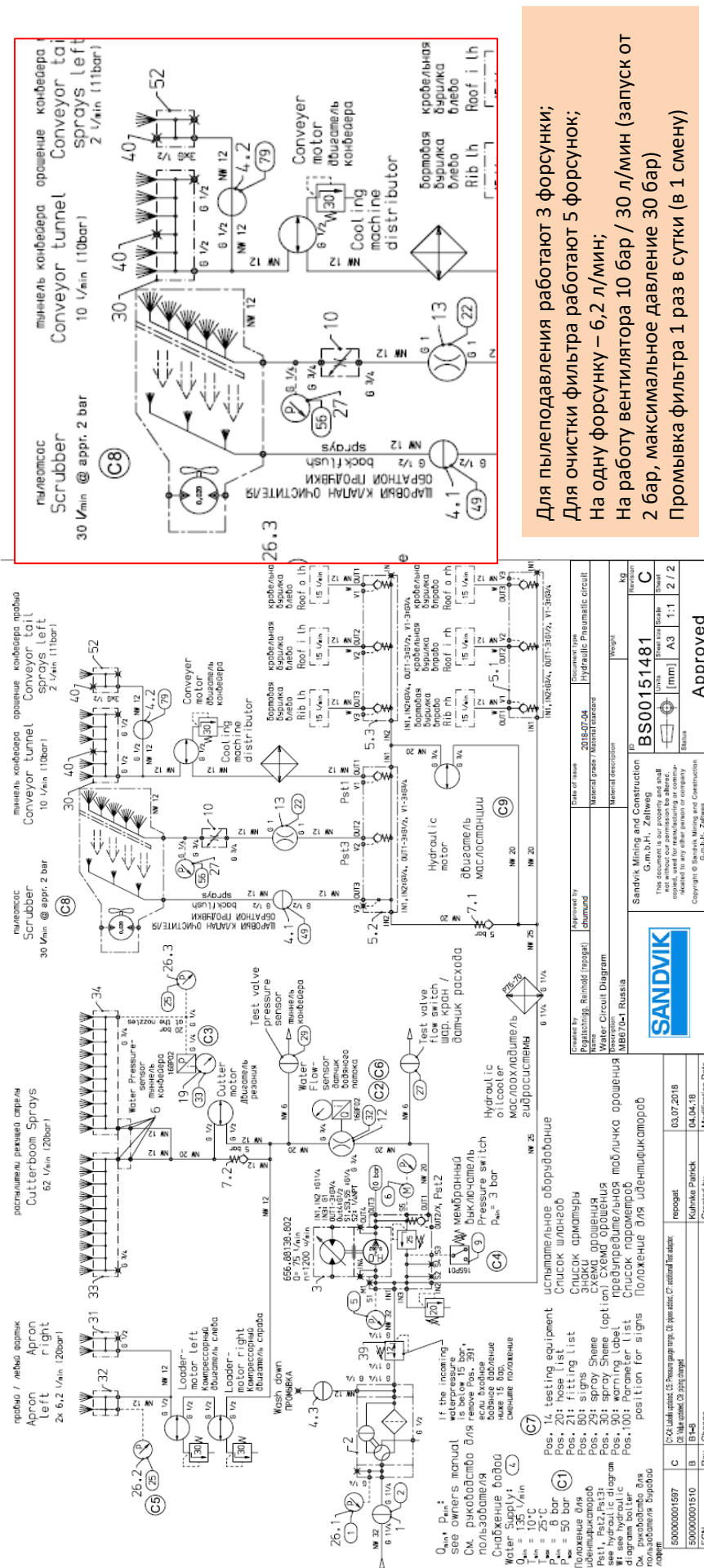


Рисунок 2.5 – Сведения по параметрам работы гидравлического вентилятора и форсунок в скруббере

При исследованиях проводились измерения параметров работы пылеотсасывающей установки (депрессии гидровентилятора, расхода воздуха, разрежения на всаса, степень очистки воздуха от пыли) и аэропылединымики по специально разработанной и утвержденной в компании АО «СУЭК» и на шахтах методике. По методикам [29] производился сбор пыли для последующего лабораторного анализа. Также проводилась частичная воздушно-депресссионная съемка проходческого участка по методике [18].

Как видно из рисунка 2.6, управление системой орошения полностью ручное. Манометр по работе системы орошения один на все форсунки, что не позволяет оперативно регулировать параметры работы отдельных элементов скруббера.

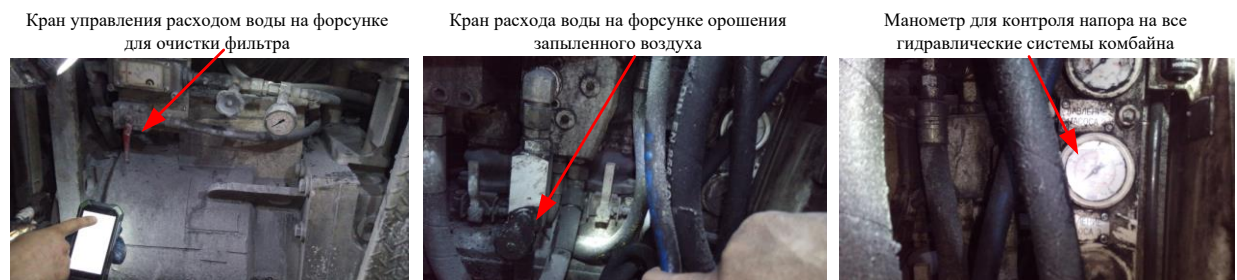


Рисунок 2.6 – Фотографии системы управления орошением

При проведении исследований был выявлен недостаток схемы расположения воздухозаборных патрубков скруббера. В результате высокопроизводительной работы проходческого комбайна горная масса попадает в патрубок (рисунок 2.7). В рекомендациях по улучшению работы систем обеспыливания данный момент учтен, и в настоящее время в ремонтную смену производится очистка фильтров. Однако при ведении горных работ попадание горной массы будет приводить к увеличению аэродинамического сопротивления пылеотсасывающей установки.

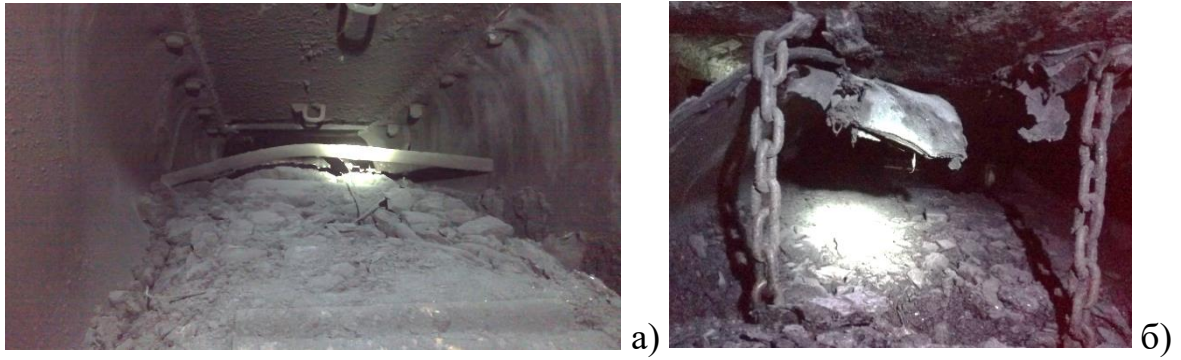


Рисунок 2.7 – Фотографии внешних элементов скруббера заштыбованных горной массой (на фотографии (а) видно перекрытие сечения патрубка всаса на 50 %, на фотографии (б) – 80 % перекрытие патрубка всаса с нарушением его целостности)

2.3 Шахтные исследования запыленности рудничной атмосферы в проходческих забоях с учетом работы пылеотсоса

Целью проведения натурных исследований на шахтах являлись:

- оценка эффективности работы средств пылеподавления, в том числе систем пылеудаления и схем проветривания проходческих забоев с использованием скруббера при ведении подготовительных работ;
- сбор данных для проведения численных расчетов и разработки методики системного проектирования проветривания проходческих забоев с учетом аэропылединамической обстановки.

При проведении исследований осуществлялись следующие работы:

- измерение количества воздуха, подаваемого вентилятором местного проветривания в призабойное пространство;
- измерение количества воздуха, исходящего из пылеотсасывающей установки, и разряжение, создаваемое в зоне всаса скруббера;
- сбор проб для определения количества отложившейся в горных выработках угольной пыли;
- измерение массы количество витающей угольной пыли.

Также по контрольным сечениям (первое находится в зоне работы проходческого комбайна в плоскости, где располагается проходчик,

управляющий проходческим комбайном, второе на расстоянии 50 м от плоскости забоя) проводились измерения точечным способом скорости движения воздуха для построения эпюры скоростей.

Для проведения измерений применялось следующее оборудование:

- для измерения скорости движения воздуха – анемометры АПР-2 (заводские номера № 1437, № 1438, свидетельство о поверке № 041029743, № 041029742);
- для измерения абсолютного, избыточного и дифференциального давления – МБГО (заводские номера № 523, свидетельство о поверке № 361390);
- для измерения температуры и влажности воздуха – ТГО-2МП (заводские номера № 869, свидетельство о поверке № 11.2-500);
- для измерения запыленности – СІР (заводские номера № 345, 231) и АЭРА (прибор предоставлен сотрудниками ВГСЧ Кемеровского ВГСО и ВостНИИ);
- для измерения линейных размеров горного оборудования, расстояния – рулетка;
- для фотографирования использовался взрывозащищенный смартфон SBGPS Mphone.

Исследования на шахте «Им. С.М. Кирова» проводились в конвейерной печи 24-63 пласта Болдыревского. Подготовительный забой проветривается вентилятором ВМЭВВ-7 (расчетное количество воздуха $Q_{\text{расч.}} = 468 \text{ м}^3/\text{мин}$, фактически подавалось больше $Q_{\text{факт.}} = 566 \text{ м}^3/\text{мин}$). Выкопировка участка, где производились измерения, приведена на рисунке 2.8, а на рисунке 2.9 приведена схема участка с обозначением расположения горного и вентиляционного оборудования с указанием мест проведения замеров.

При визуальном осмотре сетка пылеулавливающего элемента (фильтр) была чистой, посторонних шумов при запуске скруббера не зафиксировано.

В процессе ведения горных работ по проходке горной выработки работала система взрывозащитного орошения на комбайне, включающая в

себя орошение над комбайном и в зоне работы исполнительного органа (бара). В призабойной части была сформирована тонкодисперсная водяная завеса.

Следует отметить, что наблюдалось свободное витание рудничной и сланцевой (инертной) пыли, смачивание в полной мере не происходило. Под действием силы тяжести в зонах с низкими скоростями воздуха пыль и капли воды оседали на горное оборудование, борта, почву и кровлю.

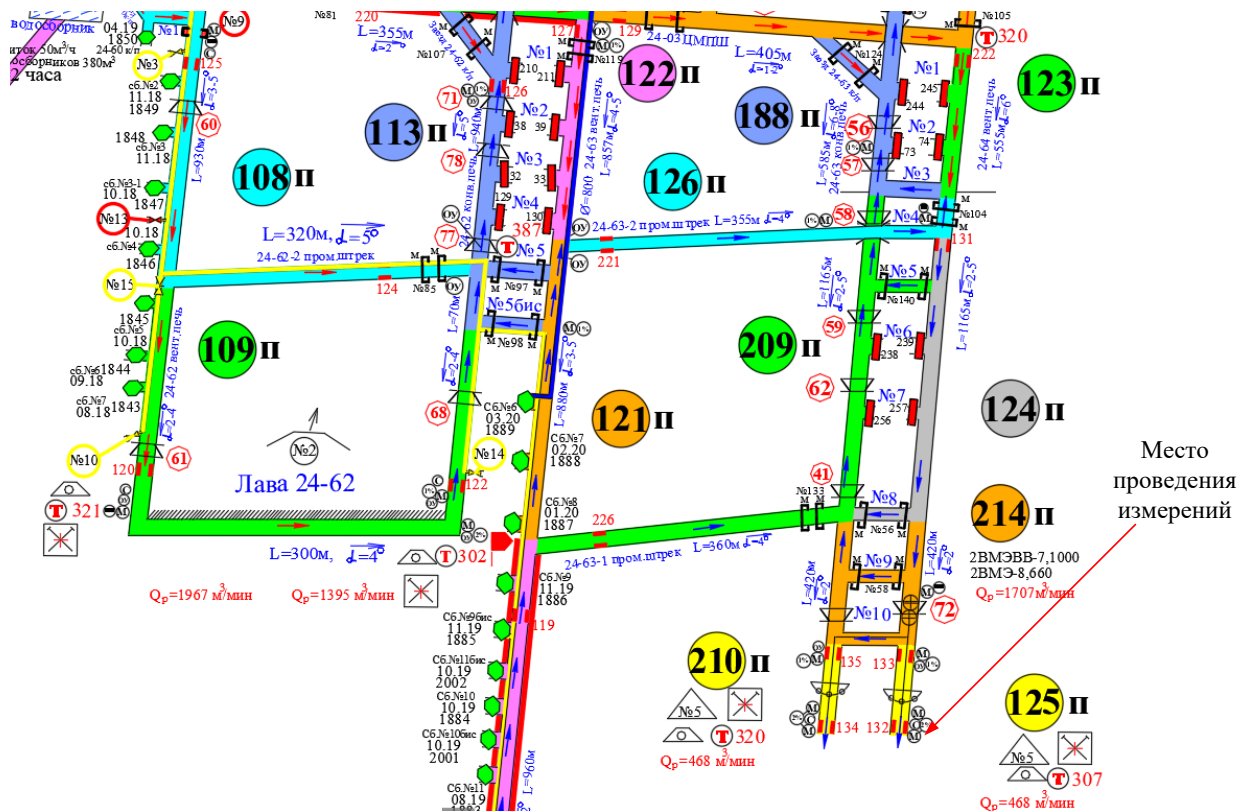


Рисунок 2.8 – Выкопировка со схемы ПЛА шахты «Им. С.М. Кирова», место проведения исследований

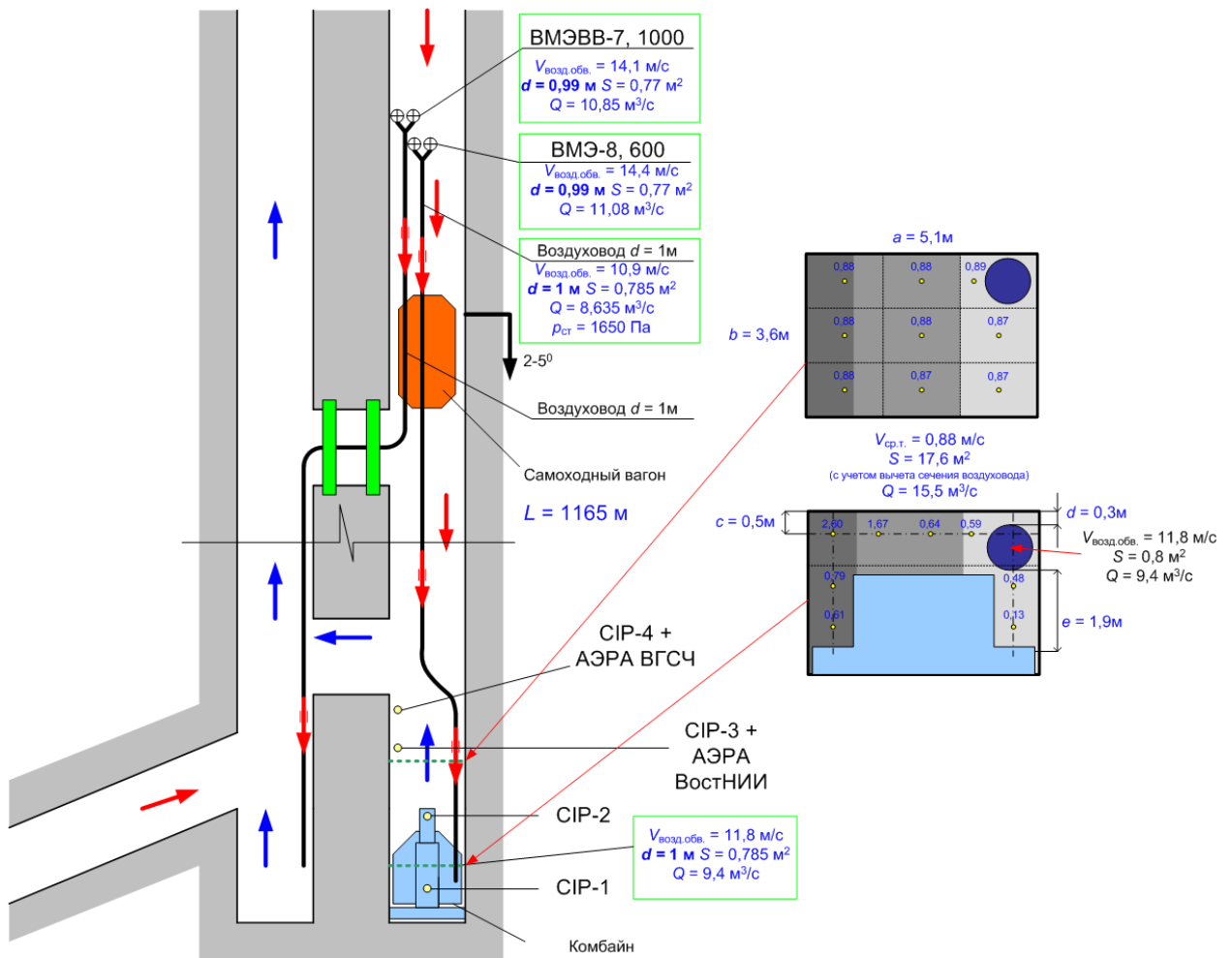


Рисунок 2.9 – Схема проведения измерений на шахте «Им. С.М. Кирова» в вентиляционной печи 24-64 и результаты замеров аэродинамики

Измерения уровня запыленности производились приборами CIP, подвешенными на расстоянии 0,5 м от кровли, в местах, указанных на схеме (рисунок 2.19, 2.10 и 2.11). Приборы одновременно включались в момент запуска проходческого комбайна. Измерения проводились в течение одного цикла работы по проходке (разрушение горного массива), в среднем продолжительность составила 3-5 минут. За это время комбайн прошел 1 м. После чего в течение 15 минут осуществляется цикл крепления горной выработки. Данная периодичность ведения горных работ также существенно сказывается на пылевой обстановке проходческого забоя.

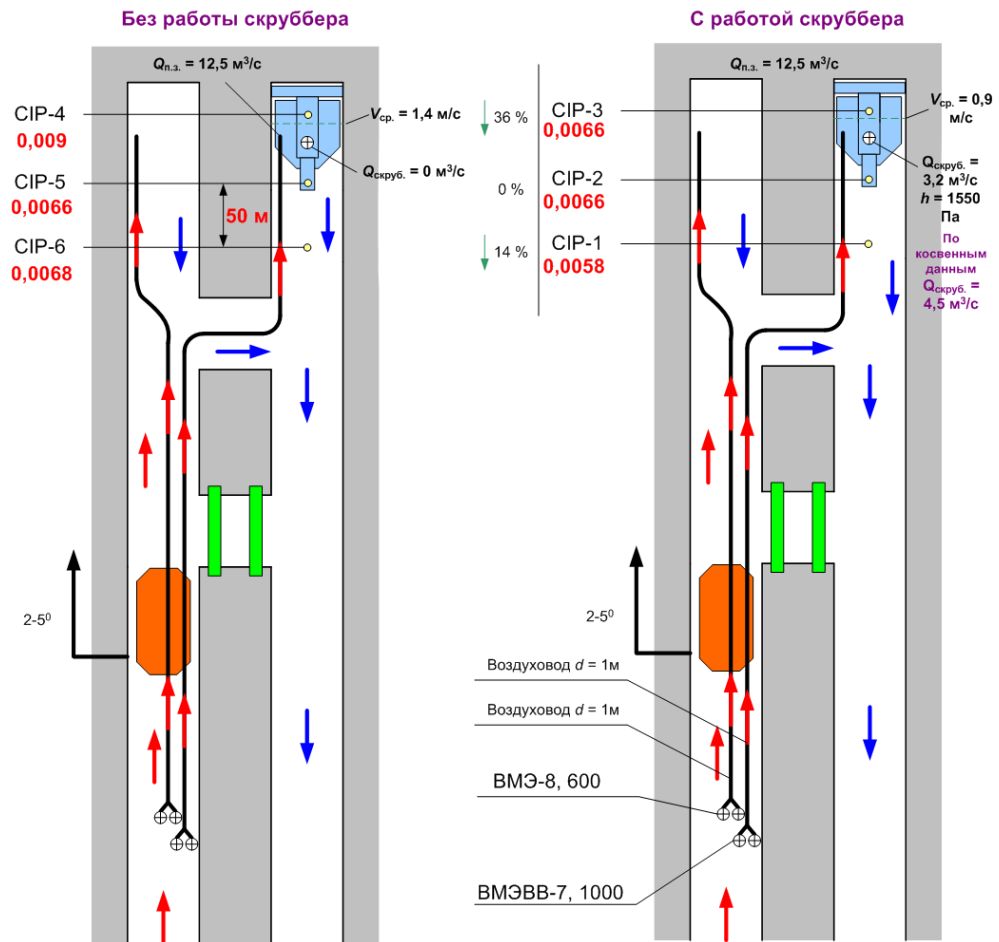


Рисунок 2.10 – Схема проведения измерений на шахте «Им. С.М. Кирова» в конвейерной печи 24-63 и результаты замеров пылевой динамики



а)



б)

Рисунок 2.11 – Фотография принципа размещения под кровлей прибора CIP (а) и влетающей пыли (б) в проходческом забое при ведении горных работ

Результаты измерения запыленности рудничной атмосферы приведены в таблицах 2.2 и 2.3. Из полученных данных следует, что эффективность работы пылеостасывающей установки в различных местах измерения

существенно отличается (в 2,6 раз). Общую эффективность можно посчитать как среднюю величину, которая составляет около 27 %.

Таблица 2.2 – Результаты измерения запыленности рудничной атмосферы в проходческом забое по данным обработанных проб с приборов СІР

Прибор	Пояснения	Масса, г	Величина снижения массы пыли
СІР-4	Фильтр №8 (измерение без работы скруббера)	0,0063	$\Delta = 0,0009$ г
	Фильтр №7 (измерение с работой скруббера)	0,0054	$\Delta = 14$ %↓
СІР-3	Фильтр №5 (измерение без работы скруббера)	0,0086	$\Delta = 0,0030$ г
	Фильтр №2 (измерение с работой скруббера)	0,0056	$\Delta = 35$ %↓
СІР-2	Фильтр №1 (измерение без работы скруббера)	0,0070	$\Delta = 0,0016$ г
	Фильтр №4 (измерение с работой скруббера)	0,0054	$\Delta = 23$ %↓
СІР-1	Фильтр №9 (измерение без работы скруббера)	0,0120	$\Delta = 0,0044$ г
	Фильтр №6 (измерение с работой скруббера)	0,0076	$\Delta = 37$ %↓

Таблица 2.3 – Результаты измерения запыленности рудничной атмосферы проходческом забое по данным обработанных проб с приборов АЭРА (ВостНИИ)

Прибор	Пояснения	Масса, г	Величина снижения массы пыли
АЭРА	Измерение №1 (измерение без работы скруббера)	0,0039	$\Delta = 0,0015$ г
	Измерение №2 (измерение с работой скруббера)	0,0024	$\Delta = 38$ %↓

Общим недостатком проведения измерений уровня запыленности является то, что для получения результата необходимо провести лабораторные измерения массы фильтров до и после натурных экспериментов.

[illegible]

Рисунок 2.12 – Выкопировка со схемы ПЛА шахты «Талдинская-Западная 2», место проведения исследований – диагональная печь 69-07-1

При посещении забоя отсутствовала электроэнергия в подготовительной выработке, система пылеудаления не работала. На данной шахте были проведены измерения по распределению воздушных потоков и выполнена оценка состояния пылеотсасывающей установки. Так как на данной шахте проходческий комбайн находился в работе три года, то при стандартной промывке фильтра в краевых его частях наблюдалось скопление мелкодисперсной пыли (рисунок 2.14). Следовательно, при проведении технического осмотра проходческого комбайна дополнительно требуется вынимание и промывка фильтра.

Исследования на шахте «Им. 7 Ноября – Новая» проводились в сбойке 26-8-13. Подготовительный забой проветривается вентилятором ВМЭ-8 (расчетное количество воздуха $Q_{\text{расч.}} = 858 \text{ м}^3/\text{мин}$, но фактически подавалось больше $Q_{\text{факт.}} = 936 \text{ м}^3/\text{мин}$).

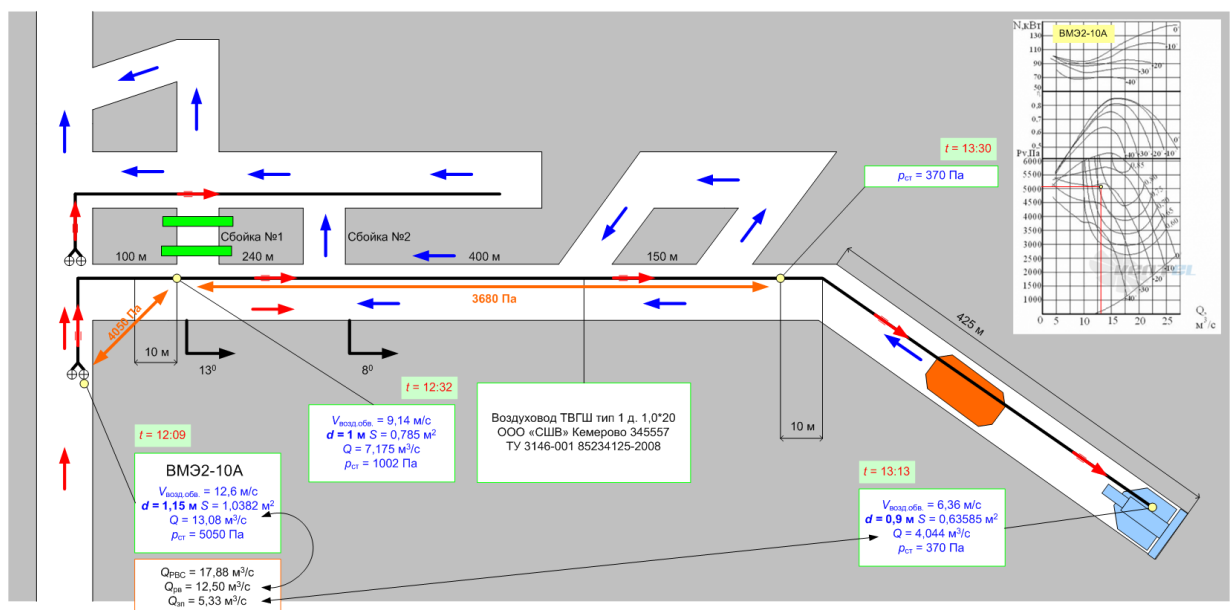


Рисунок 2.13 – Схема проведения измерений на шахте «Талдинская-Западная 2» в диагональной печи 6907-1 и результаты замеров

На рисунке 2.15 приведена схема участка с обозначением расположения горного и вентиляционного оборудования с указанием мест проведения замеров. Аэродинамика и пылевая динамика полностью совпадают с теми, что и на двух других шахтах (на рисунке 2.15 грациями

серого цвета отмечен уровень запыленности, наблюдаемый визуально). Выявленные недочеты аналогичны на всех шахтах и имеют общую системную проблему, связанную с отсутствием методических и организационных документов по применению комплекса противопылевых мероприятий с учетом схемы и способа проветривания.

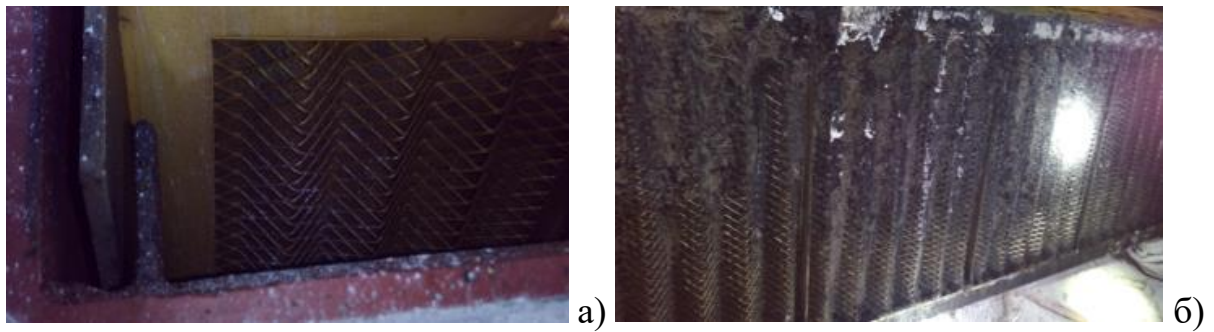


Рисунок 2.14 – Фотографии чистого фильтра (а) с нового проходческого комбайна на шахте «Им. 7 Ноября – Новая» и старого фильтра (три года в работе) (б) на шахте «Талдинская-Западная 2»

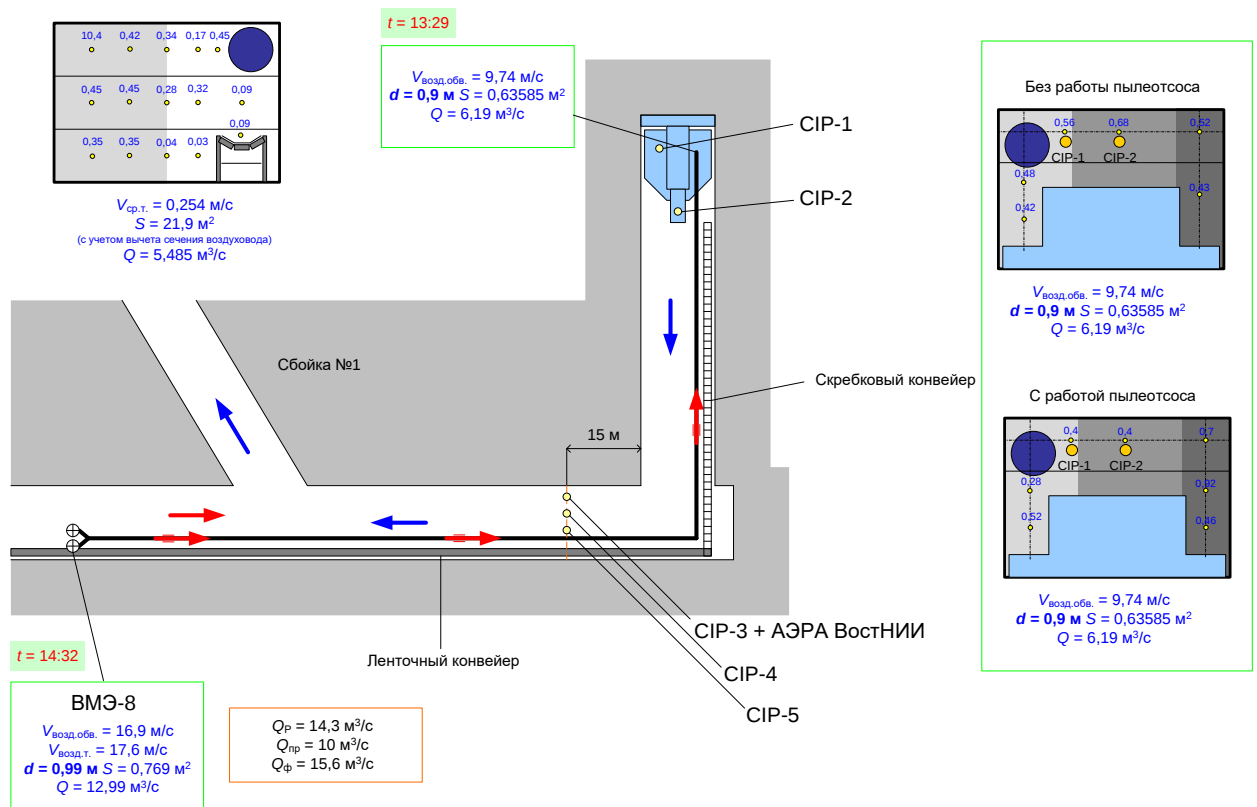


Рисунок 2.15 – Схема проведения измерений на шахте «Им. 7 Ноября – Новая» в сбойке 26-8-13 и результаты замеров

Результаты измерения массы угольной пыли приведены в таблицах 2.4 и 2.5. По разности массы пыли с фильтров при работающем и выключенном скруббере, видно, что не во всех точках призабойного пространства при работе скруббера снижается запыленность. Возможно, из-за режима работы общей вентиляции проходческого забоя и несогласованных с ней режимов работы пылеотсасывающей установки образуются локальные зоны с низкими скоростями движения воздуха, застойные зоны или зоны рециркуляции.

Также проводились измерения фактического напора и развиваемая депрессия гидровентилятором ES6-150HYES6-150HY пылеотсасывающей установки. При измерении давления одновременно производились измерения скорости движения воздуха с последующим перерасчетом на расход воздуха.

Таблица 2.4 – Результаты измерения массы пыли, собранной приборами СІР в рудничной атмосфере проходческого забоя при ведении горных работ

Прибор	Пояснения	Масса, г	Величина снижения массы пыли
СІР-1	Фильтр №8 (измерение без работы скруббера)	0,0233	$\Delta = 0,0002$ г
	Фильтр №3 (измерение с работой скруббера)	0,0231	$\Delta = 0,4$ %↓
СІР-2	Фильтр №5 (измерение без работы скруббера)	0,0193	$\Delta = 0,0015$ г
	Фильтр №2 (измерение с работой скруббера)	0,0208	$\Delta = 7,8$ %↑
СІР-3	Фильтр №6 (измерение без работы скруббера)	0,0233	$\Delta = 0,0099$ г
	Фильтр №7 (измерение с работой скруббера)	0,0134	$\Delta = 42,5$ %↓
СІР-4	Фильтр №4 (измерение без работы скруббера)	0,0244	$\Delta = 0,0045$ г
	Фильтр №1 (измерение с работой скруббера)	0,0199	$\Delta = 18,4$ %↓
СІР-5	Фильтр №10 (измерение без работы скруббера)	0,0155	$\Delta = 0,0058$ г
	Фильтр №9 (измерение с работой скруббера)	0,0097	$\Delta = 37,4$ %↓

Таблица 2.5 – Результаты измерения массы пыли, собранной приборами АЭРА (ВостНИИ) в рудничной атмосфере проходческого забоя при ведении горных работ

Прибор	Пояснения	Масса, г	Величина снижения массы пыли
АЭРА	Измерение №1 (измерение без работы скруббера)	0,010	$\Delta = 0,005$ г
	Измерение №2 (измерение с работой скруббера)	0,005	$\Delta = 50 \% \downarrow$

Следует отметить, что в отличие от исследований, проведенных на шахте «Им. С.М. Кирова», цикл по отбойке горной массы здесь был на минуту дольше и составлял 4-5 мин.

Измерения по серии экспериментов и схема проведения исследования приведены на рисунке 2.16. При этом полученные результаты по депрессии скрубберов на трех шахтах совпадают в пределах погрешности средств измерений (50 Па), так как фильтры на двух пылеотсасывающих установках в обоих случаях новые.

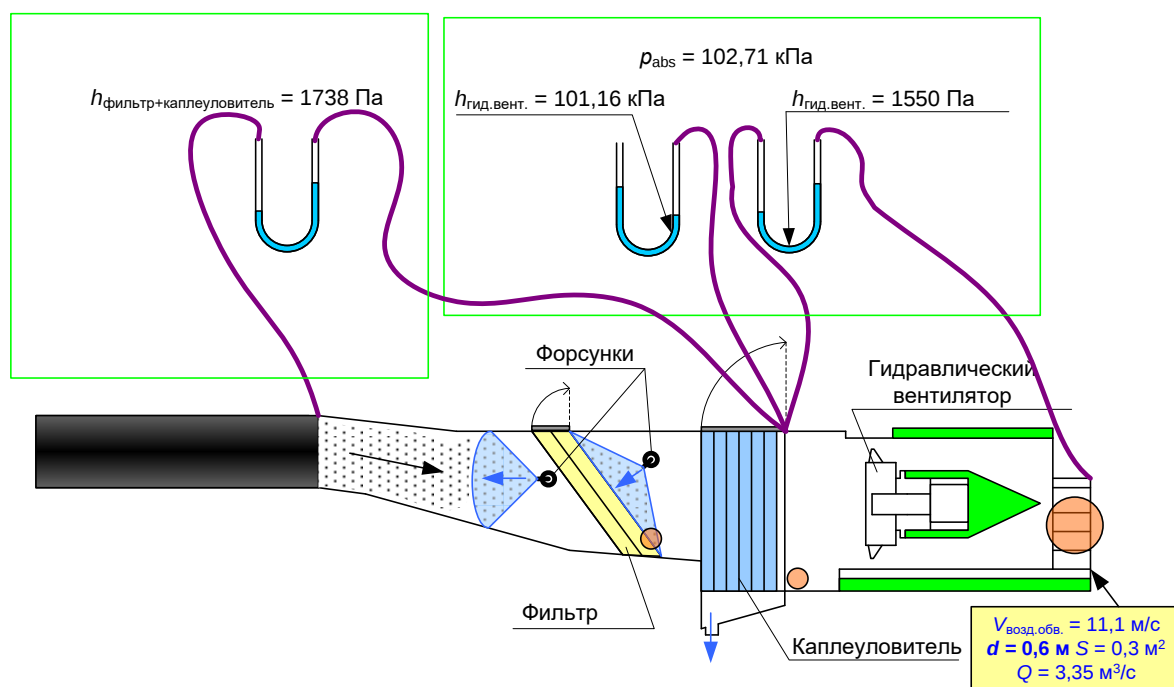


Рисунок 2.16 – Исследования работы скруббера (измерение депрессии и состава пыли)

При проведении исследований через каждую минуту производился отсчет величины депрессии развиваемой гидровентильатором ES6-150HYES6-150HY (рисунок 2.17). За время работы скруббера 5 минут величина депрессии возросла на 15 %, это вызвано загрязнение фильтра и, как следствие, увеличение его аэродинамического сопротивления.

Определяя рабочую точку на вентиляционной характеристике гидровентильатора, (рисунок 2.18) можно видеть, что при увеличении аэродинамического сопротивления (например, при наблюдаемом загрязнении фильтра) рабочая точка выйдет за допустимые границы безопасной и эффективной работы.

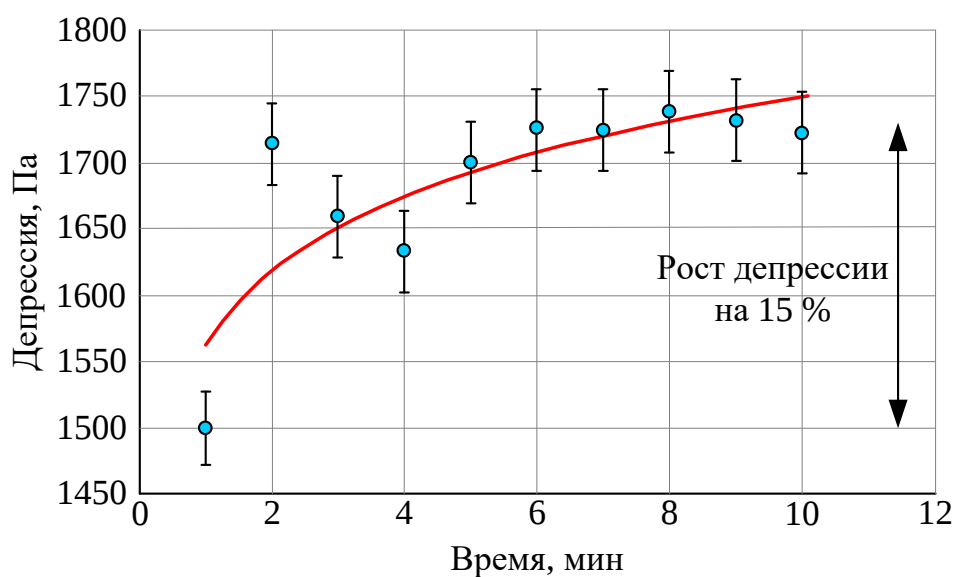


Рисунок 2.17 – Изменения депрессии, развиваемой гидровентильатором при работе за один цикл

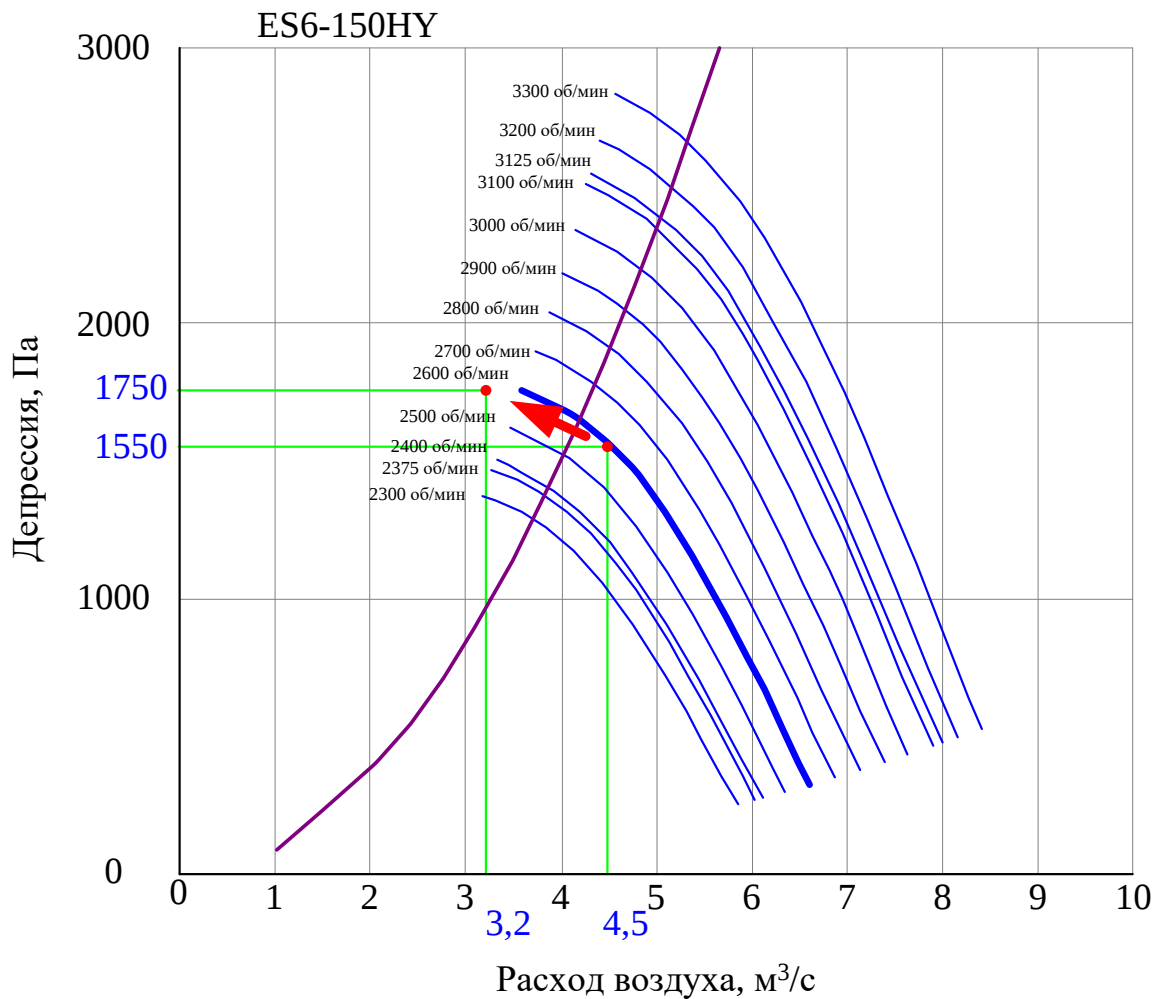


Рисунок 2.18 – Совмещенная характеристика гидровентилятора скруббера с заводской характеристикой сети пылеотсасывающей установки и фактические рабочие точки

Исследованиями установлено, что существенное влияние на пылевую динамику в призабойной части оказывает конструкция проходческого комбайна, расположение его элементов во времени и пространстве, а также месторасположение и отставание конца воздуховода от резиновых щитов, плоскости забоя, элементов конструкции проходческого комбайна (временной крепи). Сам проходческий комбайн оснащен заградительными щитами (рисунок 2.19). Воздух, подающийся по гибкому ставу, разделяется на две части. Одна, отражаясь от резинового щита, поворачивает обратно в сторону, где располагается машинист проходчик. Вторая часть воздушной струи попадает в область разрушения массива к рабочему бару. Эта струя оmyвает забой и по противоположной стороне выносит пылевоздушную

смесь с мелкодисперсной водой. Частично данная смесь выносится под кровлей при условии опущенной временной крепи.

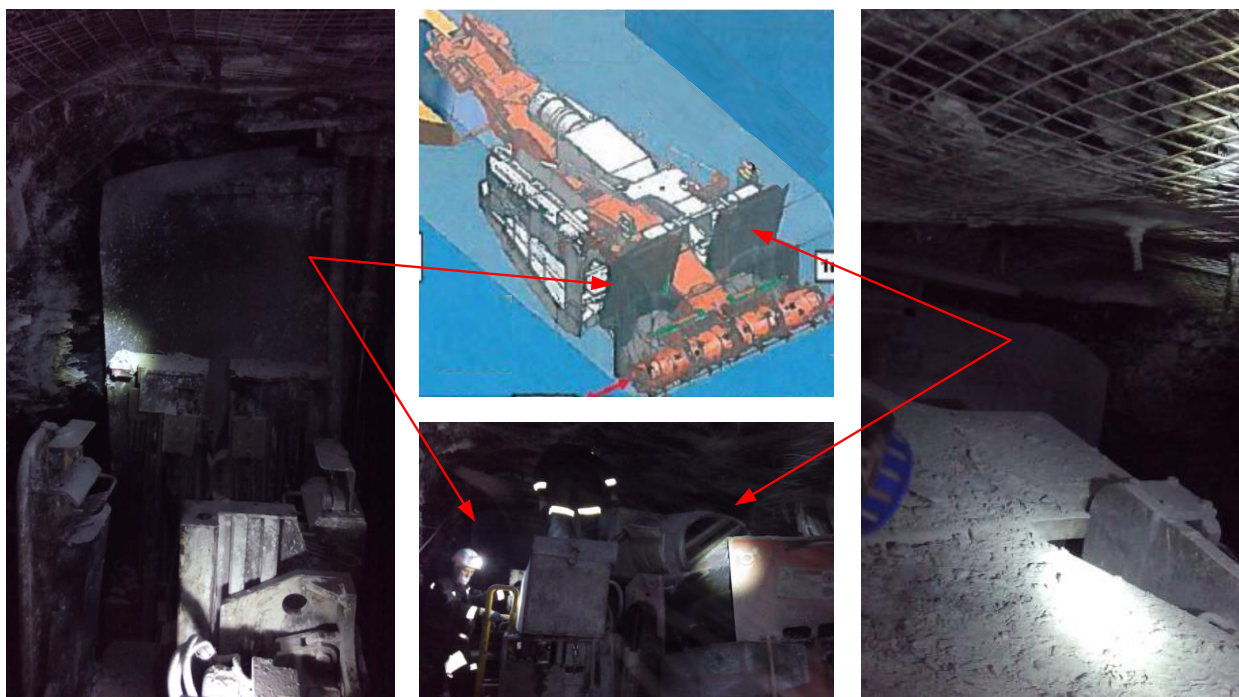


Рисунок 2.19 – Схема расположения резиновых щитов, существенно влияющих на аэродинамику призабойной части

2.4 Результаты анализа состава рудничной пыли, собранной при проведении шахтных исследований

В результате проведения исследований на шахтах было отобрано 30 проб пыли. Она была рассмотрена под микроскопом с 250-кратным увеличением. Фотографии пыли с борта после проведения проходческих работ с использованием всех систем комплексного обеспыливания (в том числе скруббера) (шахта «Им. С.М. Кирова») представлены на рисунке 2.20. Здесь наблюдаются частички угольной и сланцевой (инертной) пыли. Следует отметить, что из-за высокой обводненности разрабатываемого пласта и его хрупкости при отборе проб пыли с бортов горной выработки происходит коагуляция частичек пыли и разрушение массива угля. Полученные данные микроскопической съемки показывают наличие

большого числа крупных частичек. Отдельным моментом следует отметить, что после каждого цикла проходки и крепления происходит осланцевание горной выработки. Возможно, этот процесс происходит не постоянно, а только через прохождение комбайном определенного расстояния. Однако, как показали натурные исследования и микроскопический анализ (рисунок 2.21) большое количество инертной пыли, находящейся на горном оборудовании, при включении дополнительных источников тяги и при перемещении проходческого комбайна (изменение положения относительно воздуховода изменяет аэродинамику всей призабойной части) взмetyвается, попадая в систему пылевого контроля и в скруббер.

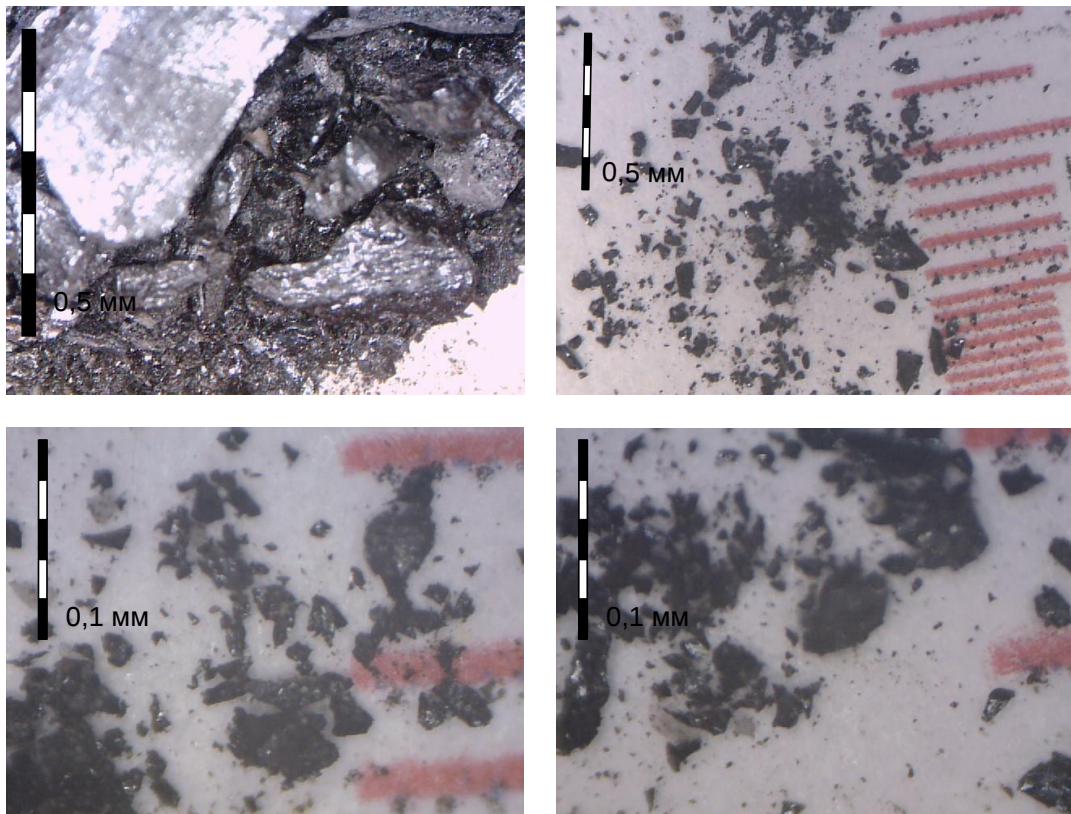


Рисунок 2.20 – Пыль с борта после работы скруббера (шахта «Им. С.М. Кирова»)

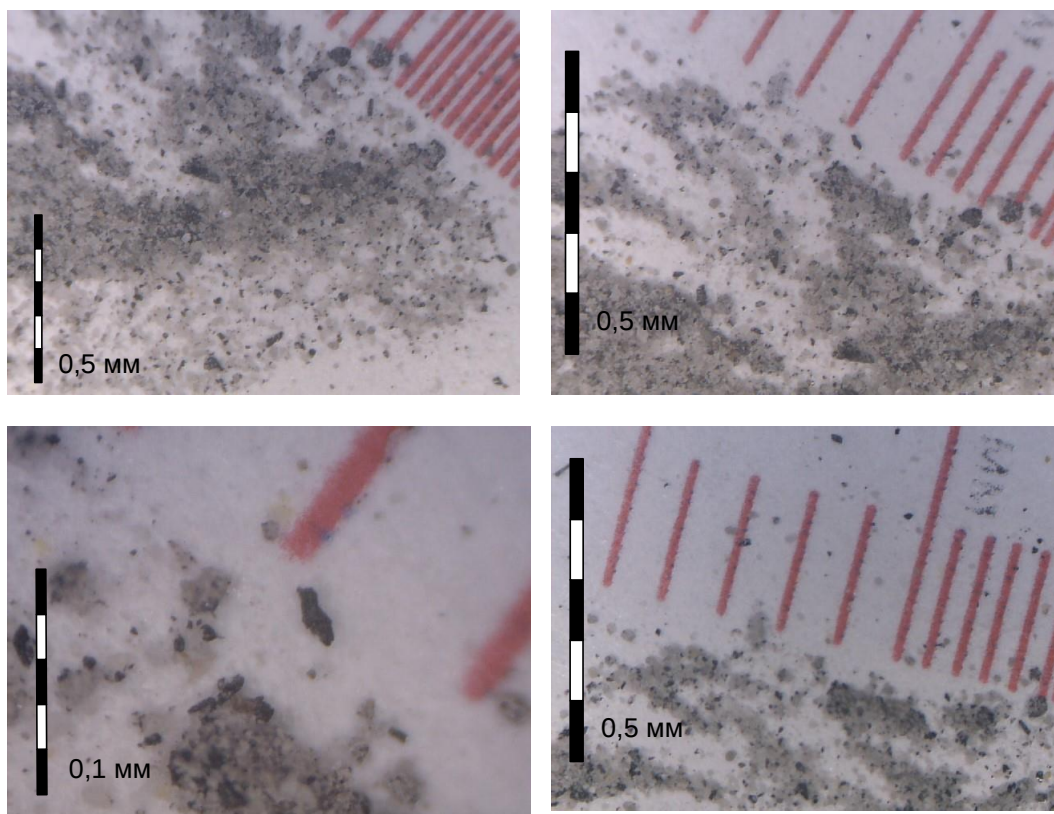


Рисунок 2.21 – Пыль, собранная с горного оборудования после осланцевания
(шахта «Им. С.М. Кирова»)

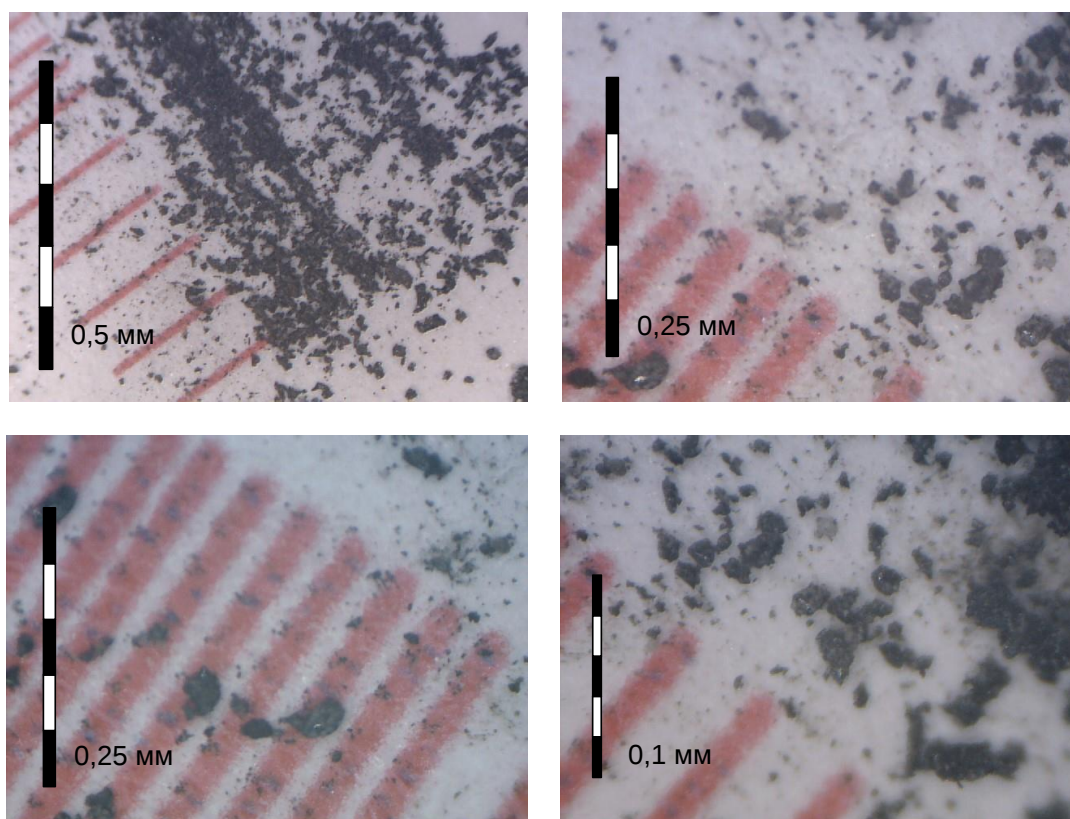


Рисунок 2.22 – Пыль с комбайна после проходки со скруббером с шахты
«Им. 7 Ноября Новая»

С целью получения сведений о размерах частиц рудничной пыли, которая образуется в результате ведения горных работ, находится во взвешенном состоянии, перемещается и оседает в призабойной части, полученные пробы были исследованы на приборе Analysette 22 Compact (заводской номер №22.3500/01050 2008) при содействии сотрудников ФГУБ ИПКОН РАН.

Анализировались две пробы, в которых отсутствовало содержание сланцевой (инертной пыли), так как такая пыль не допускается к загрузке в прибор.

Первая проба отобрана на шахте «Талдинская-Западная 2» в скруббере за каплеуловителем, т.е. эта та пыль, которая попадает в скруббер и проходит через фильтр. Результаты анализа приведены на рисунке 2.23 и в таблицах 2.6 и 2.7. Как видно из результатов, в пробе присутствуют 4 вида пыли (четыре характерные кривые). Следовательно, пылеотсасывающая установка работала на нескольких участках, где разные марки угля, сланцевая (инертная) пыль и вмещающие породы попали в скруббер. Так как просеивание данной пробы не производилось в виду отсутствия видимых частиц размером более 300 мкм, можно сделать вывод о том, что пылевые частицы диаметром более 270 мкм не проходят через фильтр пылеотсасывающей установки.

В пробе было обнаружено четыре вида пыли. При этом средний размер наибольшего количества частиц составил 2 мкм, 5,5 мкм, 30 мкм и 120 мкм соответственно.

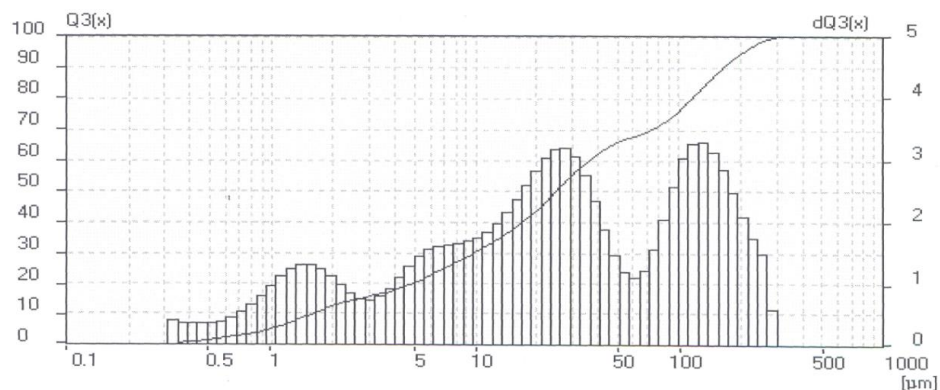


Рисунок 2.23 – Распределение дисперсионного состава пыли из скруббера

Таблица 2.6 – Результаты дисперсионного анализа угольной пыли, прошедшей фильтр в скруббере

№	Параметр	Задаваемые параметры исследований и полученные величины
1	Measuring Range (Измеренный диапазон диаметра частичек пыли)	0,31 мкм – 300,74 мкм
2	Resolution (Разрешение)	62 Chanbels (17 мм/114 мм)
3	Absorption (Абсорбция)	9,00 %
4	Measurement Duration (продолжительность измерения)	5 (Scans)
5	Pump (Насос)	100 %
6	Stirrer	3
7	Ultrasonic (Ультразвук)	Включен
8	d[4,3]	56,48 мкм
9	Aritmetic Mean (Средне арифметическое значение)	56,477 мкм
10	Specific Surface Area (Удельная поверхность)	11979,33 cm ² /cm ²
11	D43	59,59 мкм
12	D32	4,97 мкм
13	D21	0,86 мкм
14	D10	1,58 мкм
15	D42	16,77 мкм
16	D31	2,07 мкм
17	D20	0,66 мкм
18	D41	6,24 мкм
19	D30	1,29 мкм
20	D40	3,32 мкм
Statistical means (статистические данные)		
21	Arithmetic mean diameter (Средний арифметический диаметр)	56,593 мкм
22	Geometric mean diameter (Средний геометрический диаметр)	21,135 мкм
23	Quadratic square mean diameter (Квадратичный квадрат среднего диаметра)	87,974 мкм
24	Harmonic mean diameter (Гармонический средний диаметр)	4,969 мкм

25	Variance (Дисперсия)	4582,5 мкм
26	Mean Square Deviation (Среднее отклонение площади)	67,694 мкм
27	Average Deviation (Среднее отклонение)	54,751 мкм
28	Coefficient of Variation (Коэффициент вариации)	119,616 мкм
Statistical modes (Статистические режимы)		
29	Skewness (Асимметрия)	1,357
30	Curtosis	0,91
31	Span (Охват)	6,461
32	Uniformity (Единообразие)	1,91
33	Mode (Мода)	131,085 мкм
34	Median (Медиана)	24,935 мкм
35	Mean/Median Ratio (Среднее соотношение)	2,27
36	Specific Surface Area (Удельная поверхность)	12075,18 cm ² /cm ²
37	Density (Плотность)	1,0 g/c
38	Form Factor (Фактор формы)	1,0 g/c

Таблица 2.7 – Результаты дисперсионного анализа угольной пыли, прошедшей фильтр в скруббере

Минимальный размер (мкм)	Средний размер (мкм)	Максимальный размер (мкм)	Частота (%)	CumFreg (%)	100 – CumFreg (%)
		0,348	0,40	0,40	99,60
0,348	0,368	0,389	0,35	0,74	99,26
0,389	0,411	0,435	0,34	1,09	98,91
0,435	0,459	0,486	0,34	1,43	98,57
0,486	0,513	0,543	0,35	1,78	98,22
0,543	0,573	0,607	0,38	2,17	97,83
0,607	0,640	0,678	0,44	2,60	97,40
0,678	0,715	0,757	0,53	3,13	96,87
0,757	0,799	0,846	0,65	3,78	96,22
0,846	0,893	0,945	0,80	4,58	95,42
0,945	0,998	1,056	0,96	5,54	94,46
1,056	1,115	1,180	1,11	6,65	93,35
1,180	1,245	1,318	1,23	7,78	92,22
1,318	1,391	1,473	1,29	9,17	90,83
1,473	1,555	1,646	1,29	10,46	89,54
1,646	1,737	1,839	1,23	11,68	88,32

1,839	1,940	2,054	1,11	12,79	87,21
2,054	2,168	2,295	0,97	13,76	86,24
2,295	2,422	2,564	0,84	14,60	85,40
2,564	2,706	2,865	0,75	15,35	84,65
2,865	3,024	3,201	0,73	16,08	83,92
3,201	3,378	3,576	0,78	16,86	83,14
3,576	3,774	3,995	0,91	17,77	82,23
3,995	4,217	4,464	1,09	18,87	81,13
4,464	4,711	4,987	1,28	20,15	79,85
4,987	5,264	5,572	1,45	21,59	78,41
5,572	5,881	6,226	1,56	23,15	76,85
6,226	6,570	6,956	1,61	24,76	75,24
6,956	7,341	7,771	1,63	26,40	73,60
7,771	8,201	8,682	1,65	28,05	71,95
8,682	9,163	9,700	1,69	29,74	70,26
9,700	10,238	10,838	1,75	31,49	68,51
10,838	11,438	12,109	1,85	33,34	66,66
12,109	12,779	13,528	1,99	35,32	64,68
13,528	14,278	15,115	2,16	37,48	62,52
15,115	15,952	16,887	2,37	39,85	60,15
16,887	17,822	18,867	2,61	42,46	57,54
18,867	19,912	21,079	2,85	45,31	54,69
21,079	22,247	23,551	3,05	48,36	51,64
23,551	24,855	26,313	3,19	51,55	48,45
26,313	27,770	29,398	3,20	54,75	45,25
29,398	31,026	32,845	3,07	57,82	42,18
32,845	34,664	36,696	2,78	60,59	39,41
36,696	38,729	40,999	2,36	62,95	37,05
40,999	43,270	45,807	1,89	64,85	35,15
45,807	48,343	51,178	1,47	66,32	33,68
51,178	54,012	57,179	1,18	67,50	32,50
57,179	60,345	63,883	1,09	68,59	31,41
63,883	67,421	71,374	1,22	69,81	30,19
71,374	75,327	79,743	1,56	71,37	28,63
79,743	84,159	89,093	2,05	73,42	26,58
89,093	94,028	99,540	2,59	76,01	23,99
99,540	105,053	111,212	3,04	79,04	20,96
111,212	117,371	124,252	3,28	82,33	17,67
124,252	131,133	138,822	3,30	85,63	14,37
138,822	146,510	155,099	3,14	88,77	11,23
155,099	163,689	173,286	2,85	91,63	8,37
173,286	182,883	193,605	2,49	94,11	5,89
193,605	204,327	216,306	2,09	96,20	3,80

216,306	228,285	241,669	1,73	97,94	2,06
241,669	255,053	270,007	1,49	99,42	0,58
270,007	284,960	299,913	0,58	100,00	0,00

Вторая проба отбиралась непосредственно после проведения проходческих работ при работе скруббера на шахте «Им. 7 ноября – Новая». Пыль собиралась с поверхности горного оборудования в районе месторасположения проходчика, управляющего комбайном. Именно эта пыль витает в воздухе, оседает в призабойной части и попадает в органы дыхания горнорабочих. Результаты анализа приведены на рисунке 2.24 и в таблицах 2.8 и 2.9. Перед загрузкой в аппарат Analysette 22 Compact пыль просеивалась на сите 300 мкм.

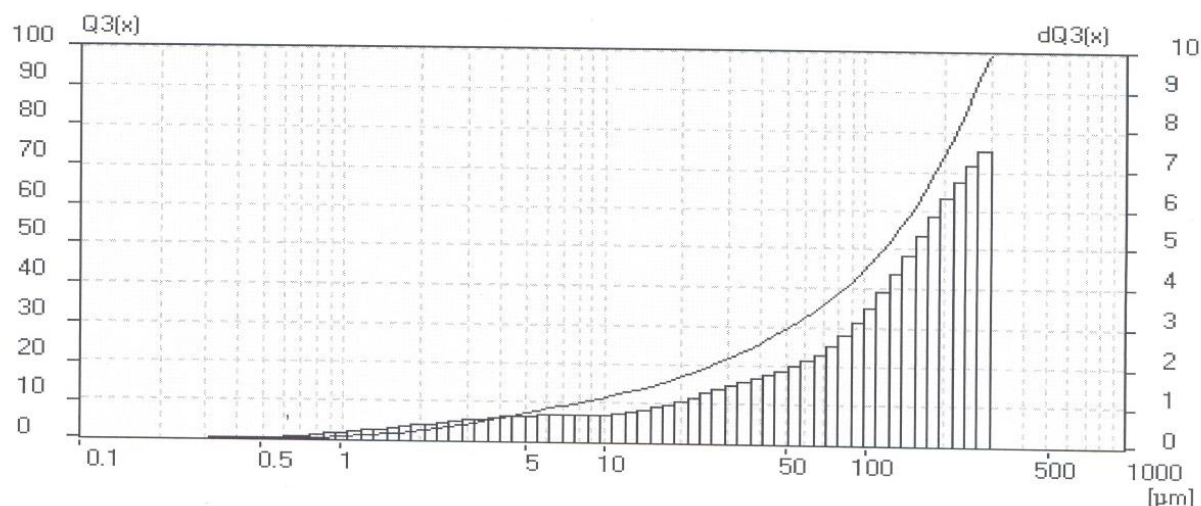


Рисунок 2.24 – Дисперсный состав пыли, взятой с горного оборудования у рабочего места проходчика

Таблица 2.8 – Результаты дисперсионного анализа угольной пыли, собранной с горного оборудования при работе пылеотсасывающей установки

№	Параметр	Задаваемые параметры исследований и полученные величины
1	Measuring Range (Измеренный диапазон диаметра частичек пыли)	0,31 мкм – 300,74 мкм
2	Resolution (Разрешение)	62 Chanbels (17 мм/114 мм)
3	Absorption (Абсорбция)	8,00 %
4	Measurement Duration	5 (Scans)

	(продолжительность измерения)	
5	Pump (Насос)	100 %
6	Stirrer	3
7	Ultrasonic (Ультразвук)	On (Включено)
8	d[4,3]	125,24 мкм
9	Aritmetic Mean (Средне арифметическое значение)	125,244 мкм
10	Specific Surface Area (Удельная поверхность)	3570,62 cm ² /cm ²
11	D43	125,44 мкм
12	D32	16,79 мкм
13	D21	1,55 мкм
14	D10	7,8 мкм
15	D42	45,89 мкм
16	D31	5,1 мкм
17	D20	1,04 мкм
18	D41	14,83 мкм
19	D30	2,63 мкм
20	D40	6,92 мкм
Statistical means (статистические данные)		
21	Arithmetic mean diameter (Средний арифметический диаметр)	125,44 мкм
22	Geometric mean diameter (Средний геометрический диаметр)	71,711 мкм
23	Quadratic square mean diameter (Квадратичный квадрат среднего диаметра)	155,37 мкм
24	Harmonic mean diameter (Гармонический средний диаметр)	16,788 мкм
25	Variance (Дисперсия)	8489,486 мкм ²
26	Mean Squire Deviation (Среднее отклонение площади)	92,138 мкм
27	Average Deviation (Среднее отклонение)	80,078 мкм
28	Coefficient of Variation (Коэффициент вариации)	73,452 мкм
Statistical modes (Статистические режимы)		
29	Skewness (Асимметрия)	0,24
30	Curtosis	-1,262
31	Span (Охват)	2,137
32	Uniformity (Единообразие)	0,68

33	Mode (Мода)	287,976 мкм
34	Median (Медиана)	117,93 мкм
35	Mean/Median Ratio (Среднее соотношение)	1,064
36	Specific Surface Area (Удельная поверхность)	3574,06 cm ² /cm ²
37	Density (Плотность)	1,0 g/c
38	Form Factor (Фактор формы)	1,0 g/c

Таблица 2.9 – Результаты дисперсионного анализа угольной пыли, прошедшей фильтр в скруббере

Минимальный размер (мкм)	Средний размер (мкм)	Максимальный размер (мкм)	Частота (%)	CumFreg (%)	100 – CumFreg (%)
	<	0,348	0,40	0,40	99,60
0,348	0,368	0,389	0,35	0,74	99,26
0,389	0,411	0,435	0,34	1,09	98,91
0,435	0,459	0,486	0,34	1,43	98,57
0,486	0,513	0,543	0,35	1,78	98,22
0,543	0,573	0,607	0,38	2,17	97,83
0,607	0,640	0,678	0,44	2,60	97,40
0,678	0,715	0,757	0,53	3,13	96,87
0,757	0,799	0,846	0,65	3,78	96,22
0,846	0,893	0,945	0,80	4,58	95,42
0,945	0,998	1,056	0,96	5,54	94,46
1,056	1,115	1,180	1,11	6,65	93,35
1,180	1,245	1,318	1,23	7,87	92,13
1,318	1,391	1,473	1,29	9,17	90,83
1,473	1,555	1,646	1,29	10,46	89,54
1,646	1,737	1,839	1,23	11,68	88,32
1,839	1,940	2,054	1,11	12,79	87,21
2,054	2,168	2,295	0,97	13,76	86,24
2,295	2,422	2,564	0,84	14,60	85,40
2,564	2,706	2,865	0,75	15,35	84,65
2,865	3,024	3,201	0,73	16,08	83,92
3,201	3,378	3,576	0,78	16,86	83,14
3,576	3,774	3,995	0,91	17,77	82,23
3,995	4,217	4,464	1,09	18,87	81,13
4,464	4,711	4,987	1,28	20,15	79,85
4,987	5,264	5,572	1,45	21,59	78,41
5,572	5,881	6,226	1,56	23,15	76,85
6,226	6,570	6,956	1,61	24,76	75,24

6,956	7,341	7,771	1,63	26,40	73,60
7,771	8,201	8,682	1,65	28,05	71,95
8,682	9,163	9,700	1,69	29,74	70,26
9,700	10,238	10,838	1,75	31,49	68,51
10,838	11,438	12,109	1,85	33,34	66,66
12,109	12,779	13,528	1,99	35,32	64,68
13,528	14,278	15,115	2,16	37,48	62,52
15,115	15,952	16,887	2,37	39,85	60,15
16,887	17,822	18,867	2,61	42,46	57,54
18,867	19,912	21,079	2,85	45,31	54,69
21,079	22,247	23,551	3,05	48,36	51,64
23,551	24,855	26,313	3,19	51,55	48,45
26,313	27,770	29,398	3,20	54,75	45,25
29,398	31,026	32,845	3,07	57,82	42,18
32,845	34,664	36,696	2,87	60,59	39,41
36,696	38,729	40,999	2,36	62,95	37,05
40,999	43,270	45,807	1,89	64,85	35,15
45,807	48,343	51,178	1,47	66,32	33,68
51,178	54,012	57,179	1,18	67,50	32,50
57,179	60,345	63,883	1,09	68,59	31,41
63,883	67,421	71,374	1,22	69,81	30,19
71,374	75,327	79,743	1,56	71,37	28,63
79,743	84,159	89,093	2,05	73,42	26,58
89,093	94,028	99,540	2,59	76,01	23,99
99,540	105,053	111,212	3,04	79,04	20,96
111,212	117,371	124,252	3,28	82,33	17,67
124,252	131,133	138,822	3,30	85,63	14,37
138,822	146,510	155,099	3,14	88,77	11,23
155,099	163,689	173,286	2,85	91,63	8,37
173,286	182,883	193,605	2,49	84,11	15,89
193,605	204,327	216,306	2,09	96,20	3,80
216,306	228,285	241,669	1,73	97,94	2,06
241,669	255,053	270,007	1,49	99,42	0,58
270,007	284,960	299,913	0,58	100,00	0,00

Полученные данные микроскопического и дифференциального состава пыли были использованы при проведении численных расчетов аэро-пылевой динамики проходческого участка при компьютерном моделировании. Полученные значения диаметров пыли использовались как начальные условия при численных расчетах. Сведения, полученные о свойствах пыли, позволяют использовать их для теоретических исследований по разработке

рекомендаций пылевого контроля. Так при осланцевании горных выработок растет общая запыленность призабойной части.

2.5 Исследования по определению коэффициента запыленности рудничной атмосферы призабойной части тупиковой горной выработки

Нормативными документами [13, 19] расчет интенсивности пылеотложения рекомендовано проводить двумя способами: по фактическому значению отложившейся на подложке угольной пыли или по изменению ее концентрации в 2-х контрольных точках ($c(x_1)$ и $c(x_2)$ рисунка 2.25).

Расчет изменения концентрации пыли по длине выработок для получения указанных выше величин $c(x_1)$ и $c(x_2)$ рассмотрен в целом ряде научных работ [20-22]. Предложенные авторами зависимости с примечаниями приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Сводные данные по существующим зависимостям определения концентрации пыли в любой точке горной выработки

Вид функции	Примечание	Автор
$c(x) = c_0 \cdot e^{-k \cdot \frac{x}{H} \cdot \frac{v}{v_{\text{возд.}x}}} \quad (2.1)$	Не учитывает полидисперсный характер рудничного аэрозоля	В.Н. Воронин [20]
$c(x) = c_1 \cdot e^{-\frac{x}{R}(a+b) \cdot \frac{v_1}{v_{\text{возд.}x}}} + \dots + c_n \cdot e^{-\frac{x}{R}(a+b) \cdot \frac{v_n}{v_{\text{возд.}x}}} \quad (2.2)$	Зависимость получена с учетом начальных концентраций отдельных фракций пыли, входящих в состав аэрозоля. Трудно определяются эмпирические коэффициенты.	А.С. Бурчаков [21]
$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.}x}}} \quad (2.3)$	Трудно определяется эмпирический коэффициент.	М.И. Нецепляев [81, 82]

где c_0 или c_i – концентрация пыли у источника или в начальной контрольной точке;

k – коэффициент перемешивания;

v – средняя скорость осаждения частиц в спокойном воздухе;

v_i – скорость витания i -й фракции пыли;

$v_{возд.x}$ – скорость движения воздуха в точке определения концентрации пыли, м/с

R – гидравлический радиус выработки;

a, b, k_v – эмпирические коэффициенты;

Δx – расстояние от начальной точки контроля или в общем случае – приращение координаты x , м

Для расчета распределения концентрации пыли вдоль выработок в условиях использования различных способов обеспыливания (орошения, пылеотсоса) при проектировании новых проходческих участков необходимо более детальное изучение следующих вопросов, не рассмотренных в ранее выполненных исследованиях:

- установление численных значений эмпирического коэффициента k_v (формула 2.3 таблицы 2.9) для забоев с применением современной высокопроизводительной техники;
- проведение анализа дисперсного состава пыли в подготовительных забоях и в прилегающих горных выработках с учетом различных режимов проветривания и работы современных систем орошения и аспирационного пылеудаления.

Экспериментальные исследования производились на 8 шахтах компании АО «СУЭК». Условия эксперимента во всех случаях одинаково выдерживались. Скорость воздуха в проходческих забоях шахт находится в диапазоне 0,25 м/с ÷ 0,5 м/с. При этом, как сообщалось ранее, в зоне пылеотсоса (50 м от забоя) процессы изменения концентрации витающей пыли описываются эмпирической зависимостью (2.3), для которой в настоящей работе экспериментально для участка длиной 50 м от плоскости проходческого забоя определяется коэффициент k_v по формуле

$$k_v = \frac{v_{\text{возд.х}} \left(\frac{c_0}{c(x, v_x)} - 1 \right)}{\Delta x} \quad (2.4)$$

где Δx – расстояние от начальной точки контроля, $\Delta x = 50$ м;

c_0 – концентрация пыли у источника, $c_0 = c_1$ мг/м³;

$c(x, v_x)$ – концентрация пыли контрольной точке, $c(x, v_x) = C_2$ мг/м³;

$v_{\text{возд.х}}$ – скорость движения воздуха в контрольной точке, $v_{\text{возд.х}} = 0,25$ м/с.

Пример общей схемы проведения замеров приведена на рисунке 2.25.

Порядок проведения эксперимента следующий:

- определялась концентрация пыли на расстоянии 8÷10 метров от места пылеобразования (в средней части комбайна) в процессе проходки выработки (замерная точка 1);
- определялась концентрация пыли на расстоянии 30 метров от комбайна (или 40 метров от забоя) – (замерная точка 2);
- из уравнения (2.4) по замеренным значениям концентрации пыли определялся эмпирический коэффициент k_v . Результаты исследований сведены в таблицу 2.10.

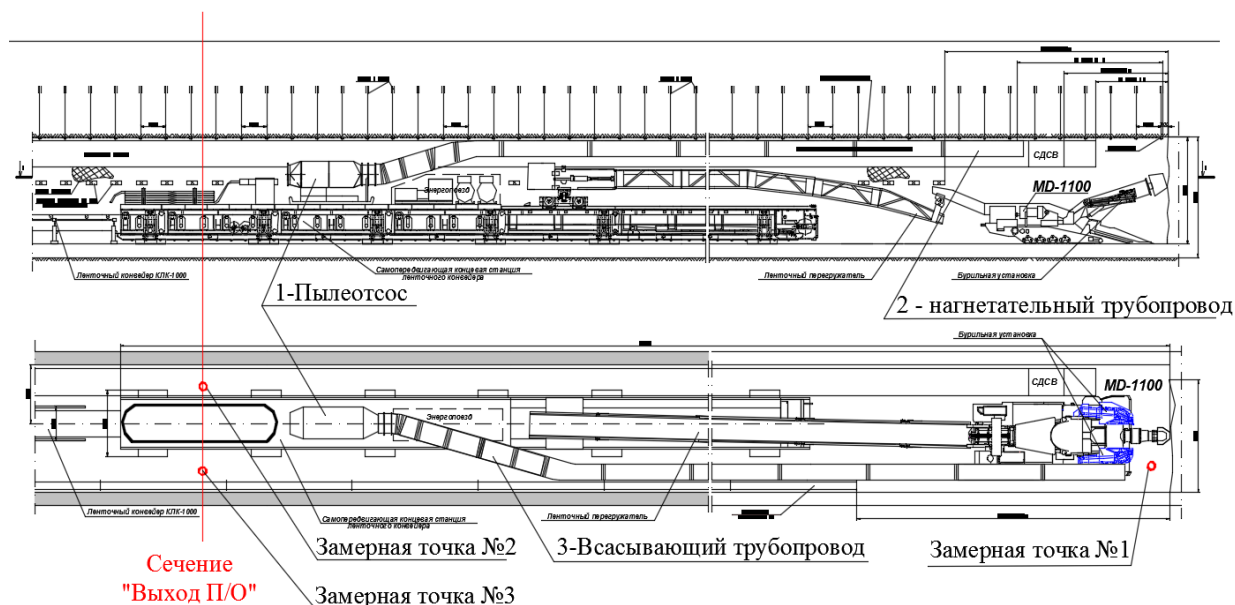


Рисунок 2.25 – Технологическая схема размещения системы обеспыливания к комбайну DOSKOMD1100 и размещение замерных точек

Среднее по всем экспериментальным данным (таблицы 2.4) значение k_v равно 0,01041, поэтому для расчетов уравнение (2.3) предлагается модифицировать к виду

$$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + 0,01041 \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.х}}}}, \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) с экспериментально полученной величиной коэффициента k_v использовано в качестве базовой зависимости при сопоставлении распределения концентрации пыли в выработках при применении и без применения систем пылеотсоса в последующих работах.

Таблица 2.10 – Динамика запыленности на участке от плоскости проходческого забоя и до 50 м от него и величина эмпирического коэффициента k_v

Шахта	Выработка	C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	k_v	$C(0)$, мг/м ³ (прогноз)	$C(50)$, мг/м ³ (прогноз)
Им. С.М. Кирова	25-03 ФПУ	163,8	90,5	0,0135	207,9	71,3
Им. С.М. Кирова	24-60 Конвейерная печь	145,1	99,2	0,0077	167,4	85,9
Им. С.М. Кирова	24-62 Вентиляционная печь	155,0	91,7	0,0115	190,6	74,6
Им. А. Д. Рубана	Путевой штрек № 12-08	157,5	98,625	0,0099	188,7	82,3
Им. А. Д. Рубана	Конвейерный бремсберг № 84	93,4	72,7	0,0047	102,2	66,4
Им. А. Д. Рубана	Путевой штрек № 814	117,9	84,0	0,0067	133,8	74,0
Им. А. Д. Рубана	Конвейерный штрек № 812	162,4	98,1	0,0109	197,9	80,5
Им. А. Д. Рубана	Магистральный путевой штрек № 81	125,9	91,3	0,0063	141,7	81,0
Им. 7 Ноября	Дренажный штрек № 13-24	774,3	339,2	0,0107	937,0	279,5
Им. 7 Ноября	Конвейерный штрек № 26-8	138,7	77,6	0,0131	175,1	61,4
Полысаевская	17-51 Конвейерный штрек	177	106,0	0,0112	216,5	86,7
Полысаевская	17-53 Вентиляционный штрек	102,0	70,0	0,0076	117,5	60,7
Комсомольская	Наклонный квершлаг на пл. Толмачевский	179,2	97,6	0,0139	229,1	76,3

Комсомольская	Параллельный штрек №17-35	126,8	97,6	0,0050	139,4	88,7
Им. В.Д. Ялевского	Конвейерный ствол пл. 50 ФПП	143,8	95,4	0,0085	168,1	81,6
Им. В.Д. Ялевского	Путевой ствол пл. 50 ФПП	150,3	77,925	0,0155	196,8	59,5
Им. В.Д. Ялевского	Диагональный просек 50-04	138,1	76,65	0,0134	175,0	60,5
Им. В.Д. Ялевского	Конвейерный штрек 52-13	166,2	103,35	0,0101	199,9	85,9
Им. В.Д. Ялевского	Конвейерный штрек 52-14	116,6	84,075	0,0064	131,6	74,5
Им. В.Д. Ялевского	Конвейерный уклон	131,6	86,55	0,0087	154,3	73,8
Талдинская-Западная-1	Сбойка между уклонами	173,4	97,35	0,0130	218,6	77,2
Талдинская-Западная-1	Параллельный штрек пл.66	175,4	97,95	0,0132	221,7	77,5
Талдинская-Западная-2	Фланговый параллельный штрек	158,5	103,8	0,0088	186,3	88,3
$k_{вср.} =$				0,010013043±0,005		

Выводы

1. В целом же на основе анализа принципов действия систем обеспыливания и исследований по существующим техническим решениям разработана классификация, позволяющая структурировать дальнейшие исследования в области методического обеспечения выбора пылеотсасывающих систем при проходке горных выработок.
2. Установленные на проходческих комбайнах «Sandvik» системы пылеудаления HCN300/1 НУ производства компании CFT GmbH при вводе их в эксплуатацию в составе проходческого комплекса сложно настроить на эффективную работу из-за отсутствия возможности контроля основных параметров – производительности вентилятора, сопротивления фильтрующих элементов, расхода и давления воды.

3. Конструктивные недостатки всаса скруббера способствуют заполнению системы пылеочистки штыбом и более крупными кусками горной массы. Это приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и, как следствие, увеличению депрессии и падению производительности скруббера.
4. Натурными исследованиями установлено, что при работе на проходческих комбайнах «Sandvik» системы пылеудаления HCN300/1 НУ в течение 5 минут происходит увеличение депрессии вентилятора скруббера на 15 %. Падение эффективности работы можно характеризовать как неправильный режим работы.
5. В паспортах на установку ВМП не учитывается факт работы скруббера. В случае неконтролируемой приборами производительности скруббера $250 \div 300 \text{ м}^3/\text{мин}$ при подаче воздуха в забой расчетного расхода воздуха $300 \text{ м}^3/\text{мин}$ (по минимальной скорости воздуха $0,25 \text{ м/с}$) возможно образование непроветриваемых зон (слоевых скоплений метана) над комбайном.
6. При выполнении комплекса противопылевых мероприятий, включающих в себя орошение в нескольких зонах, пылеотсос и осланцевание в призабойной части в рудничной атмосфере наблюдается смесь всех видов пыли (угольная, породная и сланцевая) с мелкодисперсными капельками воды. Применяемые приборы контроля запыленности измеряют суммарную концентрацию данной сложной смеси.
7. Проведенные исследования на угольных шахтах, где применяют пылеотсасывающие установки, позволили определить величину коэффициента запыленности $k_v = 0,01041 \pm 0,005$. Данный коэффициент позволяет оценить величину ожидаемой запыленности на расстоянии до 50 м от плоскости забоя по зависимости

$$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + 0,01041 \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.}x}}}$$

при проектировании проветривания проходческих участков с учетом работы комплекса мероприятий по снижению уровня запыленности рудничной атмосферы призабойной части тупиковых горных выработок.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ И РЕЖИМОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ

Трехмерное компьютерное моделирование аэрогазодинамических процессов является распространенным способом проведения научных исследований. В рудничной аэрологии данный способ активно применяется целым рядом учебных и научных организаций.

Трехмерное моделирование применяется в Санкт-Петербургском горном университете для расчетов воздухораспределения при строительстве и эксплуатации тоннелей [36, 37]. Работы проводятся под руководством профессора С.Г. Гендлера.

В Горном институте УрО РАН численное моделирование применяется в научных работах по оценке эффективности вентиляции рудников [38], изучению тепловых режимов проветривания, работы калориферов [39], применению эжекторов [88] и анализу местных сопротивлений [41]. Исследования проводятся под руководством докторов наук Б.П. Казакова, Л.Ю. Левина, А.В. Шалимова, А.В. Зайцева и др.

Моделированием аэродинамических процессов, протекающих в угольных шахтах, также занимаются в ИПКОН РАН [42-45] и Московском горном институте НИТУ «МИСиС» [46-51]. Здесь следует отметить тесные научные связи двух организаций, обусловленные единой научной школой, заложенной академиком А.А. Скочинским [52].

Вышеперечисленные учреждения в настоящее время наиболее активно применяют программное обеспечение Ansys CFD (computational fluid dynamics) и Solid Works. Также существуют аналогичные отечественные программы FlowVision CFD, однако их применение ограничено.

Для исследований пылевой динамики использовался программный комплекс Ansys CFD (лицензия программное обеспечение № 612013 от 31.12.2013), так как он имеет широкий набор различных моделей динамики пыли.

Полученные с натурных экспериментов данные мы использовали для построения моделей, а также для выбора начальных и граничных условий (глава 3).

3.1 Порядок и требования к построению виртуальных аналогов подземных аэро- пылединамических систем и расчетных сеток

В основе проведения численных расчетов лежат трехмерные модели, предложенные называть виртуальными аналогами подземных аэрогазодинамических систем [53]. Как показано в работах [43-45], одной из важных задач является максимально точное приближение всех реальных размеров горного оборудования и выработок к размерам в модели.

Объектом исследований в работе являются проходческие забои, в которых применяются проходческие комбайны с встроенным пылеотсосом.

Как показали натурные исследования, основными элементами, определяющими аэродинамику и распределение пыли в призабойной части, являются проходческий комбайн и воздуховод.

К второстепенным элементам призабойной части можно отнести средства дальнейшей транспортировки горной массы – это самоходные вагоны, ленточный или скребковый конвейер.

Для проведения численных расчетов достаточным является разработка виртуального аналога проходческого комбайна, состоящего из простых фигур (рисунок 3.1). Собранные вместе (рисунок 3.2) они на 90 % отражают фактическую геометрию проходческого комбайна. Мелкими деталями (менее 0,05 м) при проведении расчетов мы пренебрегли, делая, таким образом, первое допущение.

Элементы стрелы с баром и перегружателя проходческого комбайна могут изменять свое положение относительно горизонтальной плоскости.

Проведенные нами натурные наблюдения подтвердили тот факт, что пылевая динамика существенно зависит от месторасположения бара и

перегрузателя. Чем выше они подняты, тем больше запыленность призабойной части.

Как показали исследования на шахтах, воздуховод размещается у борта с левой или правой стороны под кровлей. При этом выбор стороны размещения воздуховода обусловлен лишь удобством подвешивания труб в горной выработке от вентилятора местного проветривания. В течение проходки горной выработки он может быть перевешен с одной стороны на другую.

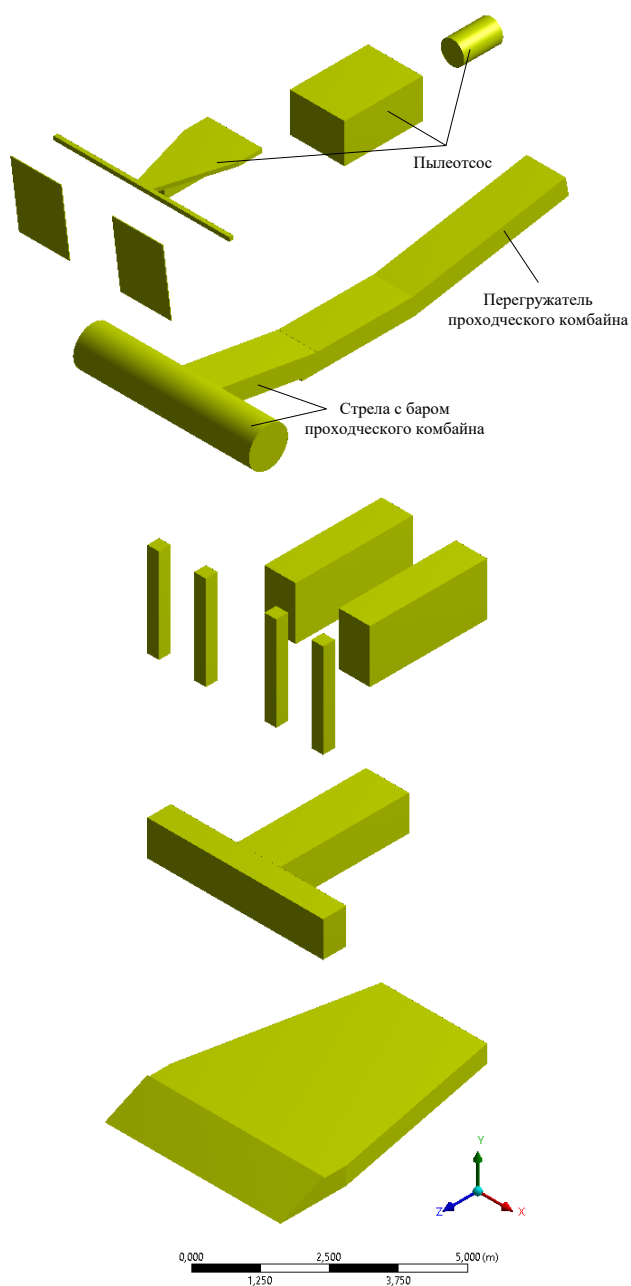
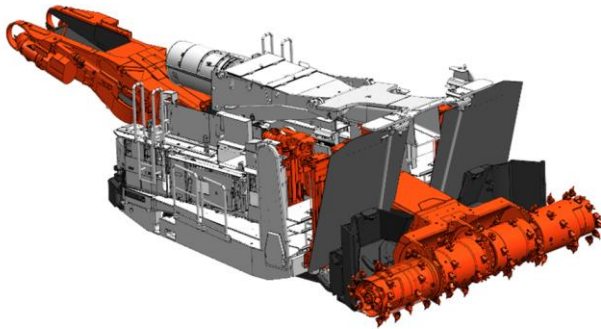


Рисунок 3.1 – Основные элементы проходческого комбайна

Проходческий комбайн «Sandvik» MB670-1LH



Виртуальный аналог

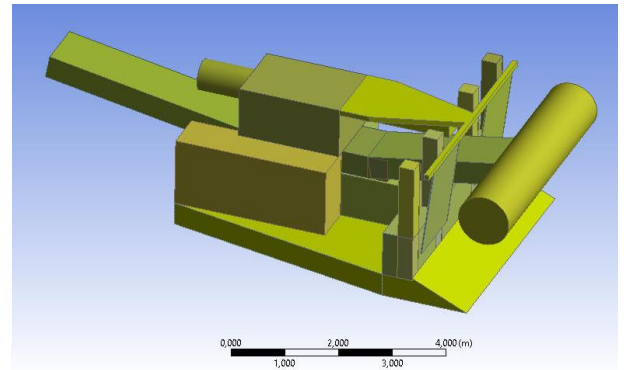


Рисунок 3.2 – Проходческий комбайн и его виртуальный аналог

Длина тупиковой части горной выработки определяется условиями контроля запыленности (50 м от плоскости забоя [13, 14]). Для оценки расстояния, на котором происходит оседание пыли за счет гравитационных сил, длина тупиковой части горной выработки принимается равной 100 м. Длину выработки можно увеличить. При этом увеличится время проведения расчетов. Итоговый виртуальный аналог представлен на рисунке 3.3.

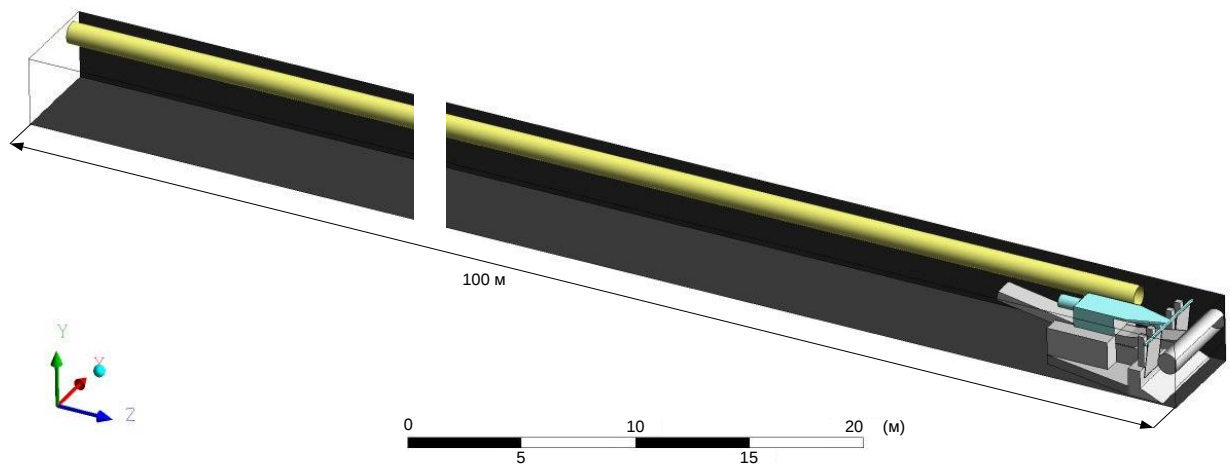


Рисунок 3.3 – Расчетная модель

Вторым важным вопросом при проведении моделирования является порядок разбиения трехмерной модели на элементарные объемы. Как показали исследования [54], для вычисления аэрогазодинамики оптимальными являются элементы, представленные тетраэдрами. Их автоматическая генерация со сгущением в местах интенсивного

пылевыведения позволяет повысить скорость проведения вычислений за счет быстрой сходимости по невязкам и количества расчётных точек.

Расчет высоты первого слоя элементов (пристеночного слоя) производится в следующей последовательности. Сначала рассчитывается число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность воздуха (в расчетах принимается равной 1,23 кг/м³);

v – скорость движения воздуха (в горной выработке по результатам натурных экспериментов она в среднем равна 0,25 м/с);

d – гидравлический диаметр горной выработки определяется по формуле $d = 4 \cdot S / P$, где сечение горной выработки $S = 21$ м², а периметр горной выработки равен $P = 16$ м, тогда $d = 4 \cdot S / P = 4 \cdot 21 / 16 = 5,25$ м;

μ – динамическая вязкость воздуха (в горной выработке при измеренной температуре воздуха 23-25 °С она равна 0,0000181 Па/с).

Тогда

$$Re = \frac{1,23 \cdot 0,25 \cdot 5,25}{0,0000181} = 89192.$$

Затем для оценки коэффициента поверхностного трения (c_f) используется эмпирическая зависимость для полностью развитого турбулентного потока [55]

$$c_f = [2 \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3} = 0,006. \quad (3.2)$$

После вычисления коэффициента поверхностного трения вычисляется напряжение сдвига стенки

$$\tau_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_f = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,25^2 \cdot 0,006 = 0,00023 \text{ Па}. \quad (3.3)$$

Зная напряжение сдвига стенки, может быть вычислена скорость трения

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,00023}{1,23}} = 0,0137, \text{ м/с}. \quad (3.4)$$

Уравнение для определения y_+ [60] может быть преобразовано для определения высоты центра элемента от поверхности с учетом того, что для моделей турбулентности $k-\epsilon$ $30 \leq y_+ \leq 300$ [60] при $y_+ = 100$,

тогда

$$y_p = \frac{y_+ \cdot \mu}{u_\tau \cdot \rho} = \frac{100 \cdot 0,0000181}{0,0137 \cdot 1,23} = 0,1 \text{ м.} \quad (3.5)$$

Это значение можно использовать для определения размера высоты первой ячейки от (бортов, почвы и кровли) при создании начальной сетки

$$y_n = 2 \cdot y_p = 0,2 \text{ м.} \quad (3.6)$$

Для представленной трехмерной модели (рисунок 3.3) с учетом проведенных исследований по требованиям была построена сетка. Элемент ее представлен на рисунке 3.4.

Общее количество элементов равно 4032002, количество узлов – 1378165. На поверхностях с одним из линейных параметров меньше 0,1 м для точности расчетов делалось сгущение сетки так, чтобы на данной линии было минимум 5 узлов.

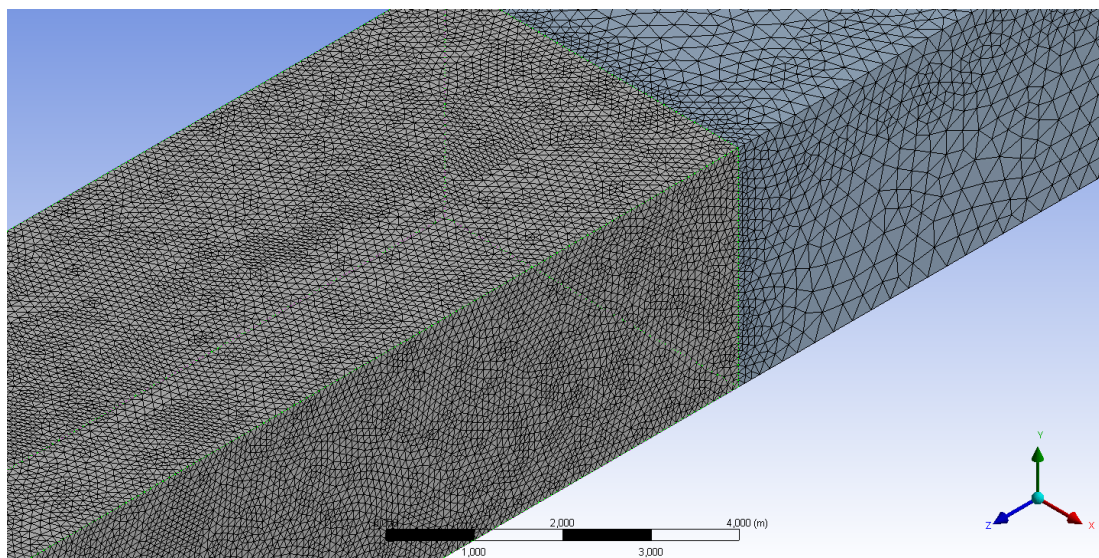


Рисунок 3.4 – Вид применяемой расчетной сетки

Призобойная часть сделана с более мелкой сеткой с максимальным размером ребра тетраэдра равным 0,1 м. Это сделано потому, что локально в месте расположения комбайна резко увеличивается скорость движения воздуха.

3.2 Выбор начальных и граничных условий численных расчетов

Третьей важной составляющей компьютерного моделирования является правильный выбор краевых (начальных и граничных) условий, выбора моделей, описывающих процессы движения воздушных струй и пыли в горных выработках.

В настоящей работе не ставилась задача научного поиска оптимальных моделей пылераспределения в горных выработках. Обозначенная выше задача является актуальной в настоящее время и станет целью последующих исследований. В данной диссертации было принято решение использовать хорошо зарекомендовавшие себя модели, применяемые как отечественными, так и зарубежными учеными.

В России исследованиями по компьютерному моделированию распределения угольной пыли в шахтах занимаются в ИПКОН РАН. Работы ведутся старшим научным сотрудником А.С. Кобылкиным [42-45]. За границей большое количество исследований по разработке мероприятий по снижению запыленности проводятся под руководством S.N. Arya [33, 56-59].

При моделировании используют 5 типов граничных условий: вход, выход, стенка, открытая граница и симметричная область. В данной работе использованы следующие граничные условия:

- 1) вход в расчетную область (inlet) – задается скорость по нормали в м/с;
- 2) выход из расчетной области (outlet) – задается статическое давление, Па;
- 3) стенка (wall) – задается условие без скольжения и шероховатость.

Область задания граничных условий в трехмерной модели приведена на рисунке 3.5. На стенках горных выработок поверхности горного оборудования задавалось условие неприлипания потока. В области входа (сечение воздуховода) задавалась скорость движения воздуха $v_{\text{вх}} = 12$ м/с, на выходной поверхности задавалась величина избыточного статического давления $p_{\text{вых}} = 0$ Па. Так как моделирование происходит в тупиковых горизонтальных горных выработках, величиной избыточного давления,

создаваемого вентилятором главного проветривания и воздушным столбом, можно пренебречь. На границе забора воздуха пылеотсасывающей установки задавалась скорость движения воздуха 11 м/с, что при пересчете на расход воздуха составляет 4,5 м³/с. На выходе из скруббера задавалась скорость воздуха 15 м/с так, чтобы количество воздуха, забираемое пылеотсасывающей установкой, было равно выбрасываемому очищенному воздуху от пыли. Начальные и граничные условия сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Краевые условия для проведения численных расчетов

Вид граничного условия	Параметр	Значение входных параметров
вход в расчетную область (inlet)	задается скорость по нормали, м/с	В области входа (сечение воздуховода) задавалась скорость движения воздуха $v_{\text{вх}} = 12$ м/с;
		На границе забора воздуха пылеотсасывающей установки задавалась скорость движения воздуха 11 м/с
выход из расчетной области (outlet)	задается статическое давление, Па	На выходной поверхности задавалась величина избыточного статического давления $p_{\text{вых}} = 0$ Па
		На выходе из скруббера задавалась скорость воздуха 15 м/с
стенка (wall)	задается условие шероховатости поверхности, м	Принимается равной 0,1 м
плоскость поступления пыли (wall)	Задаются параметры пылевыведения: 1. Плотность пыли, кг/м³; 2. Молярная масса пыли, г/моль; 3. Начальная скорость вылета частиц пыли, м/с; 4. Массовый расход пыли, кг/с; 5. Размер пылинок, м	1. принимается равной плотности угля $\rho_{\text{п.}} = 1400$ кг/м³ 2. стандартная величина для угля (углерод $M_{\text{с}} = 12$ г/моль). 3. определяется по скорости вращения бара $v_{\text{п}} = 2$ м/с 4. 50 кг/с 5. от 10 мкм до 300 мкм принимается по данным натурных измерений (перебор значений или фактическим распределением).

Процессы распределения воздушных потоков и угольной пыли происходят в условиях мало изменяющейся температуры рудничной атмосферы. Это позволяет сделать второе допущение, что исследуемый процесс (эффективность работы скруббера) протекает в изотермическом режиме (Isothermal), т.е. свойства среды зависят от температуры, но уравнение переноса энергии не решается.

Влажность пыли может быть учтена путем увеличения плотности частичек пыли $\pm 6\%$ [61].

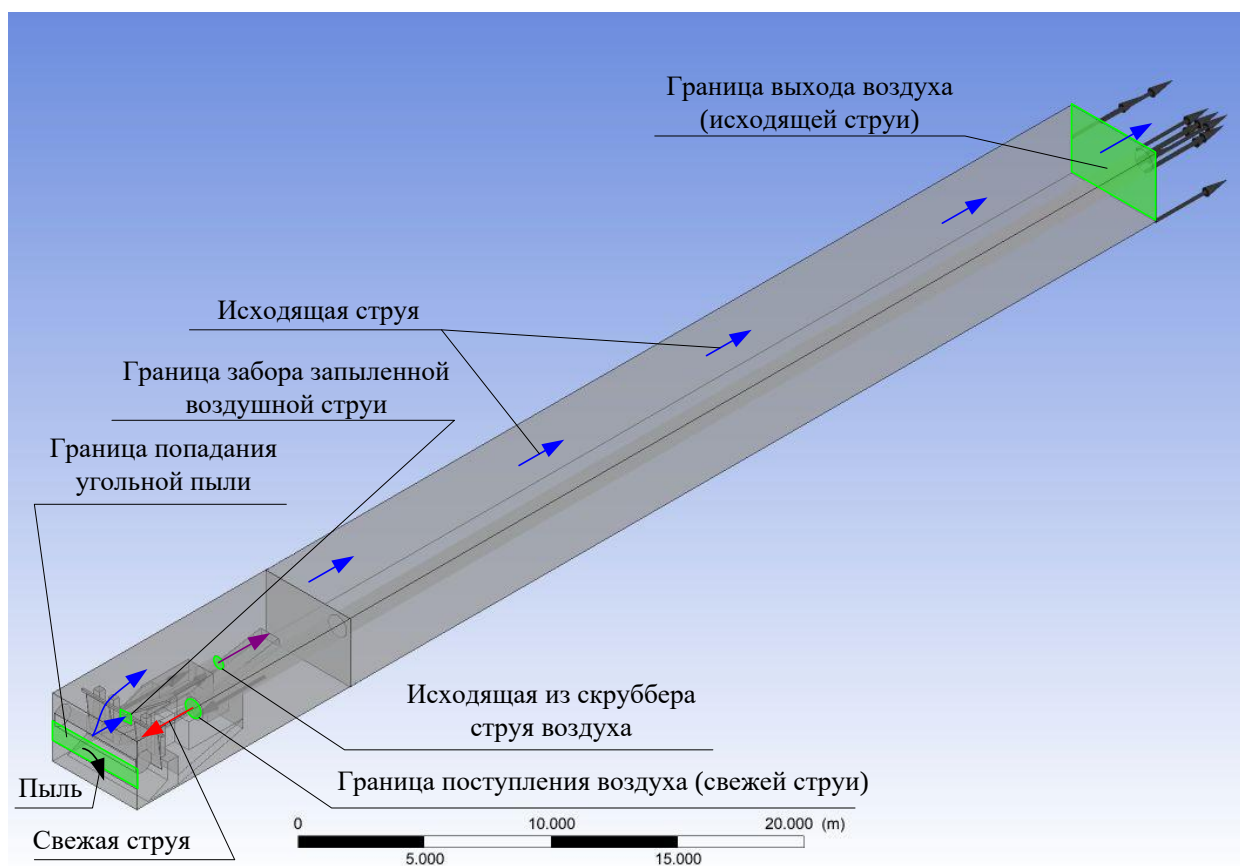


Рисунок 3.5 – Границы для задания краевых условий при моделировании

Задание шага по времени играет важнейшую роль в получении успешной сходимости. Если шаг чрезмерно велик, сходимость начинает колебаться или даже приводит к сбою решения. Если шаг чрезмерно мал, сходимость будет очень медленной, и решение может оказаться недостаточно точным. Для течений с доминированием перемещения воздуха

в горизонтальном направлении время пребывания среды в элементарном объеме дает хорошую оценку величины шага по времени.

Шаг по времени равный $1/3$ частного от деления характерного размера на характерную скорость обычно оптимален. Меньший размер шага может понадобиться для нескольких первых итераций, для сложных физических моделей сверхзвуковых течений и т.д. В нашем случае оптимальный шаг по времени равен $t = 0,2 \text{ м} / (3 \cdot 0,25 \text{ м/с}) = 0,3 \text{ с}$.

Также при решении поставленных задач можно использовать автоматический масштаб времени. Решатель работает с фиксированным временным шагом, основанном на граничных/начальных условиях или текущем решении и характерном размере домена. Можно использовать консервативную или агрессивную оценку характерного размера или заданное число. Шаг по времени пересчитывается и обновляется каждые несколько итераций. Максимальный шаг по времени (Maximum Timescale) обеспечивает верхний предел шага. Алгоритм дает консервативные значения масштаба.

Критерии сходимости или невязки (Residuals) позволяют получить достоверное решение системы уравнений, применяемых в Ansys CFX. Программа использует многосеточную (MG) ускоренную (ILU) технологию факторизации (итеративный решатель) для решения дискретной системы линеаризованных уравнений формы $[A] \cdot [\Phi] = [b]$, где $[A]$ – матрица коэффициентов, $[\Phi]$ – вектор решения, а $[b]$ – правая часть уравнения.

Уравнение решается итеративно. Новое решение получается из старого, которое корректируется поправкой $\Phi^{n+1} = \Phi^n + \Phi'$. Невязка (остаток) определяется как $R^n = b - A\Phi^n$. Невязки по каждой переменной нормализуются. В этом виде они используются как критерии сходимости для мониторинга решения $R_\Phi \sim = R_\Phi / (a_p \Delta\Phi)$, где a_p – коэффициент контрольного объема, а $\Delta\Phi$ – представительный масштаб переменной в домене.

Используемый тип невязок – RMS (Root Mean Square). Сходимость базируется на средней невязке по всем контрольным объемам

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i R_i}{n}}. \quad (3.7)$$

Приемлемая сходимость по невязкам обеспечивается при $RMS < 0,0001$.

Дополнительный критерий сходимости (условие сохранения), который должен выполняться перед тем как решатель остановится, – это когда *Входящий поток – Выходящий поток* $< 1\%$.

Отличительной особенностью компьютерного моделирования является включение в расчет модели витания твердых частиц (пыли).

3.3 Анализ результатов моделирования

Расчет проводился как для стационарной постановки задачи, так и для изменяющейся во времени задачи.

В первом случае задача ставится следующим образом: процесс выделения пыли идет постоянно, проветривание осуществляется без изменений по количеству воздуха, поступающего в проходческий забой, и при постоянных параметрах работы пылеотсасывающей установки. Такое решение не является полностью корректным, так как процесс выделения пыли является изменяемым во времени. Однако, такая постановка задачи позволяет понять эффективность работы скруббера при всасывании им пыли различного диаметра.

По результатам численных расчетов производилась визуальная и количественная оценка распространения пыли в призабойной части тупиковой горной выработки. Контрольные зоны (рисунок 3.6) выбирались с учетом необходимости верификации.

По траекториям движения частиц можно определить места скопления пыли и ее выноса. По областям («тумановая» область) определяются места отложения угольной пыли. Для полной оценки была проведена серия

расчетов, где рассматривалась пыль различного диаметра (10, 50, 100, 150, 200, 250 и 300 мкм). Зная количественное распределение пыли в действующих забоях, можно будет сделать вывод о месте контроля пылеотложения и запыленности рудничной атмосферы призабойной части горной выработки при ее проходке.

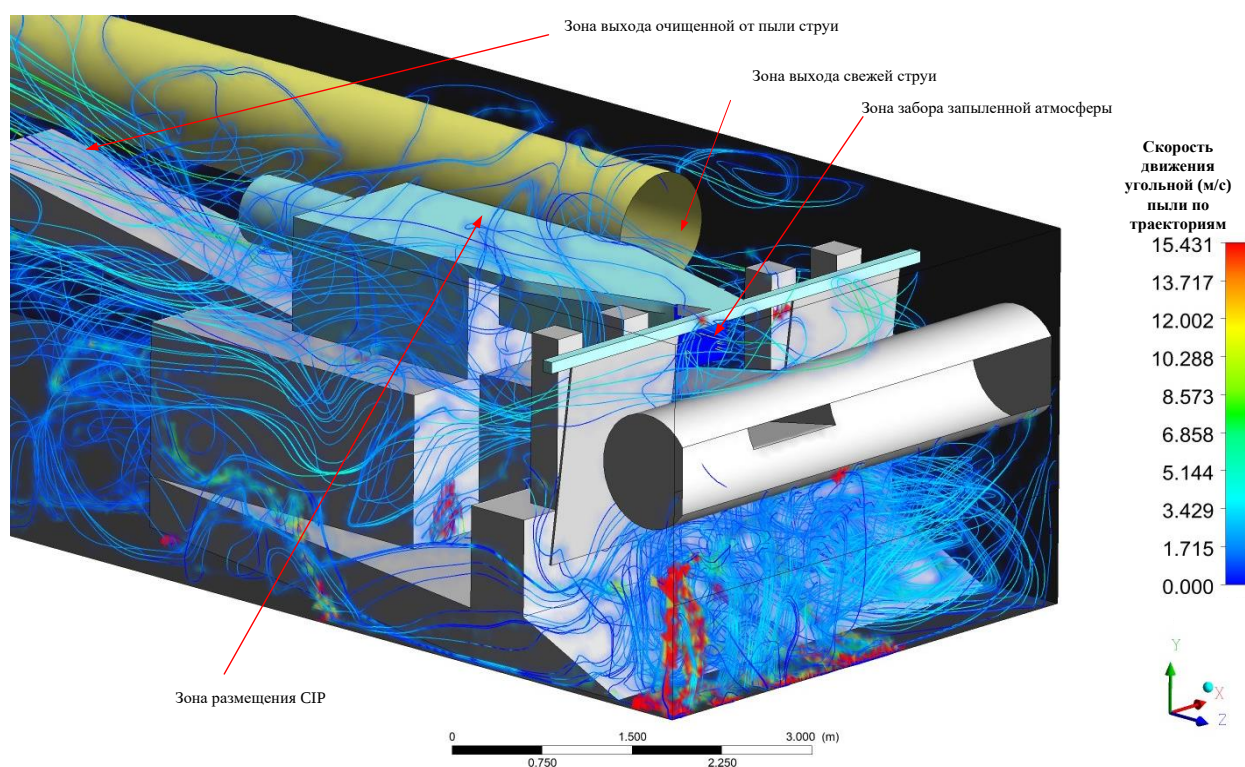


Рисунок 3.6 – Результаты численного стационарного расчета и контрольные зоны

Сравнивая результаты численного моделирования распределения пыли различного диаметра (рисунок 3.7) можно прийти к выводу о том, что пыль с диаметром 10 мкм витает во всем призабойном пространстве горных выработок, что подтверждается исследованиями, проведенными другими учеными [20]. Крупная пыль (от 50 до 300 мкм) оседает на всех поверхностях горного оборудования, а также засасывается в скруббер. Пыль с диаметром 50 мкм ведет себя аналогично мелкой 10 мкм пыли. Ее траектория совпадает с изолиниями воздушного потока, который огибает горное оборудование, отражается от элементов защиты проходческого комбайна.

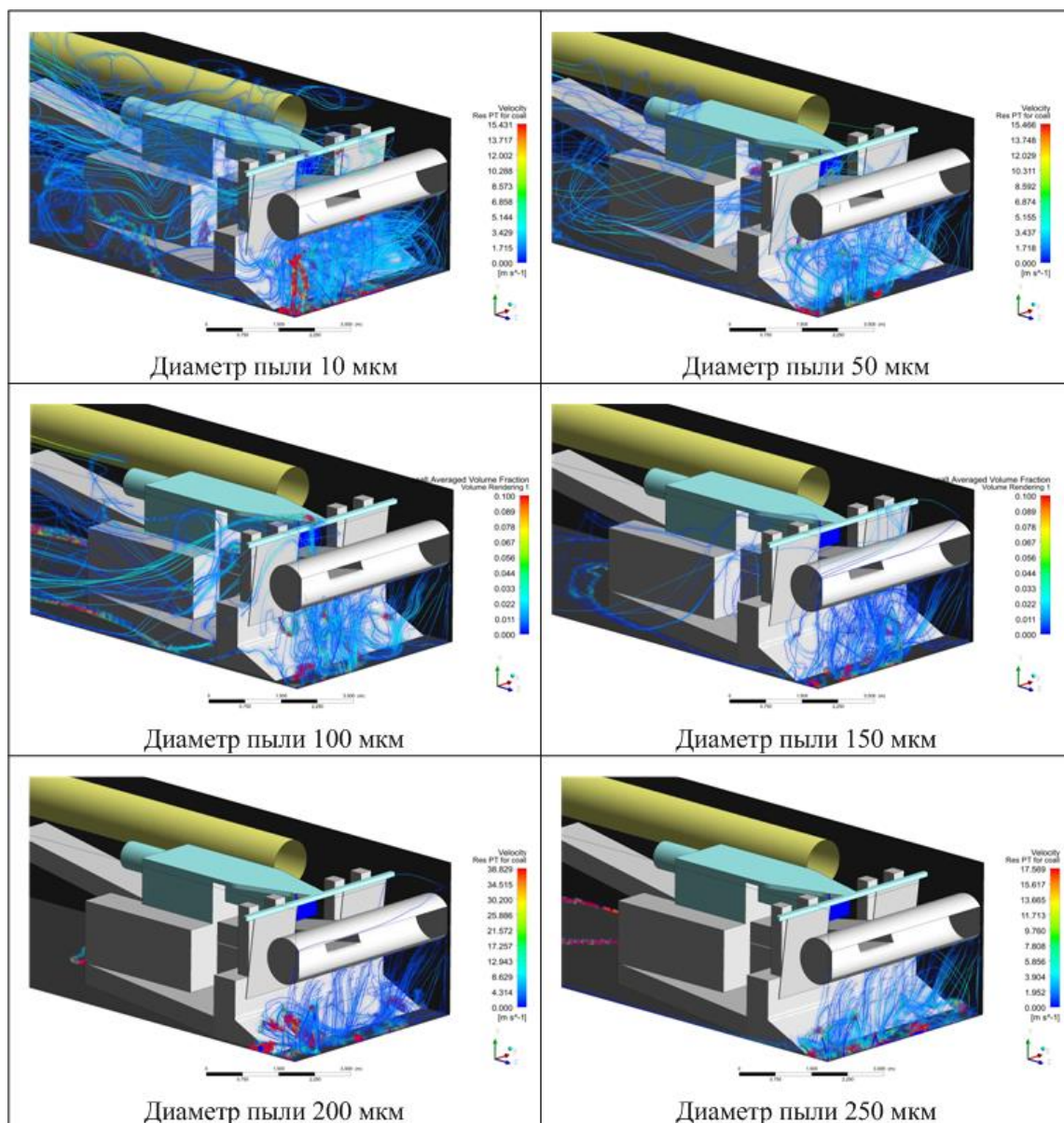


Рисунок 3.7 – Результаты численного стационарного расчета распределения пыли, позволяющие определить траектории ее выноса и мест отложений при их различном диаметре

Более крупная (100 и 150 мкм) и, как следствие, тяжелая угольная пыль оседает на нижних элементах комбайна, но также находится в зоне дыхания горнорабочих. Самая крупная пыль (200-300 мкм) оседает на почве горной выработки, скапливается в краевых частях (при отсутствии сил сцепления – например, с влажной почвой, бортов и кровли).

При нестационарной постановке задачи процесс проветривания рассматривается непрерывающимся и с постоянным расходом воздуха, а

процесс образования и поступления пыли в рудничную атмосферу является переменным. В начальный период времени пыль не выделяется. Только после установления течения воздушных потоков в призабойной части начинается выделение пыли, которое продолжается некоторое время, а затем стабилизируется при постоянном проветривании. Процессы, учитываемые при моделировании, с временными шкалами представлены на рисунке 3.8.

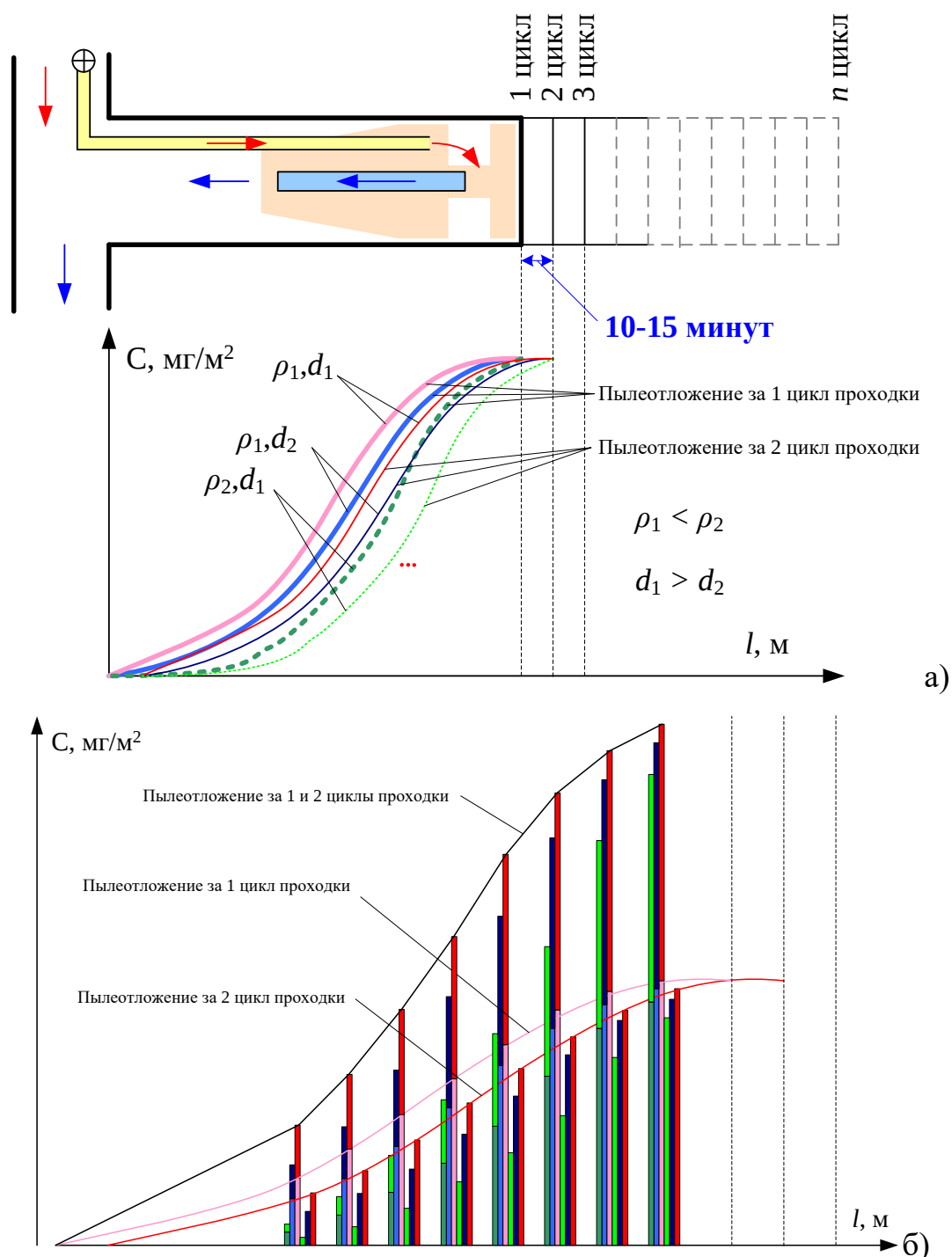


Рисунок 3.8 – Условные схемы распределения и накопления пыли в горной выработке

За один цикл комбайн и скруббер работают в течение 4-5 минут, далее идет процесс крепления горной выработки около 10 минут.

За один цикл выделяется различная по свойствам пыль, что обуславливает различное время нахождения ее в выработке. При каждом следующем цикле комбайн продвигается на 0,8-1 м, и все процессы повторяются. При этом к той пыли, что осела, аналогично добавляется следующий слой.

Полученные результаты численного динамического моделирования (рисунок 3.9) не противоречат общепринятым знаниям о пылевой динамике [63-66].

Разработанный подход прогнозирования уровня запыленности и мест отложения угольной пыли универсален. Он может быть использован для оценки работы любых аспирационных систем, а также при проектировании и анализе совместных режимов проветривания и пылеотсасывания.

Из-за конструкции и характера движения воздуха в призабойной части наибольшее количество пыли наблюдается со стороны противоположной размещению воздуховода, там же наблюдается значительная запыленность и пылеотложение.

Оценка работы пылеотсасывающих систем, которые по документам [62] производят очистку воздуха от пыли 99,5 %, показала низкую их эффективность. Заявленная эффективность достигается только при попадании пыли в скруббер. Однако, для засасывания пыли при существующей общей схеме проветривания и конструкции проходческого комбайна, необходимо увеличить расход воздуха у пылеотсоса, что не безопасно, как будет показано в разделе 4.1.

Наблюдаемое локальное снижение запыленности (таблица 2.1 и рисунок 2.10 во 2 главе) обусловлено увеличением скорости движения воздуха в горной выработке при работе гидровентилятора скруббера.

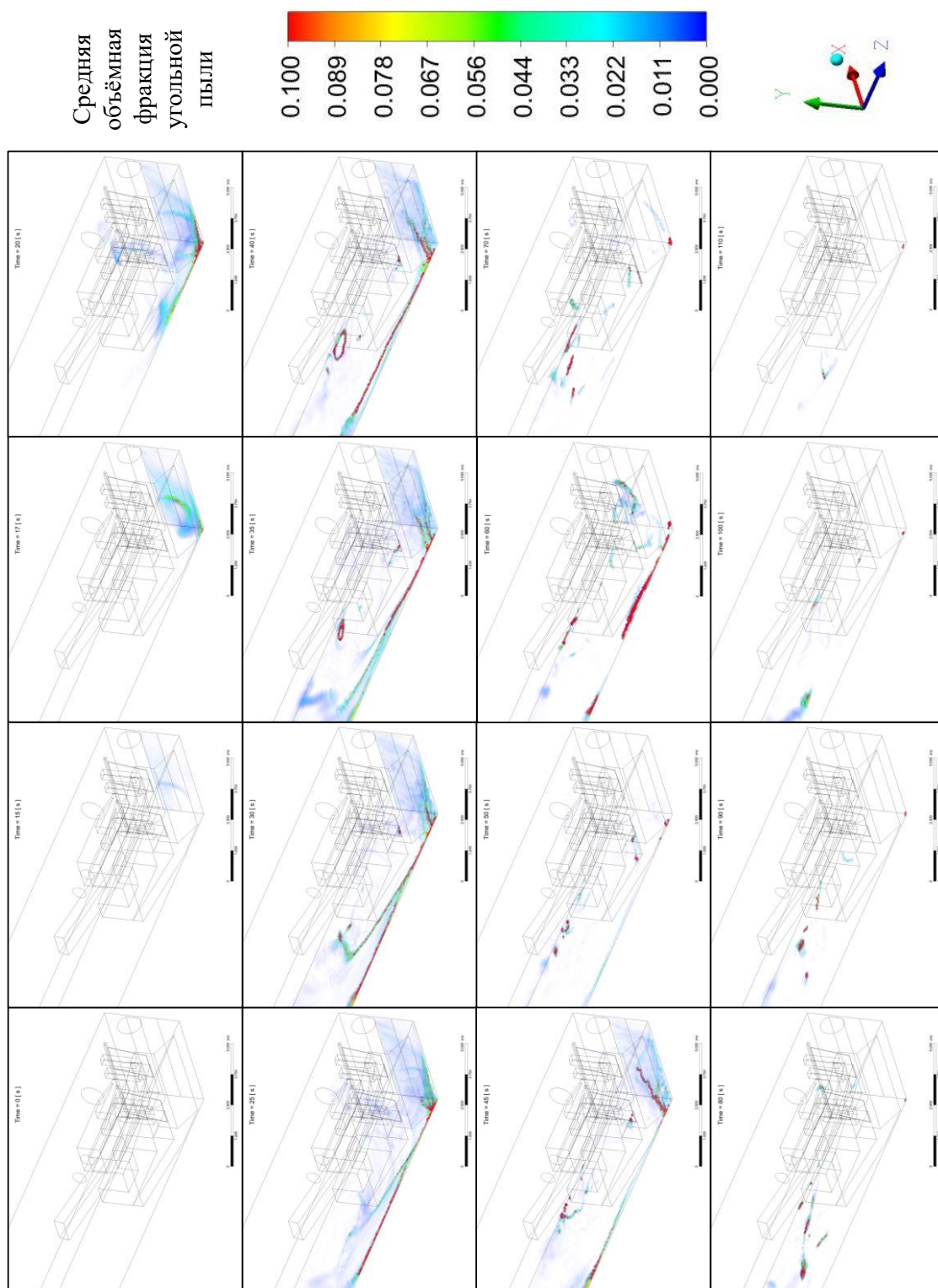


Рисунок 3.9 – Раскадровка процессов выделения, витания и осаждения угольной пыли с диаметром частиц 10 мкм

3.4 Верификация полученных результатов трехмерного моделирования с данными шахтных исследований

Верификация полученных результатов численного моделирования проводилась путем сравнения их с результатами натурных измерений, приведенных во второй главе.

В основу верификации положены результаты натурных измерений, проведенных на шахте «Им. С.М. Кирова».

В основу расчетов были положены граничные условия:

1. Скорость движения воздуха, поступающего из воздуховода в призабойную часть, равная 12 м/с, площадь сечения трубы – 0,785 м²;
2. Скорость забора воздуха пылеотсасывающей установкой, равная 11 м/с, площадь сечения патрубка забора запыленной атмосферы – 0,4 м²;
3. Скорость струи воздуха, выбрасываемого пылеотсасывающей установкой, равная 15 м/с, площадь сечения патрубка забора запыленной атмосферы – 0,3 м².

Верификация проводилась путем сравнения данных, полученных путем численных расчетов с данными натурных измерений по скорости движения воздуха. На рисунке 3.1 красными точками показаны места измерения скорости движения (v , м/с) анемометром АПР-2 и графическое представление результатов численного расчёта в виде плоскости с цветовой гаммой с соответствующей скорости движения воздуха. Результаты показывают хорошую сходимость (расхождение не более 10 %, связанное с погрешностью натурных измерений), что подтверждает эффективность предлагаемого способа системного проектирования.

Как сообщалось ранее, датчики располагались под кровлей (0,5 м от кровли) над горным оборудованием – в плоскости работы проходчиков, над перегружателем в самоходный вагон и в 50 м от плоскости забоя.

При видимой существенной запыленности рудничной атмосферы показания датчиков СІР и АЭРА показали значения, не превышающие ТДУ и МРК, но измеренные значения превысили ПДК.

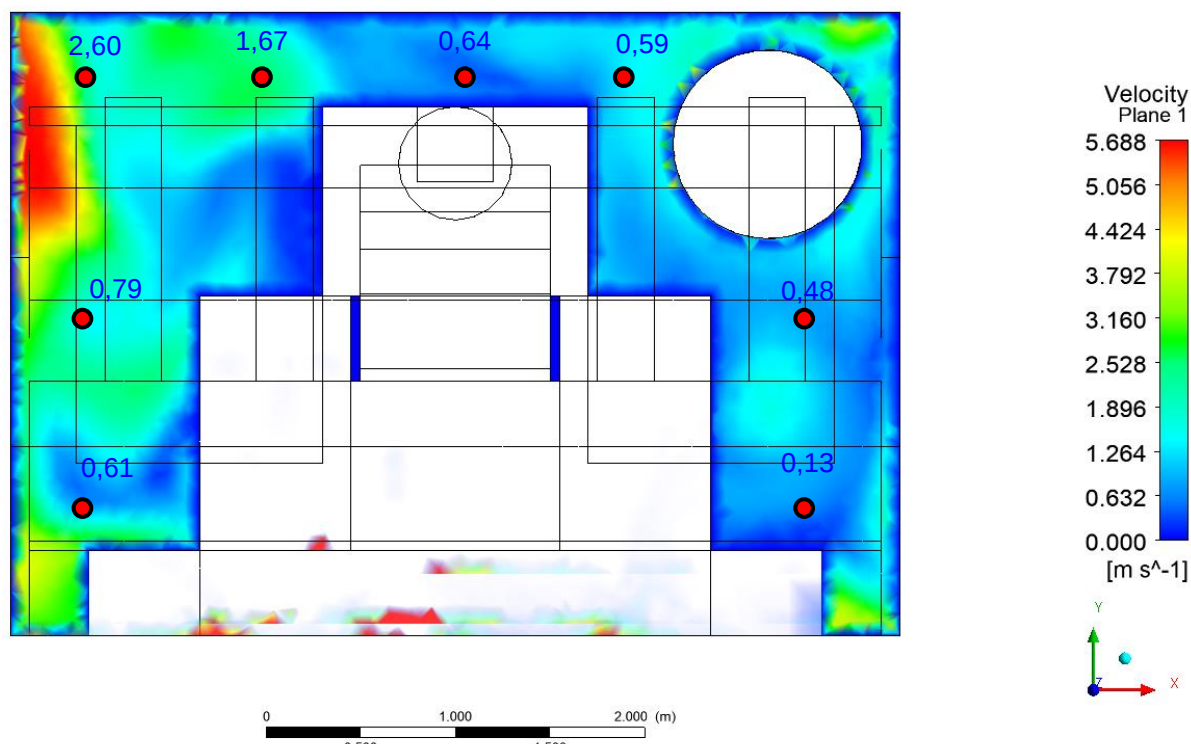


Рисунок 3.10 – Сравнение результатов натуральных измерений скорости движения воздуха (красные точки – места измерения скорости движения (м/с) анемометром АПР-2) с данными компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование позволяет оценить как уровень запыленности, так и величину пылеотложения. Для верификации пылеотложения отбирались пробы пыли с предварительно очищенной поверхности на проходческом комбайне (рисунок 3.11).

После прохождения одного цикла проходки пыль собиралась, взвешивалась, изучалась под микроскопом и разделялась по дисперсному составу (раздел 2.3).

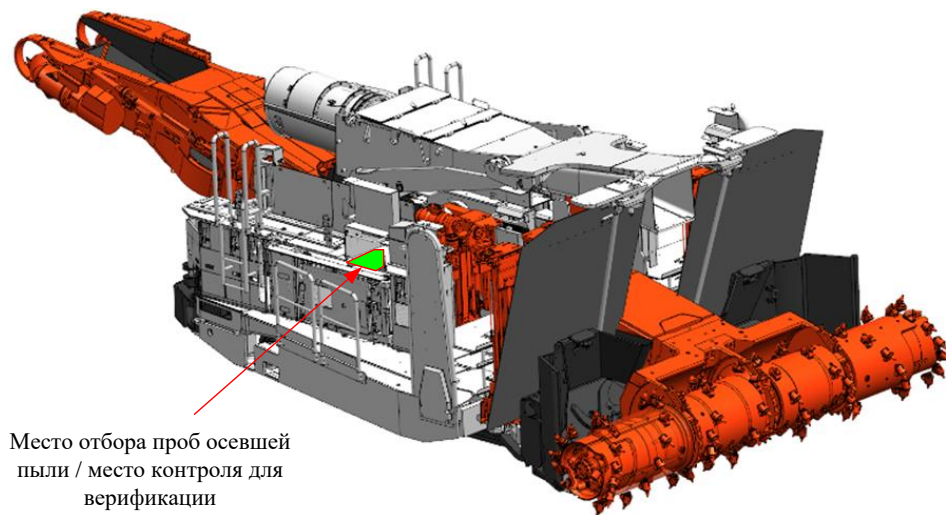


Рисунок 3.11 – Место отбора проб осевшей пыли для верификации

Выводы

В третьем разделе диссертационной работы представлены исследования по выбору параметров трехмерного численного моделирования пылевой динамики в тупиковой горной выработке.

Наиболее полное описание процессов распределения пыли в горной выработке при работающем скруббере происходит в нестационарной постановке решения задач.

Установлено, что введенное допущение по упрощению трехмерных моделей горного оборудования (путем пренебрежения деталями, размеры которых менее 0,05 м) допустимо при проведении численных расчетов распределения пыли в призабойном пространстве.

Разработана методика выбора максимальной длины ребра расчетного элемента сетки (равной 0,2 м), по которой строится расчетная сетка. Методика отталкивается от турбулентности потока в призабойной части и учитывает принимаемую модель турбулентности $k-\varepsilon$.

Научно обоснованы краевые условия и показаны параметры, которые необходимо определять на начальной стадии системного проектирования. На входных и выходных границах задавались краевые параметры (скорость движения воздуха, давление, плотность угля, массовый расход пыли, размер

пылинок), соответствующие измеренным значениям для условий проходческого забоя шахты «им. С.М. Кирова».

Исследованиями подтверждено, что параметры поступления пыли (плотность угля, массовый расход пыли, размер пылинок) определяются по её свойствам, а также величинам, определенным в результате шахтных и лабораторных исследований.

Доказано, что численные расчеты позволяют оценить фактическую запыленность в контрольных зонах, в которых работают горнорабочие проходческого забоя.

Показано, что угольная пыль различного дисперсного (от 10 до 300 мкм) состава по-разному оседает в призабойной части. Более легкая пыль распределяется по всему объему горной выработки. При этом на пылевую динамику существенно влияет аэродинамика потока, обуславливаемая конструкцией проходческого комбайна и оборудования, в том числе вентиляционного воздуховода и скруббера.

Особенности конструкции проходческого комбайна (щитки и место установки всаса скруббера) создают зоны с максимальной (с противоположной стороны от места расположения воздуховода) и минимальной запыленностью (под воздуховодом). Это также наблюдалось при проведении натурных исследований на трех шахтах.

Процесс пылевыведения происходит циклически, а проветривание постоянно. Этот факт необходимо учитывать при проектировании систем пылеотсоса. За один цикл выделяется различная по свойствам пыль, что обуславливает различное время нахождения ее в выработке. При каждом следующем цикле комбайн продвигается на 0,8-1 м и все процессы повторяются. При этом к той пыли, что осела, добавляется аналогично следующий слой, что определяет уровень пылеотложения для оценки пылевзрывобезопасности. Данные процессы можно учесть только при динамическом проектировании.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЯХ

4.1 Разработка матриц взаимного влияния производительности пылеотсоса и поступающего в забой воздуха

При применении скруббера возможно три варианта проветривания забоя:

1. производительность скруббера составляет 50% от расхода воздуха, поступающего в забой (рисунок 4.1);
2. производительность скруббера составляет от 10 до 50% от расхода воздуха, поступающего в забой (рисунок 4.2);
3. производительность скруббера больше расхода воздуха, поступающего в забой (рисунок 4.3).

В варианте 1 скруббер забирает часть воздуха, поступающего по вентиляционному ставу в забой, при этом в сечении комбайна (составляет примерно половину сечения выработки) скорость воздуха составляет 0,25 м/с и более, что соответствует требованиям нормативных документов по обеспечению скорости воздуха в тупиковых забоях не менее 0,25 м/с [38].

Данный вариант является приемлемым в части организации проветривания и разжижения метана, выделяющегося в забое при ведении горных работ. При этом по пылевому фактору этот вариант не настолько эффективен как другие.

В этом варианте через пылеотсос проходит и, следовательно, очищается 50% запыленного воздуха. При заявленной 99% эффективности скруббера по очищению проходящего через него воздуха от пыли, в целом по выработке уменьшение количества витающей пыли составит 50 %.

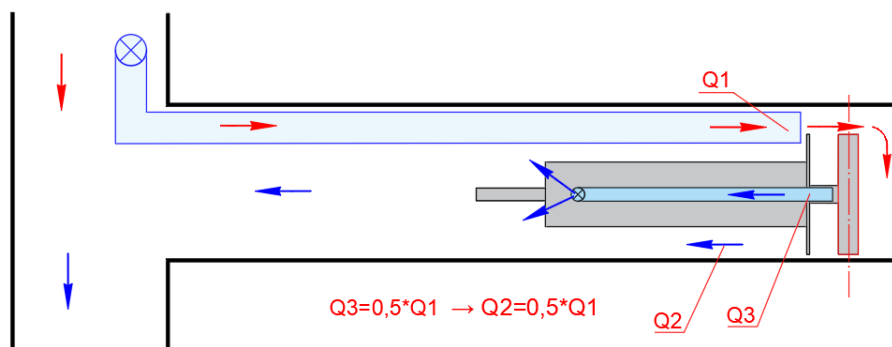


Рисунок 4.1 – Направление движения вентиляционных струй при производительности скруббера меньшей, чем расход воздуха, подаваемого в забой

В варианте 2 по аналогии с вариантом 1 можно сделать вывод, что скорость воздуха в сечении комбайна будет составлять от 0 до 0,25 м/с. В связи с приближением к нулевой скорости в сечении комбайна возможно образование застойных зон с повышенной концентрацией метана (образование местных, слоевых скоплений) в зоне, где присутствует электроэнергия и отсутствует контроль метана стационарными датчиками системы АГК. По пылевому фактору можно сделать вывод, что эффективность очистки воздуха от взвешенной в нем угольной (породной) пыли составляет от 50 до 99%.

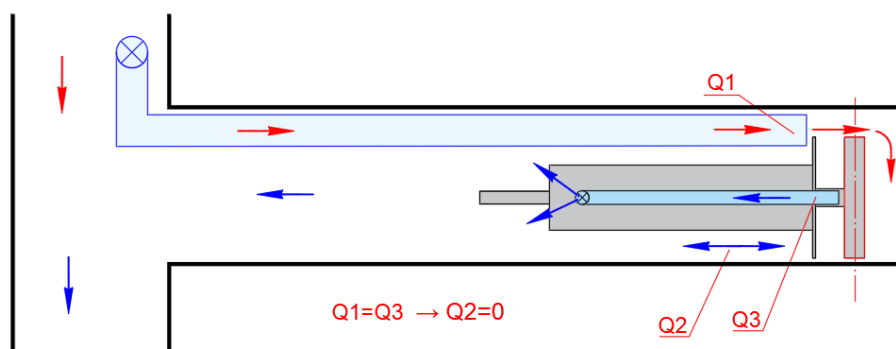


Рисунок 4.2 – Направление движения вентиляционных струй при производительности скруббера равной расходу воздуха, подаваемого в забой

В варианте 3 в связи с производительностью скруббера, превышающей расход воздуха, поступающего по вентиляционному ставу, будет происходить рециркуляция воздуха в забое в сечении комбайна – между

забоя и выхлопным патрубком скруббера. Здесь также возможно неконтролируемое повышение концентрации метана выше допустимых норм. В этом случае обеспыливание воздуха составит 100%.

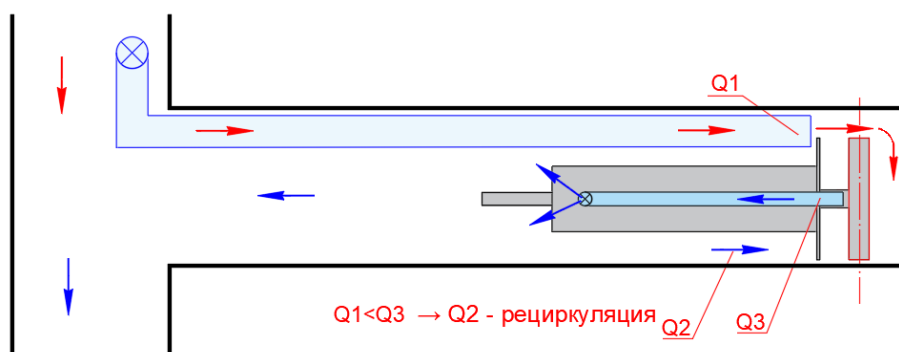


Рисунок 4.3 – Направление движения вентиляционных струй при производительности скруббера, превышающей расход воздуха, поступающего в забой

В таблице 4.1 приведена матрица взаимного влияния производительности пылеотсоса и поступающего в забой свежего воздуха.

Таблица 4.1 – Матрица взаимного влияния производительности пылеотсоса на количество поступающего в забой воздуха

		Производительность пылеотсоса (Q_2), м ³ /мин				
		200	300	400	500	600
Расход воздуха в забое (Q_1), м ³ /мин	200	0	-100	-200	-300	-400
	300	100	0	-100	-200	-300
	400	200	100	0	-100	-200
	500	300	200	100	0	-100
	600	400	300	200	100	0
	700	500	400	300	200	100

- скорость проходящей в сечении комбайна вентиляционной струи более 0,25 м/с
- скорость проходящей в сечении комбайна вентиляционной струи более 0,5 м/с
- скорость проходящей в сечении комбайна вентиляционной струи нет (воздух практически стоит или происходит рециркуляция воздуха)

Таким образом, наиболее предпочтительным (и соответствующим требованиям нормативных документов) является вариант, когда производительность скруббера будет составлять примерно 50% от расхода воздуха, поступающего в забой. При этом применение скруббера, установленного на комбайне Sandvik, позволит при организации проветривания по первому варианту обеспечить снижение запыленности воздуха в 2 раза, при обеспечении заявленной эффективности скруббера.

В таблице 4.2 приведена матрица взаимного влияния качества пылеочистки отработанного воздуха в проходческом забое на производительность скруббера и количество воздуха, подаваемого в забой.

Таблица 4.2 – Матрица взаимного влияния качества пылеочистки отработанного воздуха на производительность скруббера и количество воздуха, поступающего в забой

		Производительность скруббера (Q_2), м ³ /мин				
		200	300	400	500	600
Расход воздуха в забое (Q_1), м ³ /мин	200	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	300	67 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	400	50 %	75 %	100 %	100 %	100 %
	500	40 %	60 %	80 %	100 %	100 %
	600	33 %	50 %	67 %	83 %	100 %
	700	29 %	43 %	57 %	71 %	86 %

В связи с этим встает вопрос об организации как эффективного проветривания, так и эффективного пылеудаления. Расход воздуха, подаваемый в забой тупиковой выработки, не должен намного превышать расчетный воздух, необходимый для проветривания, а производительность

скруббера должна настраиваться и составлять около 50% от расхода воздуха, подаваемого в забой.

Разработанные матрицы влияния позволяют подобрать общие соотношения параметров работы системы пылеотсоса. Для учета возможных режимов проветривания и работы скруббера необходимо разработать более универсальный и сложный способ учета большего количества влияющих факторов. Для этого можно использовать системный подход, основанный на трехмерном моделировании. Для его применения необходимо разработать критерии оценки эффективности работы систем пылеотсоса с учетом организации проветривания проходческого участка.

4.2 Разработка критериев оценки эффективности работы систем пылеотсоса с учетом организации проветривания проходческого участка

При проектировании вентиляции проходческих забоев необходимо учитывать много различных параметров для выбора оптимальных решений, обеспечивающих аэрологическую безопасность и эффективность.

С учетом предлагаемого системного проектирования [46-48], в основу которого положено компьютерное моделирование, необходимо решить задачу по выбору оптимальных критериев оценки эффективности работы систем пылеотсоса.

При этом должны быть определены параметры, влияющие на эти критерии и величины, которые могут быть получены как расчетным путем, так и при выполнении контрольных измерений на действующем участке.

Основная задача работы систем пылеотсоса заключается в снижении уровня запыленности рудничной атмосферы. Скруббер, забирая часть запыленной рудничной атмосферы, очищает воздух от пыли и возвращает его в горную выработку. При этом снижение концентрации газов (метана, углекислого газа) не меняется и в данной работе не рассматривается.

За один цикл (4-5 минут) в рудничную атмосферу поступает определенное количество пыли (концентрация пыли, находящейся во

взвешенном состоянии, обозначаемая $c_{\text{п}}$, мг/м³), т.е. сколько по общей массе пыли находится в одном кубическом метре в объеме рудничной атмосферы.

При этом как было отмечено ранее в 3 разделе при моделировании распределения пыли по горным выработкам основными величинами, задаваемыми как начальные условия расчетов, являются:

1. Плотность пылинок ($\rho_{\text{п}}$, кг/м³) (при этом здесь имеется в виду объем пылинки, зависящий от свойства угля или вмещающих пород);
2. Диаметр пылинки ($d_{\text{п}} = 2r_{\text{п}}$, м) (при этом здесь вводится допущение, что пылинки имеют форму шара);
3. Количество пылинок (N , шт.) (здесь следует отметить, что при расчете для отслеживания их траекторий задается условное количество пылинок, процессы разламывания пылинок и их коагуляции (слипание) в данной работе не рассматриваются).

Тогда с учетом вышеизложенного предлагается использовать первый критерий (назовем его «Пылединамический критерий» и обозначим его $K_{\text{ск1}}$), который может быть определен как

$$K_{\text{ск1}} = \frac{c_{\text{п}} - c_{\text{ск}}}{c_{\text{п}}},$$

где $c_{\text{п}}$ — концентрация пыли (мг/м³), образовавшаяся при работе исполнительного органа проходческого комбайна (бара) и поступившая в рудничную атмосферу за один цикл работы.

$c_{\text{ск}}$ — концентрация пыли (мг/м³), которая была задержана пылеотсасывающей системой.

При отсутствии или неработающем скруббере $c_{\text{ск}}$ будет равно 0, следовательно, критерий очистки от пыли $K_{\text{ск1}} = 1$, т.е. это 100 % запыленности рудничной атмосферы. При возникновении случая, при котором $c_{\text{ск}} = c_{\text{п}}$, критерий очистки от пыли $K_{\text{ск1}} = 0$. Это значит, что вся пыль, образующаяся при работе исполнительного органа проходческого комбайна (бара) и попадающая в рудничную атмосферу, попадает в скруббер, и воздух полностью очищается. Следовательно, критерий очистки от пыли находится

в диапазоне от 0 до 1. Чем меньше значение критерия (величина критерия ближе к 0), тем выше эффективность работы системы пылеотсоса.

С учетом начальных условий, используемых при моделировании, критерий по очистке от пыли (одного диаметра и плотности) можно записать в следующем виде

$$K_{ск1} = \frac{c_{п} - c_{ск}}{c_{п}} = \frac{\frac{4N_{п}\pi\rho_{п}r_{п}^3}{3V_{возд.}} - \frac{4N_{ск}\pi\rho_{п}r_{п}^3}{3V_{возд.}}}{\frac{4N_{max}\pi\rho_{п}r_{п}^3}{3V_{возд.}}} = \frac{N_{п} - N_{ск}}{N_{п}},$$

где $c_{п}, c_{ск}$ – концентрация пыли, мг/м³

$$c_{п}, c_{ск} = N_{п}, c_{ск} \cdot m / V_{возд.} = (N_{п}, c_{ск} \cdot \rho_{п.} \cdot V_{п.}) / V_{возд.} = (N_{п}, c_{ск} \cdot \rho_{п.} \cdot V_{п.}) / V_{возд.};$$

m – масса одной пылинки, мг;

$\rho_{п.}$ – плотность одной пылинки, мг/м³;

$N_{п}, c_{ск}$ – количество пылинок одной формы и из одного вещества, шт;

$V_{п.}$ – объем пылинки при допущении, что она имеет форму шара, м³

$$V_{п.} = 4/3 \cdot \pi \cdot r_{п.}^3.$$

Данный критерий можно рассматривать как обособленно для пыли определенной фракции и вида (например, угольная пыль с диаметром 50 мкм или породная пыль с диаметром 100 мкм), так и как совокупность различных видов пыли

$$K_{ск1} = \frac{c_{п} - c_{ск}}{c_{п}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_{п.i} - N_{ск.i}}{N_{п.i}},$$

где i – пыль определенного вида и диаметра;

n – количество учитываемых видов пыли.

Как показало компьютерное моделирование, верифицированное натурными исследованиями, большое значение в работе скрубберов имеет аэропылевая динамика. При этом наблюдались зоны с небольшой запыленностью и зоны с весьма высокой запыленностью. Также аналитически (рисунок 4.4) установлено, что в зависимости от месторасположения комбайна и скруббера на нем, величины отставания конца воздуховода от плоскости забоя, а также соотношений расходов

воздуха, поступающего в забой и самого скруббера, могут быть застойные зоны и рециркуляция.

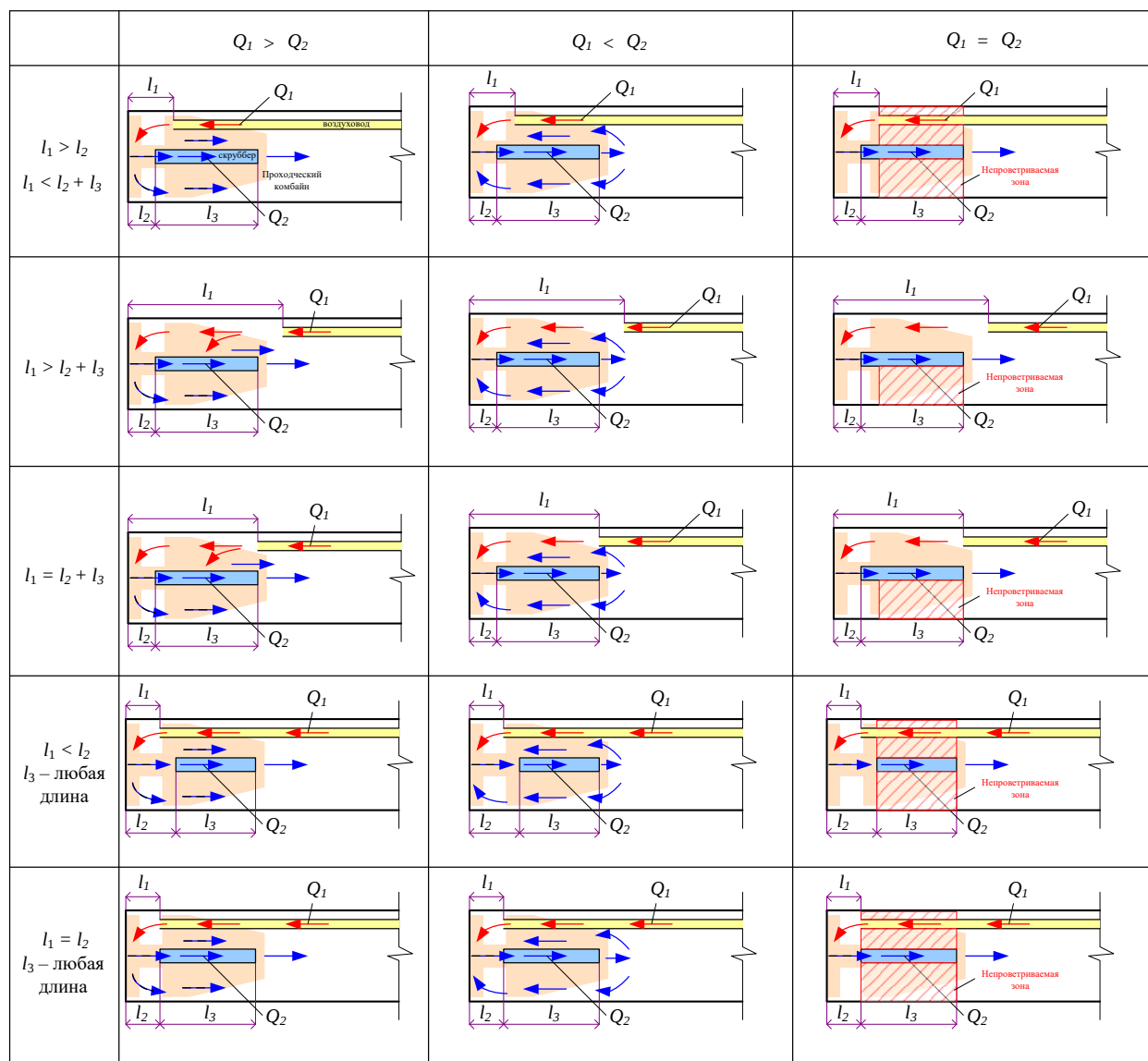


Рисунок 4.4 – Варианты взаимного влияния режима работы скруббера на режим проветривания проходческого забоя

Как видно, предпочтительнее сочетание вариантов, при которых количество поступающего воздуха больше, чем то, которое всасывает скруббер. При этом если количество воздуха, подаваемое в забой, существенно выше забираемого системой пылеотсоса, то часть запыленной рудничной атмосферы не попадает в скруббер, а выносится активной струей дальше по горной выработке. Данные заключения положены в основу

второго критерия эффективности работы пылеотсасывающих систем, встраиваемых в проходческие комбайны.

Данный критерий получил название «Аэродинамический критерий», обозначаемый $K_{ск2}$.

При условии если $Q_{возд.}/Q_{ск.} = 1$, то весь воздух, поступающий в забой, будет забираться системой пылеотсоса, следовательно, расстояние по длине горной выработки от всасывающего патрубка скруббера до его выхлопного отверстия не будет проветриваться.

При условии если $Q_{возд.}/Q_{ск.} < 1$ (т.е расход скруббера больше количества воздуха, поступающего в забой), то не только воздух, поступающий в забой, будет забираться системой пылеотсоса, но и часть его, выходящая из выхлопного отверстия скруббера, будет возвращаться назад, приводя к рециркуляции.

Эффективность работы скруббера будет возможна только при выполнении условия $Q_{возд.}/Q_{ск.} > 1$ (т.е расход скруббера меньше количества воздуха, поступающего в забой). Увеличение количества воздуха, поступающего в забой, приведет к выносу пыли и непопаданию его в скруббер. Следовательно, должно быть минимальное значение разницы в поступающем воздухе в забой и забираемое системой пылеотсоса. Эта величина определяется из условий требований правил безопасности, по которым необходимо обеспечить движение воздуха в горной выработке с минимально допустимой скоростью (рисунок 4.5). Для газовых шахт $v_{min.газ} > 0,5$ м/с, для негазовых шахт $v_{min.не газ} > 0,25$ м/с.

С учётом вышеизложенного критерий отсутствия рециркуляции (с максимально возможным забором запыленной атмосферы) может быть определен следующим образом:

$$K_{ск2} = \frac{Q_{возд.}}{Q_{ск.} + Q_{г.в.min}} = 1,$$

где $Q_{возд.}$ — количество воздуха, поступающее в забой, м³/с;

$$Q_{возд.} = v_{возд.} \cdot S_{возд.} = v_{возд.} \cdot \pi \cdot r_{возд.}^2;$$

$v_{\text{возд.}}$ – средняя скорость движения воздуха на всасе у скруббера, м/с;

$r_{\text{возд.}}$ – радиус воздуховода, м.

$Q_{\text{ск.}}$ – количество воздуха, забираемое системой пылеотсоса, м³/с;

$$Q_{\text{ск.}} = v_{\text{ск.}} \cdot S_{\text{ск.}} = v_{\text{ск.}} \cdot (y \cdot x);$$

$v_{\text{ск.}}$ – средняя скорость движения воздуха на всасе у скруббера, м/с;

y и x – ширина и высота патрубка скруббера, м.

$Q_{\text{г.в. min}}$ – минимальное количество воздуха, для проветривания выработки, м³/с;

$$Q_{\text{г.в. min}} = v_{\text{г.в. min}} \cdot S_{\text{г.в.}} = v_{\text{г.в. min}} \cdot (a \cdot b);$$

$v_{\text{г.в. min}}$ – минимальная допустимая скорость движения воздуха, м/с;

a и b – ширина и высота горной выработки, м.

Следовательно, наиболее эффективным будет решение, при котором

$$K_{\text{ск2}} = \begin{cases} \frac{Q_{\text{возд.}}}{Q_{\text{ск.}}} > 1 \\ \frac{Q_{\text{возд.}}}{Q_{\text{ск.}} + Q_{\text{г.в. min}}} = 1 \end{cases}.$$

Или в параметрах, используемых при компьютерном моделировании

$$K_{\text{ск2}} = \begin{cases} \frac{Q_{\text{возд.}}}{Q_{\text{ск.}}} > 1 \\ \frac{Q_{\text{возд.}}}{Q_{\text{ск.}} + Q_{\text{г.в. min}}} = 1 \end{cases} = \begin{cases} \frac{v_{\text{возд.}} \cdot \pi \cdot r_{\text{возд.}}^2}{v_{\text{ск.}} \cdot (y \cdot x)} > 1 \\ \frac{v_{\text{возд.}} \cdot \pi \cdot r_{\text{возд.}}^2}{v_{\text{ск.}} \cdot (y \cdot x) + v_{\text{г.в. min}} \cdot (a \cdot b)} = 1 \end{cases}.$$

Первый критерий эффективности работы косвенно зависит от скорости движения воздуха, поступающего в забой, и от скорости движения воздуха, образующейся на всасе при работе скруббера. Чем меньше будет скорость поступающего воздуха в забой и больше скорость на всасе скруббера, тем больше пылинок попадет в систему пылеотсоса.

Также масса пылинок и их диаметр будут косвенно влиять на эффективность работы систем пылеотсоса. Чем больше масса и диаметр

пылинок, тем выше будет сила тяжести, и, следовательно, меньше пыли попадет в систему пылеотсоса.

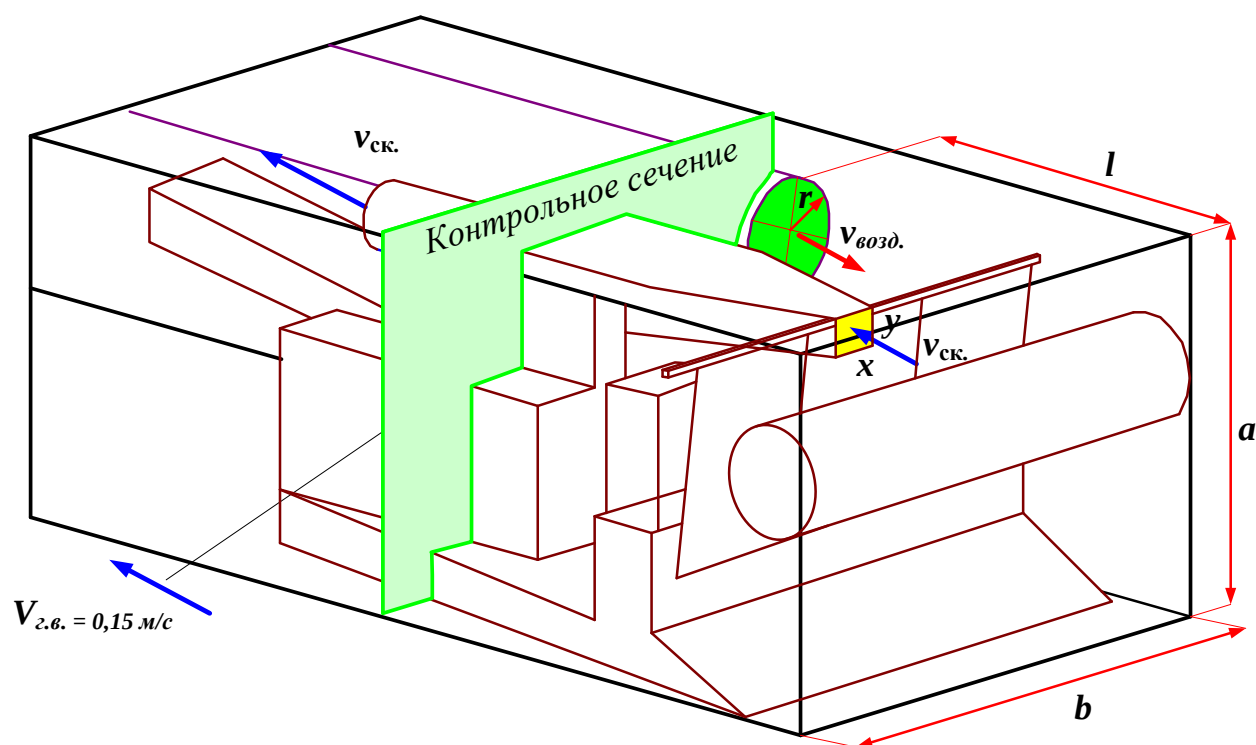


Рисунок 4.5 – Схема к определению влияющих параметров

Для эффективной работы системы пылеотсоса, встраиваемого в проходческий комбайн, необходимо найти такое значение влияющих параметров, при котором первый критерий ближе к 0, а второй критерий ближе к 1.

Влияющие параметры и их возможный диапазон изменений приведен на рисунке 4.6.

4.3 Разработка методики системного проектирования проветривания (включающей элементы искусственного интеллекта) с учетом пылеотсасывающих установок, встраиваемых в проходческие комбайны

Параметрический анализ является современным способом получения точной информации о влиянии всех параметров на критерии проектирования.

Начальные условия (по данным шахты «Им. С.М. Кирова» для проходческого забоя вентиляционной печи 24-64)						
Влияющие параметры (изменение которых возможно в определенном проектировщиком диапазоне и которые мало или совсем не влияют на технологию ведения горных работ)	Расстояние от конца воздуховода до плоскости забоя	l , м	от 2,5 до 5 м	5 м – по ФНП 1 м – ближе не позволит бар (в случае Sandvik 2,5 м) от 0,4 до 0,6 м (типоразмеры рукавов, используемые на предприятии)		
	Радиус воздуховода	$r_{\text{в}}$, м	0,5 м	можно изменить самостоятельно или по требованиям к производителю		
	Ширина патрубка скруббера	y , м	0,65 м	можно изменить самостоятельно или по требованиям к производителю		
	Высота патрубка скруббера	x , м	0,59 м	от 8,3 до 22,2 м/с		
	Средняя скорость движения воздуха на всее у скруббера	$v_{\text{ср}}$, м/с	11 м/с	от 9,8 м/с до 12 м/с от расчетного количества по газовому фактору до максимальных значений по ВМП		
	Средняя скорость движения воздуха из воздуховода	$v_{\text{в}}$, м/с	12 м/с	принимается равной плотности угля (возможно изменить на плотность вмещающих пород, подрабатываемых при проходке)		
	Плотность одной пылинки	$\rho_{\text{п}}$, кг/м ³	1400 кг/м ³	количество пылинок, отслеживаемое в процессе расчета (принято 100 исходя из скорости расчетов)		
	Количество пылинок одной формы и из одного вещества	$N_{\text{п,ск}}$	100	от 10 мкм до 300 мкм принимается по данным натурных измерений (перебор значений или фактическим распределением)		
	Радиус пылинки	$r_{\text{п}}$, м	10 мкм	стандартная величина для угля (углерод $M_{\text{C}} = 12$ г/моль)		
	Молярная масса	$M_{\text{с}}$, кг/ кмоль	12 кг/кмоль	определяется по скорости вращения бара		
	Начальная скорость вылета частиц пыли	$v_{\text{п}}$, м/с	2 м/с	определяется по методике Колесниченко А.Е.		
	Массовый расход пыли (Particle mass flow)	$m_{\text{п}}$, кг/с	50 кг/с	параметры проходческого забоя вентиляционной печи 24-64		
Фиксированные параметры	Ширина горной выработки	a , м	3,3 м	параметры проходческого забоя вентиляционной печи 24-64		
	Высота горной выработки	b , м	4,7 м	0,15 – 0,25 м/с – по ФНП		
	Минимальная допустимая скорость движения воздуха по выработке	$v_{\text{г, мин}}$, м/с	0,25 м/с	от 0 до $b = 4,7$ м		
	Высота местонахождения бара	z , м	от 0 до b м	0,5 м/с – по ФНП		
	Минимальная допустимая скорость движения воздуха в призабойной части	$v_{\text{г, мин}}$, м/с	0,5 м/с			

Рисунок 4.6 – Параметры численного моделирования и их возможные диапазоны изменения

Обладая этой информацией, проектировщик может принимать обоснованные решения на протяжении всего периода разработки решений по аэрологической безопасности. Как следствие параметрического анализа, при проектировании вентиляции можно сразу определить оптимальные режимы работы систем пылеотсоса.

Для параметрического анализа применяется программное обеспечение ANSYS DesignXplorer, в основе которого положен метод поверхности отклика (RSM). Он помогает проектировщикам легко визуализировать и оценивать различные варианты схем, режимов и способов проветривания по всем диапазонам влияющих параметров.

Алгоритм системного проектирования совместной работы скруббера и вентиляции проходческого забоя с элементами работы искусственного интеллекта приведен на рисунке 4.7.

В начале проектных работ создается базовая трехмерная модель и закладываются номинальные значения работы систем вентиляции и пылеотсоса.

При этом на данном этапе определяются параметры, которые могут влиять на эффективность работы систем пылеотсоса, а также определяются возможные диапазоны изменения. Те величины, которые изменяются в системе, отображаются как параметры (П).

После получения решения и предварительной оценки эффективности работы систем пылеотсоса (определяется величина разработанных критериев) используется модуль искусственного интеллекта, который автоматически генерирует таблицу влияющих параметров во всем их диапазоне (рисунок 4.8).

После этого запускается расчет по циклу, включающий изменение геометрии трехмерной модели, затем перестроение расчетной сетки, изменение начальных условий и далее происходит вычисление значений заданных критериев. Количество циклов определяет ИИ, чтобы составить

зависимости влияния всех факторов друг на друга и просчитать все возможные сценарии.

После данного этапа системного проектирования переходят к анализу влияния изменяющихся параметров на величины критериев.

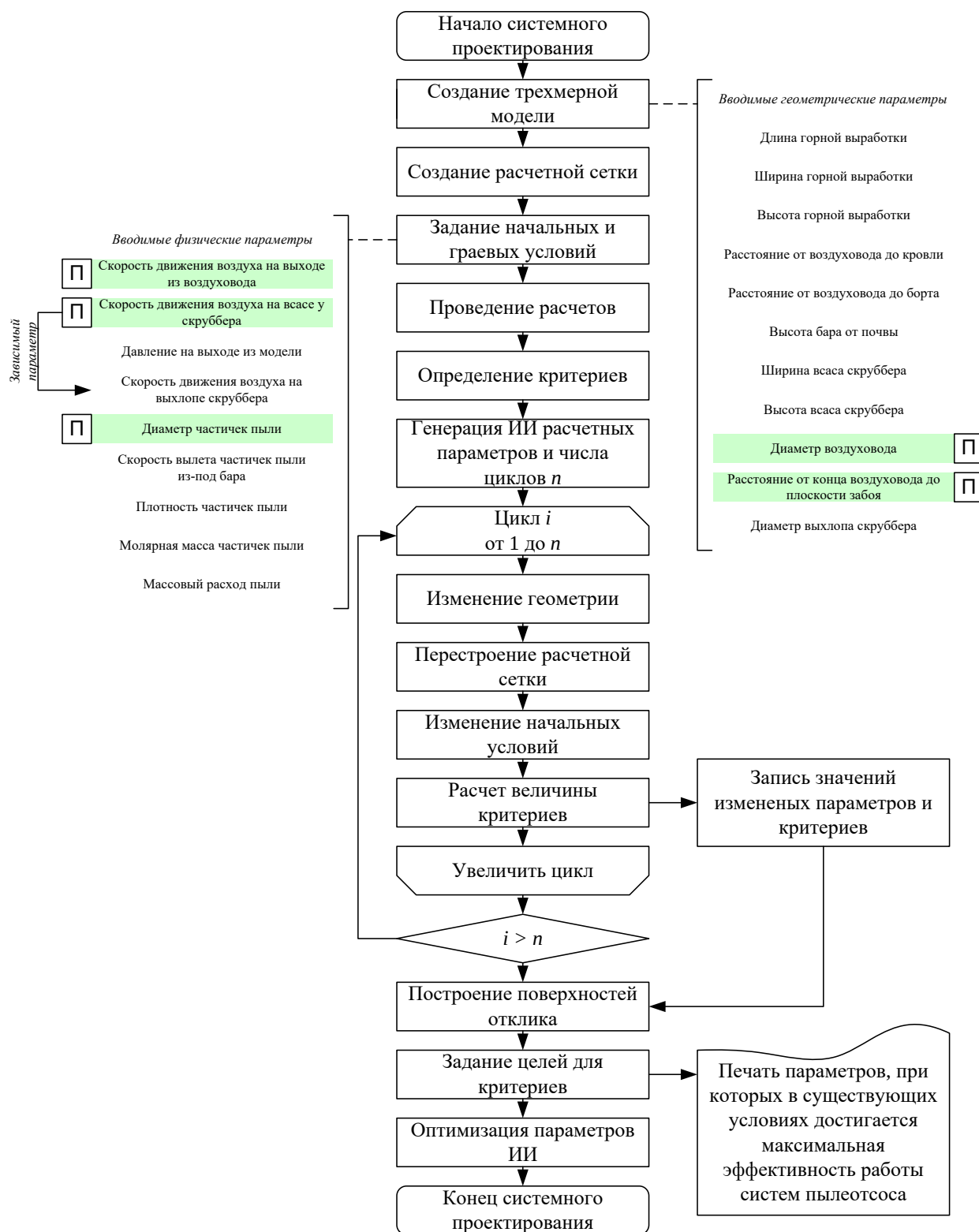


Рисунок 4.7 – Блок-схема алгоритма системного проектирования совместной работы скруббера и вентиляции проходческого забоя с элементами работы искусственного интеллекта

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Name	Update Order	P12 - RadVozd (m)	P18 - VelOutScrubber (m s ⁻¹)	P17 - VelInPipe (m s ⁻¹)	P13 - LengthVozd... (m)	P19 - DD (m)	P16 - Kr1	P15 - Kr3	P14 - Kr2
2	2	1	0,4	15	10	3,75	0,0005005	1	3,8575	1,2677
3	12	2	0,47167	13,017	9,4333	3,3958	0,00064203	0,9931	5,178	1,9162
4	16	3	0,47167	13,017	10,567	3,3958	0,00035897	1	5,8001	2,1464
5	14	4	0,47167	16,983	9,4333	3,3958	0,00035897	0,99454	5,178	1,4686
6	18	5	0,47167	16,983	10,567	3,3958	0,00064203	0,99371	5,8001	1,6451
7	20	6	0,47167	13,017	9,4333	4,1042	0,00035897	1	5,1787	1,9162
8	24	7	0,47167	13,017	10,567	4,1042	0,00064203	0,99424	5,8009	2,1464
9	22	8	0,47167	16,983	9,4333	4,1042	0,00064203	0,99856	5,1787	1,4686
10	26	9	0,47167	16,983	10,567	4,1042	0,00035897	0,99028	5,8009	1,6451
11	8	10	0,5	15	10	2,5	0,0005005	0,9985	6,2336	1,9809
12	4	11	0,5	8	10	3,75	0,0005005	1	6,2349	3,7141
13	6	12	0,5	15	8	3,75	0,0005005	0,99841	4,9879	1,5847
14	10	13	0,5	15	10	3,75	1E-06	0,99921	6,2349	1,9809
15	1	14	0,5	15	10	3,75	0,0005005	0,99971	6,2349	1,9809
16	11	15	0,5	15	10	3,75	0,001	1	6,2349	1,9809
17	7	16	0,5	15	12	3,75	0,0005005	1	7,4819	2,377
18	5	17	0,5	22	10	3,75	0,0005005	1	6,2349	1,3506
19	9	18	0,5	15	10	5	0,0005005	1	5,692	1,9809
20	13	19	0,52833	13,017	9,4333	3,3958	0,00035897	1	6,6281	2,4
21	17	20	0,52833	13,017	10,567	3,3958	0,00064203	0,99567	7,4245	2,6883
22	15	21	0,52833	16,983	9,4333	3,3958	0,00064203	1	6,6281	1,8394
23	19	22	0,52833	16,983	10,567	3,3958	0,00035897	0,99967	7,4245	2,0604
24	21	23	0,52833	13,017	9,4333	4,1042	0,00064203	1	6,6399	2,4043
25	25	24	0,52833	13,017	10,567	4,1042	0,00035897	1	7,4376	2,6931
26	23	25	0,52833	16,983	9,4333	4,1042	0,00035897	1	6,6399	1,8427
27	27	26	0,52833	16,983	10,567	4,1042	0,00064203	0,99859	7,4376	2,0641
28	3	27	0,6	15	10	3,75	0,0005005	1	9,3642	2,8524

Рисунок 4.8 – Таблица рабочих вариантов системного проектирования, сгенерированная ИИ (а), и результаты работы цикла (б)

Разработанный алгоритм системного подхода при проектировании систем совместной работы пылеотсоса и вентиляции можно применить к любым задачам и для любого количества и качества факторов в любом их диапазоне. Эти методы эффективны с точки зрения времени вычислений, поскольку они используют ограниченную выборку параметрического пространства для построения отклика поверхности, которые отображают математическую связь между влияющими параметрами и выходными параметрами (или критериями).

Диаграммы чувствительности (гистограммы) позволяют оценить степень влияния параметров на критерии (рисунок 4.9). Как видно на рисунке, разные влияющие параметры по-разному влияют на критерии, и степень их влияния существенно отличается. Так на пылединамический критерий большее влияние оказывает скорость всасывания воздуха

скруббером и диаметр частичек пыли, на третьем месте по степени влияния идет параметр отставания конца воздуховода от плоскости забоя.

На первый аэродинамический критерий большее влияние оказывает радиус воздуховода, затем по степени влияния идут параметры скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и отставание конца воздуховода от плоскости забоя.

На второй аэродинамический критерий большее влияние оказывает скорость всасывания воздуха скруббером, затем радиус воздуховода и скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода.

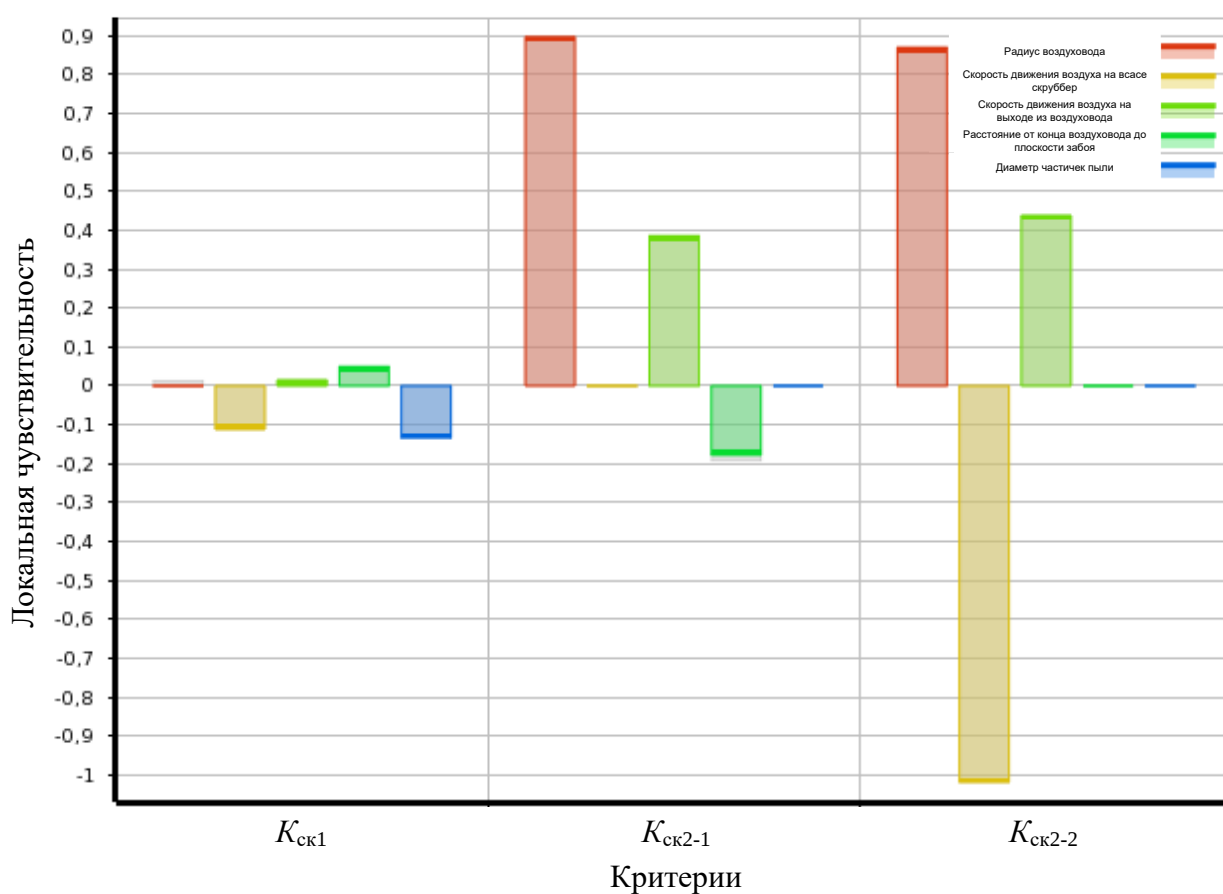


Рисунок 4.9– Диаграмма чувствительности критериев от влияющих параметров

Следовательно, если рассматривать только один критерий, то можно упустить влияющие на другой критерий факторы, тем самым снизив уровень аэрологической безопасности. То есть на первый пылединамический критерий влияние оказывает размер пыли и скорость засасывания пыли, что не противоречит общепринятым знаниям.

Двухмерные графики влияния определяющих параметров на пылединамический критерий (рисунки 4.10-4.14) – самые простые графики для понимания и передачи информации о вариации исполнения относительно проектных переменных.

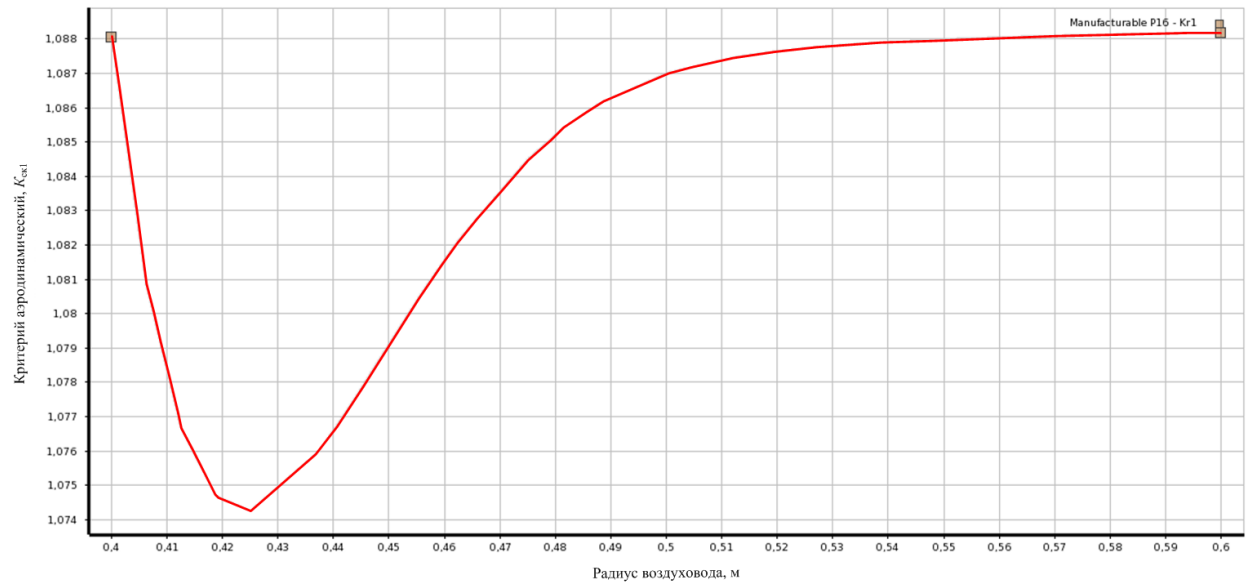


Рисунок 4.10 – График зависимости пылединамического критерия от радиуса воздуховода

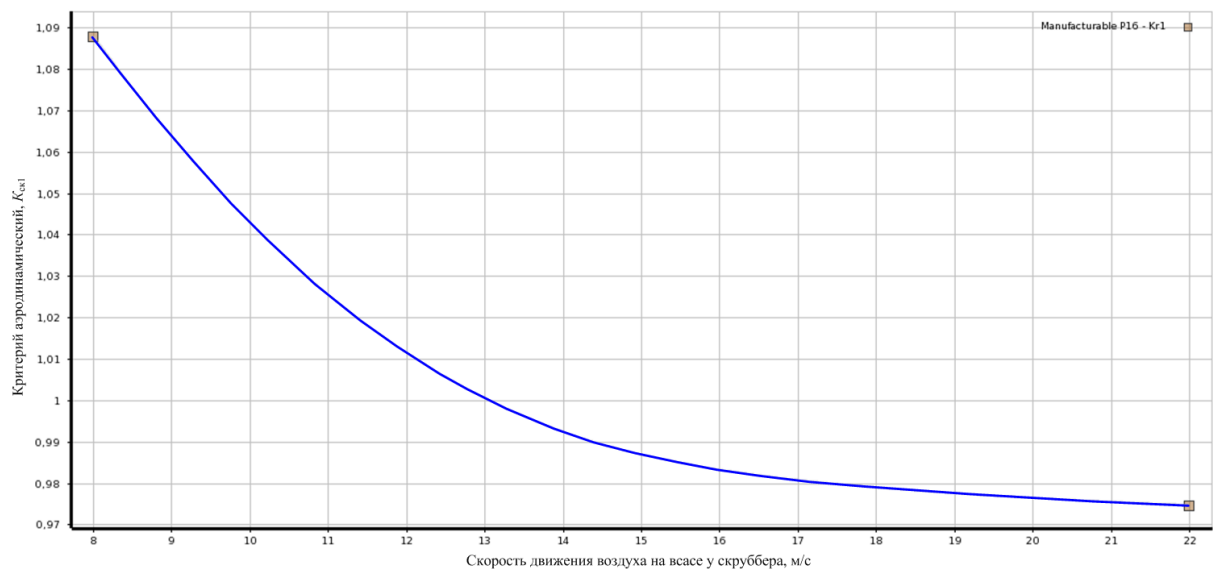


Рисунок 4.11 – График зависимости пылединамического критерия от скорости всасывания воздуха скруббером

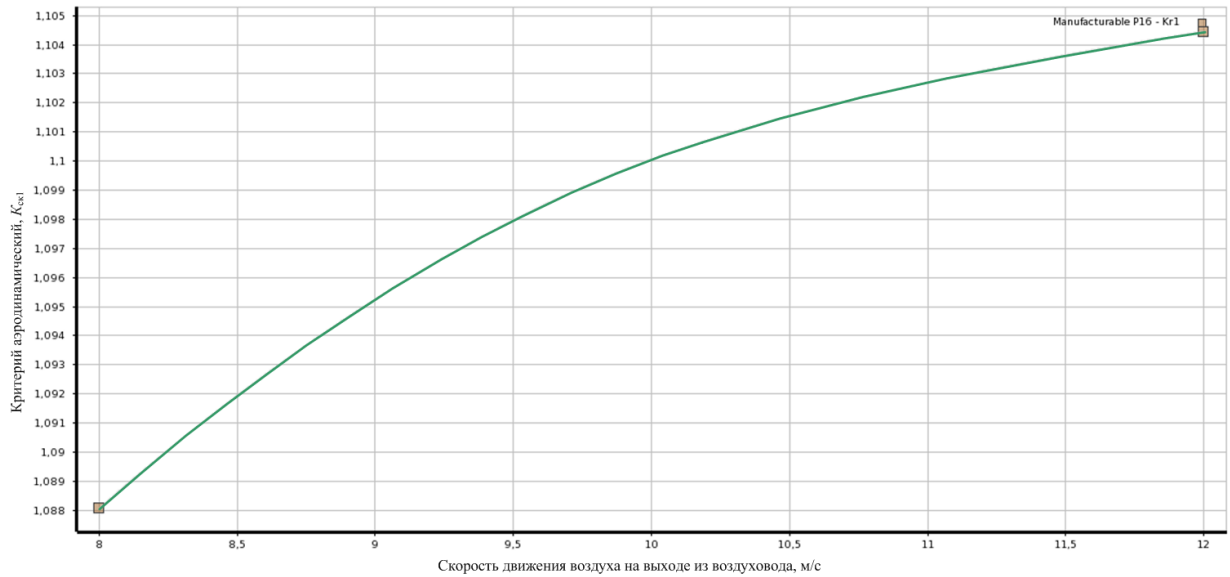


Рисунок 4.12 – График зависимости пылединамического критерия от скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода

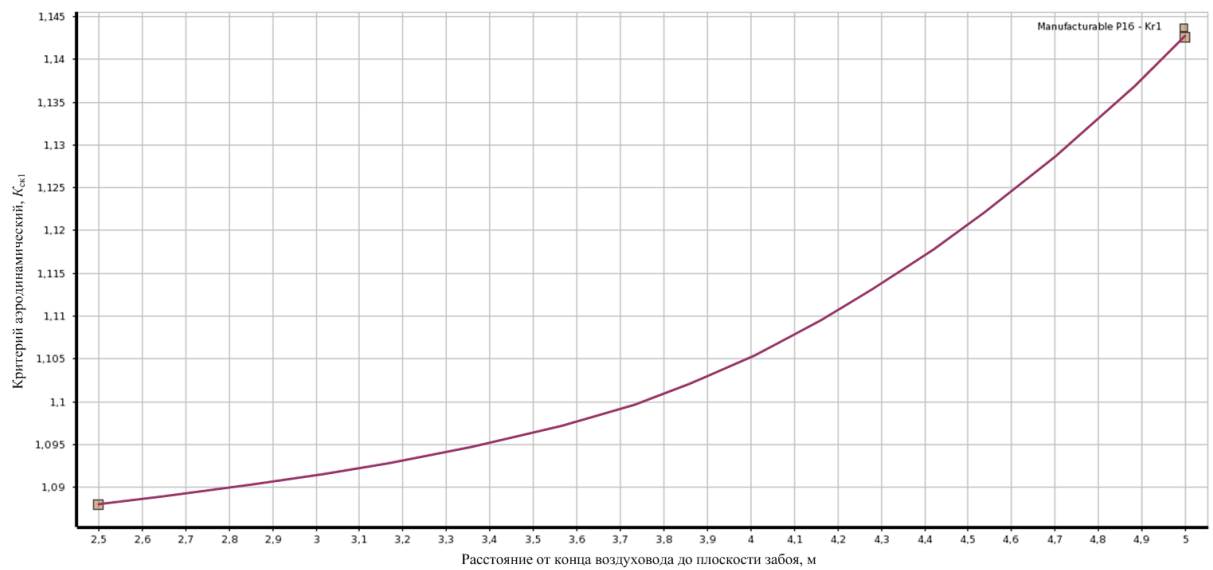


Рисунок 4.13 – График зависимости пылединамического критерия от длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя

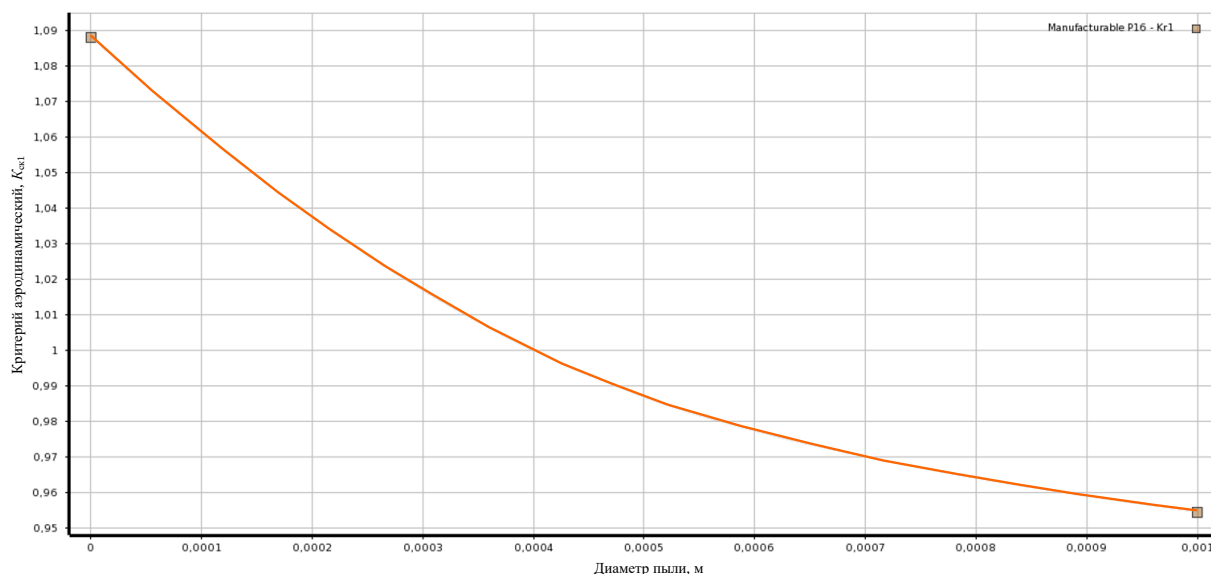


Рисунок 4.14 – График зависимости пылединамического критерия от размеров частиц пыли

Трехмерные контуры (рисунок 4.15-4.20) передают большие объемы данных, которые позволяют проектировщику принимать решения и учитывать взаимное влияние разнородных факторов.

Анализ полученных графиков показывает сложность взаимосвязей влияющих факторов. Поверхности откликов имеют явные максимумы и минимумы.

Анализ большого количества данных с целью выбора эффективных значений параметров совместной работы систем пылеотсоса весьма затруднителен, поэтому принято решение использовать искусственный интеллект.

Его работа основана на автоматизированном переборе заданного проектировщиком количества вариантов совместной работы аспирационного обеспыливания и системы вентиляции. При этом задается возможный диапазон изменения влияющих факторов и требуемые показатели эффективности работы пылеотсоса (пылединамический и аэродинамический критерии эффективности).

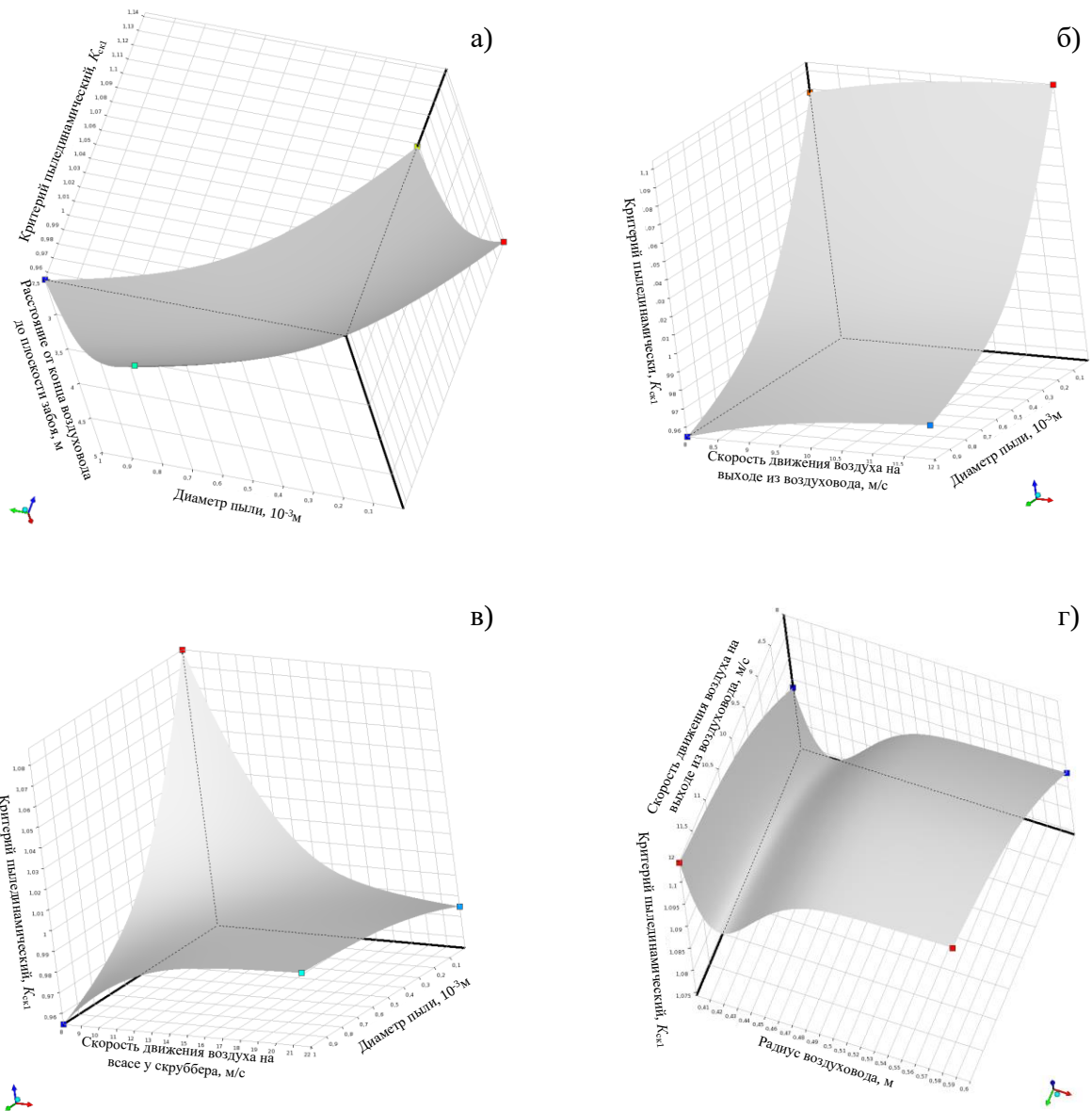


Рисунок 4.15 – График зависимости пылединамического критерия от совокупности влияющих факторов: а) длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя и диаметра частичек пыли; б) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода и диаметра частичек пыли; в) скорости засасывания воздуха скруббером и диаметра частичек пыли; г) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и радиуса воздуховода

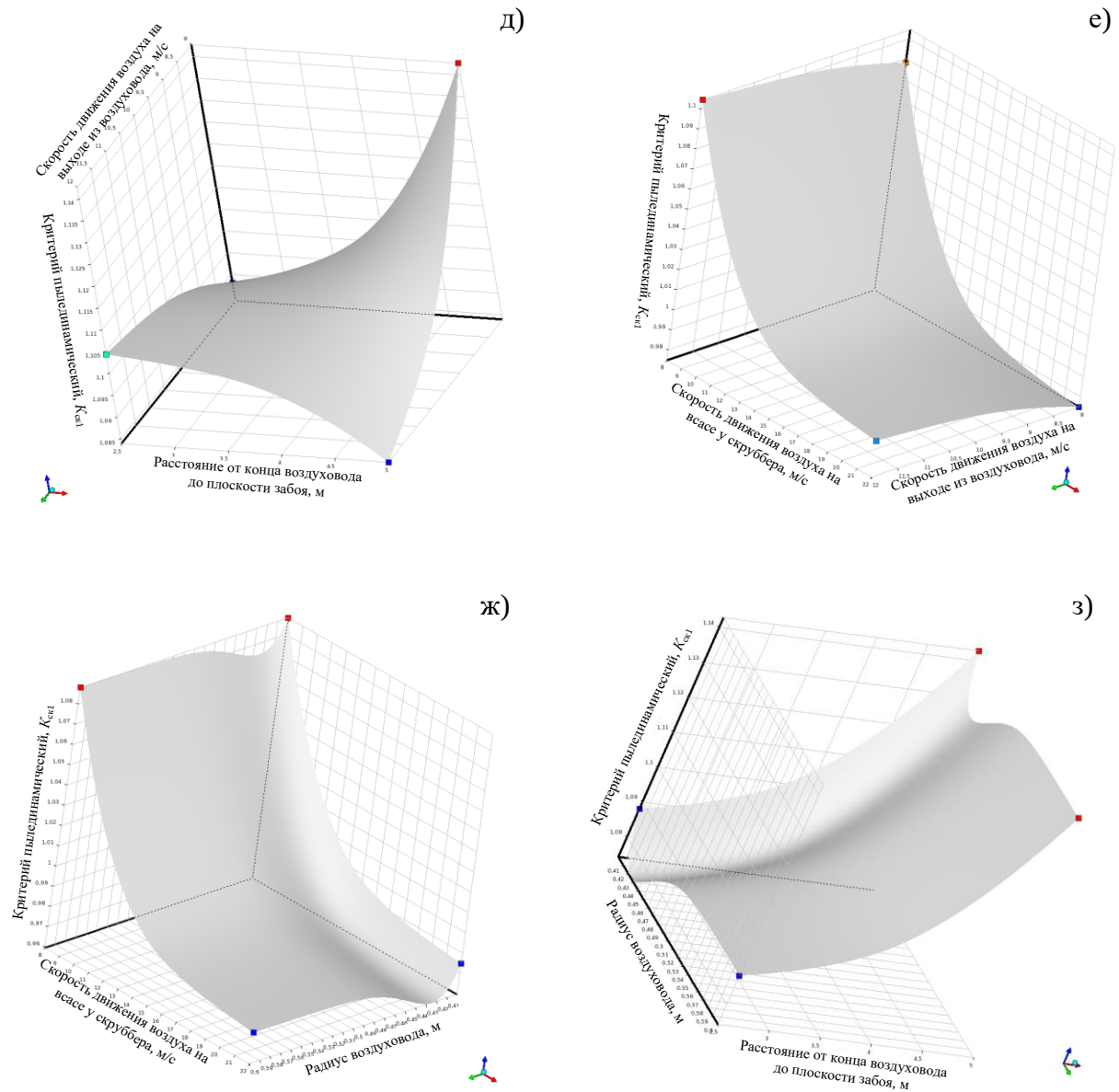


Рисунок 4.16 – График зависимости пылединамического критерия от совокупности влияющих факторов: д) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя; е) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и скорости всасывания воздуха скруббером; ж) скорости засасывания воздуха скруббером и радиуса воздуховода; з) радиуса воздуховода и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя

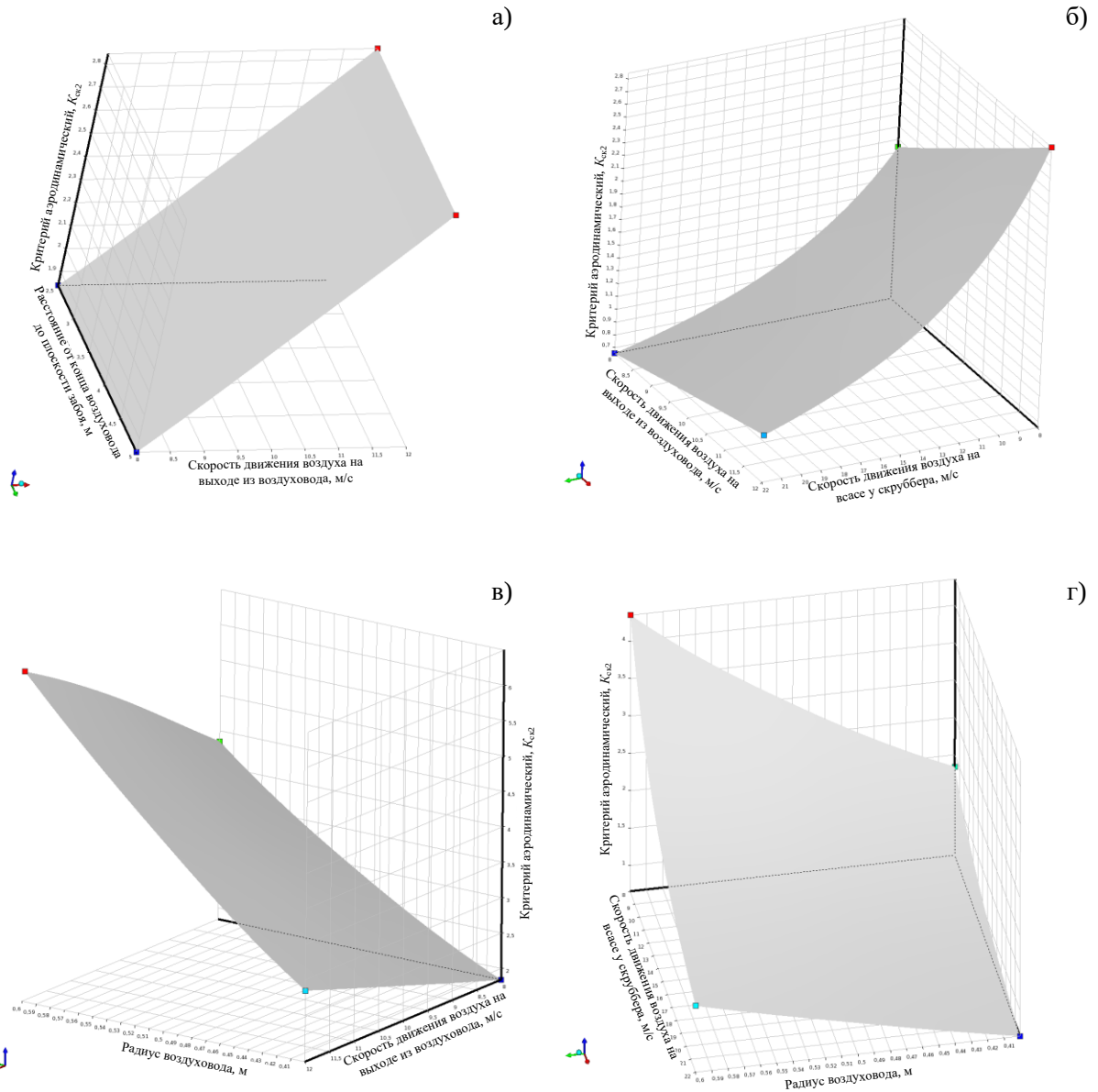


Рисунок 4.17 – График зависимости аэродинамического первого критерия от совокупности влияющих факторов: а) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя; б) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода и скорости засасывания воздуха скруббером; в) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и радиуса воздуховода; г) скорости всасывания воздуха скруббером и радиуса воздуховода

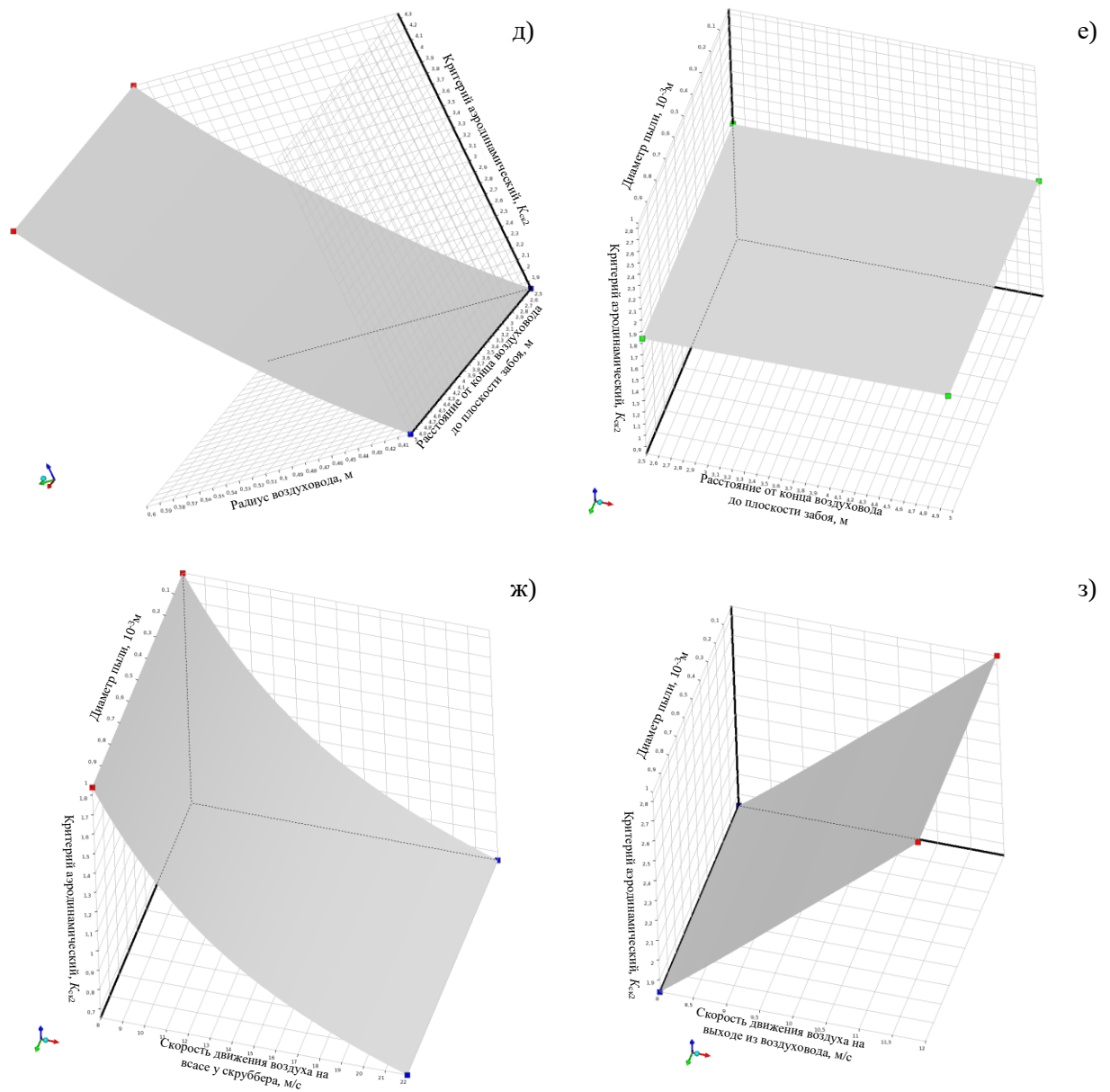


Рисунок 4.18 – График зависимости аэродинамического первого критерия от совокупности влияющих факторов: д) радиуса воздуховода и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя; е) длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя и диаметра частичек пыли; ж) скорости всасывания воздуха скруббером и диаметра частичек пыли; з) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и диаметра частичек пыли

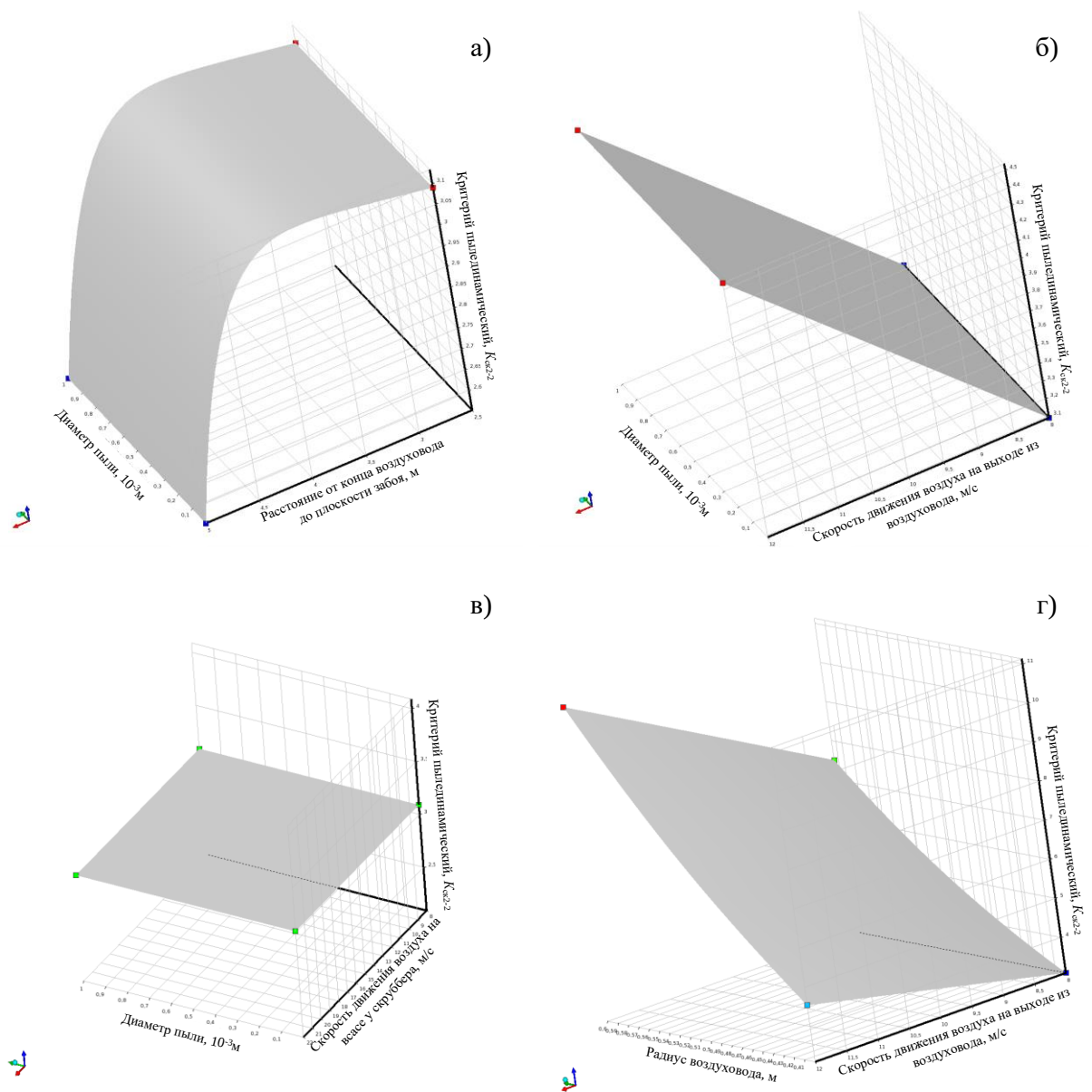


Рисунок 4.19 – График зависимости аэродинамического второго критерия от совокупности влияющих факторов: а) длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя и диаметра частичек пыли; б) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и диаметра частичек пыли; в) скорости всасывания воздуха скруббером и диаметра частичек пыли; г) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и радиуса воздуховода

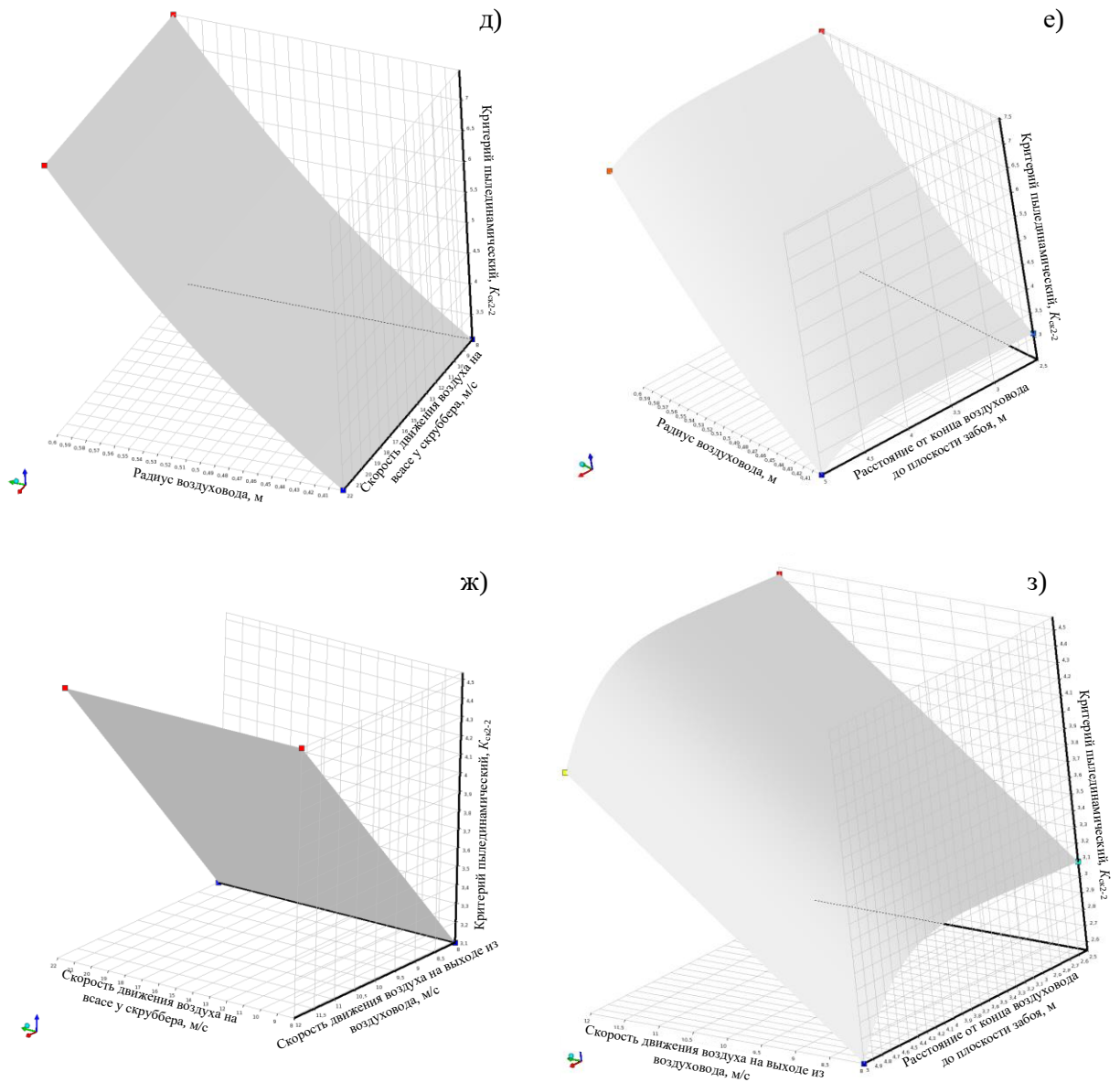


Рисунок 4.20 – График зависимости аэродинамического второго критерия от совокупности влияющих факторов: д) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и радиуса воздуховода; е) радиуса воздуховода и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя; ж) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и скорости засасывания воздуха скруббером; з) скорости движения воздуха, поступающего из воздуховода, и длины отставания конца воздуховода от плоскости забоя

4.4 Предложения по повышению эффективности проветривания проходческого забоя по пылевому фактору

В основе разработки рекомендаций по выбору эффективных параметров работы систем пылеотсоса HCN300/1 НУ, встраиваемых в Sandvik, совместно с проветриванием проходческого забоя лежит работа искусственного интеллекта.

По полученным ранее данным (результатам расчета величин критериев при различных значениях влияющих параметров см. рисунок 4.8) были построены поверхности откликов. С учетом аппроксимации полученных значений для заданных целей по пылединамическому и аэродинамическому критериям искусственный алгоритм (заложенный в модуле ANSYS DesignXplorer) просчитал 1000 вариантов для выбора трех случаев (рисунок 4.21), при которых значения критериев максимально близки к необходимым с точки зрения эффективности и безопасности ($K_{ск1} = 0$, $K_{ск2-1} > 1$, $K_{ск2-2} = 1$). Окно проектов приведено на рисунке 4.22.

Радиус воздуховода		1 вариант, предложенный ИИ	2 вариант, предложенный ИИ	3 вариант, предложенный ИИ
Радиус воздуховода	$r_{в}, \text{ м}$	0,6	0,6	0,6
Расстояние конца воздуховода до плоскости забоя	$l, \text{ м}$	22	22	22
Средняя скорость движения воздуха на всасе у скруббера	$v_{ск}, \text{ м/с}$	12	12	8
Средняя скорость движения воздуха из воздуховода	$v_{в}, \text{ м/с}$	5	2,5	2,5
Радиус пылинки	$r_{п}, \text{ мкм}$	10	10	10

Пылединамический критерий - $K_{ск1}$	$K_{ск1} = \frac{c_{п} - c_{ск}}{c_{п}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_{п.i} - N_{ск.i}}{N_{п.i}} = 0,$	0,97043	0,99305	0,97499
Аэродинамический критерий - $K_{ск2-1}$	$K_{ск2} = \frac{Q_{возд.}}{Q_{ск.}} > 1$	10,659	11,132	7,499
Аэродинамический критерий - $K_{ск2-2}$	$K_{ск2} = \frac{Q_{возд.}}{Q_{ск.} + Q_{г.в.min}} = 1$	2,3504	2,3504	1,5428

Рисунок 4.21 – Предложенные ИИ параметры эффективной работы систем обеспыливания

	A	B	C	D
1	[-] Optimization Study			
2	Seek P14 = 1	Goal, Seek P14 = (Default Importance)		
3	Maximize P15	Goal, Maximize P15 (Default importance)		
4	Seek P16 = 0	Goal, Seek P16 = (Default Importance)		
5	[-] Optimization Method			
6	Screening	The Screening optimization method uses a simple approach based on sampling and sorting. It supports multiple objectives and constraints as well as all types of input parameters. Usually it is used for preliminary design, which may lead you to apply other methods for more refined optimization results.		
7	Configuration	Generate 1000 samples and find 3 candidates.		
8	Status	Converged after 32 evaluations.		
9	[-] Candidate Points			
10		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
11	P12 - RadVozd (m)	0,6	0,6	0,6
12	P18 - VelOutScrubber (m s^-1)	22	22	22
13	P17 - VelInPipe (m s^-1)	12	12	8
14	P13 - LengthVozdFace (m)	5	2,5	2,5
15	P19 - DD (m)	1E-06	1E-06	1E-06
16	P16 - Kr1	✖✖ 0,97043	✖✖ 0,99305	✖✖ 0,97499
17	P15 - Kr3	★★ 10,659	★★ 11,132	— 7,4999
18	P14 - Kr2	★★ 2,3504	★★ 2,3504	★★ 1,5428

Рисунок 4.22 – Окно проектов

Чувствительность параметров, влияющих на критерии, показывает (рисунок 4.23), что на первый критерий (пылединамический) при данном общем размещении воздуховода, всаса скруббера и с учетом конструкции проходческого комбайна влияет только размер пылинок. На аэродинамический параметр влияют как скорость движения воздуха, поступающего из воздуховода, и скорость всасывания воздуха скруббером, так и диаметр воздуховода, длина отставания конца воздуховода от плоскости забоя.

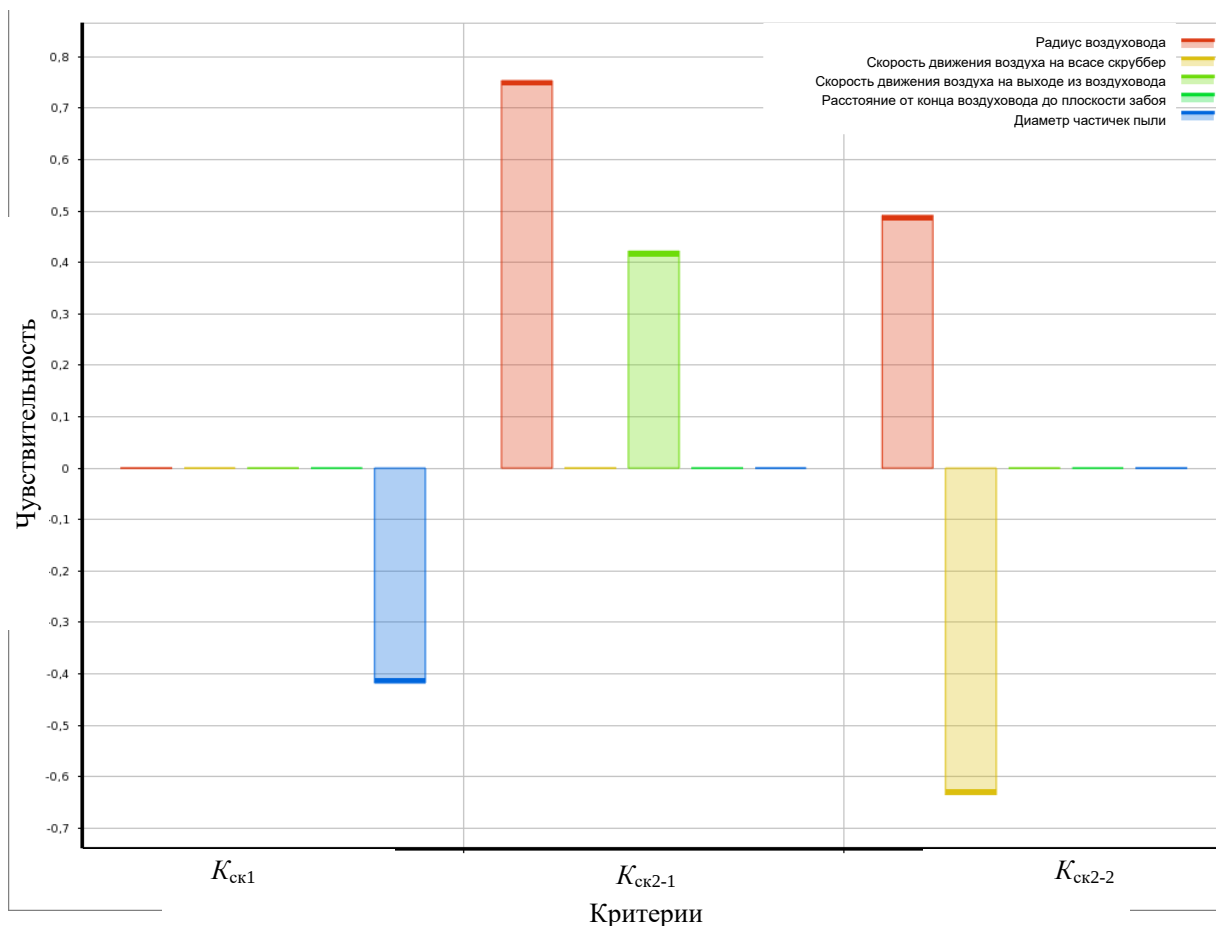


Рисунок 4.23 – Чувствительность критериев к влияющим параметрам

Выводы

Разработаны матрицы влияния соотношения производительности скруббера с поступающим количеством воздуха на качество пылеочистки. Матрицы позволяют определить диапазон эффективности совместной работы скруббера и режима проветривания тупиковых горных выработок.

Рассмотрены возможные варианты влияния работы скруббера на режим проветривания. Установлено, что есть режимы аэрологически не безопасные, при которых могут образовываться зоны рециркуляции и застойные зоны.

На основании проведенных исследований были разработаны критерии оценки эффективности систем пылеотсоса с учетом системы проветривания проходческого забоя.

Показано что критерии эффективности работы систем пылеотсоса могут быть использованы как при обычном проектировании, так и при системном.

Первый – критерий очистки рудничной атмосферы от пыли – пылединамический, смысл его состоит в том, что при работающем скруббере необходимо, чтобы вся пыль была забрана скруббером. Критерий должен стремиться к нулю. Если скруббер не работает, то вся поступившая в рудничную атмосферу пыль (за один цикл) остается в призабойном пространстве и далее распространяется по горной выработке, то есть критерий равен единице.

Второй критерий условия отсутствия рециркуляции и застойных зон – аэродинамический критерий. Он определяется по двум выражениям: отношению поступающего воздуха в забой к забираемому системой пылеотсоса. Критерий должен быть больше единицы. Но при этом по второму отношению критерий должен стремиться к единице. С учетом того, что в части, где размещен скруббер, после того как он забрал часть запыленного рудничного воздуха, другая часть воздуха должна двигаться в сторону от забоя с минимальной допустимой скоростью. Это помешает образованию рециркуляции и застойных зон.

Для системного проектирования в условиях применения системы пылеудаления HCN300/1 НУ были определены влияющие параметры и их возможный диапазон.

Включение искусственного интеллекта в системное проектирование осуществляется путем использования компьютерного модуля Ansys Design Explorer.

Суть предлагаемого способа заключается в следующем:

- при разработке трехмерной компьютерной модели в разделе «Геометрия» определенные ранее влияющие факторы задаются как параметры (т.е. величины, которые мы можем изменять в процессе

проектирования). К этим параметрам в работе отнесены: отставание конца воздуховода от плоскости забоя, радиус воздуховода;

- далее строится расчетная сетка;
- при задании начальных и граничных условий аэрологические параметры также используются как вариативные величины. К ним относятся средняя скорость воздуха, поступающего в забой по воздуховоду, и скорость воздуха на всасе скруббера (при проектировании можно задавать любое количество влияющих параметров);
- в результате выполненных работ получены оптимальные значения скорости движения воздуха, радиус воздуховода и расстояние от конца воздуховода до плоскости забоя. Данные результаты в виде рекомендации переданы на шахту.

Разработанные рекомендации по конструктивным улучшениям системы пылеотсоса, переданы производителю горного оборудования HCN300/1 НУ и Sandvik компании CFT.

Определены оптимальные значения параметров для системы пылеудаления HCN300/1 НУ, встроенной в проходческий комбайн Sandvik: (скорость движения воздуха, диаметр воздуховода, его отставание от плоскости забоя и расход воздуха подаваемого вентилятором местного проветривания), которые использованы при выборе эффективных режимов работы скруббера на шахтах АО «СУЭК».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано новое решение актуальной для угольной промышленности научной задачи по обоснованию эффективных средств и параметров аспирационного обеспыливания проходческих забоев угольных шахт. Полученные решения позволяют за счет применения системного подхода в проектировании вентиляции повысить эффективность пылеотсасывающих установок.

Основные научные и практические выводы работы заключаются в следующем:

1. Разработана классификация пылеотсасывающих установок с учетом функциональности, месторасположения их во времени и пространстве, а также принципов очистки рудничной атмосферы от пыли.
2. Конструктивные недостатки всаса скруббера с большей вероятностью способствуют заполнению системы пылеочистки штыбом и более крупными кусками горной массы. Это приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и, как следствие, увеличению депрессии и падению производительности скруббера.
3. Установлено, что при работе скруббера за один цикл происходит увеличение аэродинамического сопротивления на 15 % из-за загрязнения фильтров рудничной пылью и водой, используемой для орошения.
4. Падение эффективности работы можно характеризовать как неправильный режим работы.
5. Результаты работы внедрены на всех шахтах АО «СУЭК». Результаты работы используются при системном проектировании вентиляции работниками участков вентиляции и техники безопасности (аэрологической безопасности).
6. Установлено (опытным путем по данным с 8 шахт 23 участков) значение коэффициента запыленности $k_v = 0,01041 \pm 0,005$ для расчета распределения концентрации пыли вдоль выработок в условиях

использования различных способов обеспыливания (орошения, пылеотсоса) для формулы

$$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.}x}}}.$$

8. В паспортах на установку ВМП не учитывается факт работы скруббера. В случае неконтролируемой приборами производительности скруббера $250 \div 300 \text{ м}^3/\text{мин}$ при подаче воздуха в забой расчетного расхода воздуха $300 \text{ м}^3/\text{мин}$ (по минимальной скорости воздуха $0,25 \text{ м/с}$) возможно образование непрветриваемых зон и слоевых скоплений метана над комбайном.
9. На основе проведенных шахтных исследований и аналитических умозаключений были разработаны матрицы влияния соотношения производительности скруббера с поступающим количеством воздуха на качество пылеочистки. По ним определяется диапазон эффективности совместной работы скруббера и режима проветривания тупиковых горных выработок.
10. Рассмотрены все возможные варианты влияния работы скруббера на режим проветривания. Установлено, что существуют режимы аэрологически не безопасные, при которых могут образовываться зоны рециркуляции и застойные зоны.
11. Разработаны критерии эффективности систем пылеотсоса с учетом системы проветривания проходческого забоя, которые могут быть использованы как при обычном проектировании, так и при системном.
12. Проведенное численное трехмерное компьютерное моделирование распределения пыли в призабойной части горной выработки при работе пылеотсасывающих установок, установленных на проходческом комбайне, показало полное подобие потоков в натуре и модели, а также подтвердили универсальность принятого подхода проектирования вентиляции горных предприятий.
13. Включение искусственного интеллекта в проектирование системы проветривания тупиковой горной выработки, осуществляемое путем

использования компьютерного модуля Ansys Design Xplorer, позволят автоматически обосновать эффективность средств и параметров аспирационного обеспыливания высокопроизводительных проходческих забоев угольных шахт.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих опубликованных работах:

- 1 Кобылкин С.С., Тимченко А.Н., Кобылкин А.С. Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны// Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 3. – С. 21-27. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-3-21-27 **(индексируется в базах данных ВАК и Scopus)**
- 2 Тимченко А.Н. Экспериментальное определение расчетных коэффициентов для проектирования проветривания проходческих забоев с учетом работы пылеотсосов / Уголь. – 2020. – № 5. – 15-20 С. **(индексируется в базе данных Scopus)**
- 3 Воробьева О.В., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S61. С. 3-17. **(издательство рекомендовано ВАК)**
- 4 Романченко С.Б., Гендлер С.Г., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н. Экспериментальные и теоретические исследования динамики взрывоопасных рудничных аэрозолей / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S5-1. С. 181-189. **(индексируется в базе данных ВАК)**
- 5 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Использование современных технических средств пылевого контроля для производства специальной оценки условий труда. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. «Горная книга». – 2016. №4. – С. 382-387. **(издательство рекомендовано ВАК)**

- 6 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Сравнительные испытания стационарных и переносных измерителей концентрации пыли. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 11 (специальный выпуск 60-2). 648 с. М.: Изд. «Горная книга». 2015. – С.392-401. **(индексируется в базе данных ВАК)**
- 7 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Аппаратный контроль индивидуальной пылевой нагрузки и пылевзрывобезопасности на высокопроизводительных предприятиях / Международная научно-практическая конференция «Горное дело в 21-м веке: технологии, наука, образование» Тезисы докладов. Санкт-Петербургский Горный Университет, 2015. – С.44-45.
- 8 Костеренко В.Н., Тимченко А.Н., Воробьева О.В. Анализ причин аварий с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 12. С. 194-199. **(издательство рекомендовано ВАК)**
- 9 Романченко С.Б., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н., Поздняков Г.А., Руденко Ю.Ф., Артемьев В.Б., Копылов К.Н. Комплексное обеспыливание. Серия «Библиотека горного инженера». Т6 «Промышленная безопасность». Кн. 8. М.: изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – С. 288
- 10 Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 7. С. 368-377. **(издательство рекомендовано ВАК)**
- 11 Костогрызov А.И., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н., Артемьев В.Б. Основы противоаварийной устойчивости угольных предприятий / Москва, 2014. Сер. Библиотека горного инженера Том 6 Промышленная безопасность. Книга 11.

Справка о внедрении



РОССИЯ, 652507, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛ.,
г. ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКИЙ
УЛ. ВАСИЛЬЕВА, 1
ТЕЛ: (38456) 9-33-11
ФАКС: (38456) 3-32-19
E-MAIL: suek-kuzbass@suek.ru

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы соискателя кафедры Безопасности и экологии горного производства Горного института НИТУ «МИСиС» Тимченко Александра Николаевич на тему: «Обоснование эффективных средств и параметров аспирационного обеспыливания высокопроизводительных проходческих забоев угольных шахт»

Результаты диссертационного исследования по определению эффективных параметров аспирационного обеспыливания (пылеотсосов), встраиваемых в проходческие комбайны, полученные Тимченко А.Н. на основе его разработок связанных с применением компьютерного моделирования и искусственного интеллекта для скрубберов, встраиваемых в проходческие комбайны типа Sandvik MB670-1 используются в процессе ведения горных работ на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Выданные рекомендации по режиму проветривания и технологическим параметрам (отставание конца воздуховода от плоскости забоя) приняты при проектировании вентиляции и обеспечении аэрологической безопасности.

Заместитель технического директора
Начальник технического управления



Саяпин М.Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 BP Statistical Review of World Energy. 68th edition. 2019. – 64 pp.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- 2 Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-сентябрь 2018 года. М.: Уголь № 12 – 2018. С. 60-69
- 3 Аварийность и противоаварийная защита предприятий угольной промышленности: Ежемесячный информационный бюллетень ФГУП ЦШ ВГСЧ. М.: 2017. № 1.
- 4 Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Смирнов О.В. Взрывоопасность угольных шахт. Серия «Библиотека горного инженера». Т9 «Рудничная аэрология». Кн. 2. М.: изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – С. 264
- 5 Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. Серия «Библиотека горного инженера». Т6 «Промышленная безопасность». Кн. 9. М.: изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – С. 256
- 6 Романченко С.Б., Лебецки К.И. Пылевая взрывоопасность горного производства. Серия «Библиотека горного инженера». Т6 «Промышленная безопасность». Кн. 10. М.: изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – С. 464
- 7 Анализ воздействия факторов производственной среды на здоровье работников, занятых на подземных работах. Отчет НИР. Договор №10 с АО «СУЭК». Клин, 2018. – 328 С.
- 8 Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 27 апреля 2012 г. № 417н «Об утверждении перечня профессиональных заболеваний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293793/4293793625.htm>

- 9 ГОСТ 12.1.041-83 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность горючих пылей. Общие требования (введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 15.07.1983 № 3276) (ред. от 06.12.1990)
- 10 ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 12.12.1989 № 3683) (ред. от 01.04.2000)
- 11 Смирнов О.В., Айруни А.Т. Взрывы газопылевоздушных смесей в угольных шахтах. – Липецкое издательство, 2000. – 208 С.
- 12 Правила безопасности в угольных шахтах. Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 200 с.
- 13 Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах. Приказ Ростехнадзора № 462 от 14.10.2014 (ред. от 25.09.2018) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности» (Зарегистрировано в Минюсте России 22.12.2014 № 35312) Консультант плюс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173968/
- 14 Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах. Серия 05. Выпуск 25. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 52 с.
- 15 Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / пер. с англ. под редакцией д.х.н. Н.А. Фукса. Л.: Химия, 1969. - 428 с.
- 16 ГОСТ Р 55175-2012 «Атмосфера рудничная. Методы контроля запыленности». – Люберцы: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2012.-30 с. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации <http://docs.cntd.ru/document/1200096585>

- 17 Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1979. – 319 С.
- 18 Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах. М.: Недра, 1975. – 65 С.
- 19 Приказ Ростехнадзора от 06.11.2012 № 634 (ред. от 22.06.2016) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах» (Зарегистрировано в Минюсте России 25.12.2012 № 26359) Консультант плюс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_141069/
- 20 Воронин В.Н. Параметры вентиляционной струи, характеризующей эффективность выноса пыли из горных выработок. Т. I. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 97–114.
- 21 Бурчаков А.С., Москаленко Э.М. Динамика аэрозолей в горных выработках. М.: Наука, 1965.-170 с.
- 22 Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 256 с.
- 23 Биржевые котировки сайт Finanz.ru <https://www.finanz.ru/birzhevyyetovary/ugol-cena>
- 24 Романченко С.Б., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н., Поздняков Г.А., Руденко Ю.Ф., Артемьев В.Б., Копылов К.Н. Комплексное обеспыливание. Серия «Библиотека горного инженера». Т6 «Промышленная безопасность». Кн. 8. М.: изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – С. 288
- 25 Никитин В.С., Битколов Н.З. Проектирование вентиляции в карьерах. М., Недра, 1980. – 171 С.
- 26 Официальный сайт компании Komatsu. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://mining.komatsu/product-details/12hm31>

- 27 Официальный сайт компании CFT. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://cft-gmbh.de/ru/obespylivanie>
- 28 Prostański D. Use of air-and-water spraying systems for improving dust control in mines. *Journal of Sustainable Mining* / Vol. 12, (2013), № 2, pp. 29–34
- 29 Стандарт отрасли «Рудничная атмосфера. Методы контроля запыленности» (ОСТ 153-12.0-004-01) Люберцы: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2001. – 35 с.
- 30 Гродель Г.С., Губский Ю.Н. Кривохижа Б.М. Обеспыливание воздуха при работе выемочных машин и комплексов: Обзор / ЦНИЭИуголь. – М.: 1985. – 48 С.
- 31 Patts J.R., Colinet J.F., Janisko S.J., Barone T.L., Patts L.D. Reducing float coal dust: Field evaluation of an inline auxiliary fan scrubber. *Mining Engineering*, 2016, Vol. 68, No. 12, pp. 63-68. Official publication of the Society for Mining, Metallurgy & Exploration Inc. <https://doi.org/10.19150/me.6883>
- 32 Water sprays for dust control on (56) References Cited. *Mining machines*. United States Patent/ Patent No.: US 8,632,133 B2 Date of Patent: Jan. 21, 2014 <https://patentimages.storage.googleapis.com/85/ca/63/3cc45b4cd879e2/US8632133.pdf>
- 33 Arya S., Novak T., Saito K., Levy A., Sottile J. Empirical Formulae for Determining Pressure Drop Across a 20-Layer Flooded-Bed Scrubber Screen / *Mining, Metallurgy & Exploration*. Volume 36, 2019. – pp. 1169–1177 <https://link.springer.com/article/10.1007/s42461-019-0091-5>
- 34 Relangi D.D. Wetting characteristics of herrin coal and its application for improved dust control. *Southern Illinois University Carbondale*. 2012. – 124 p.
- 35 Ефремов Г.И., Лукачевский Б.П. Пылеочистка. М.: Химия, 1990. – 72 С.
- 36 Гендлер С.Г., Синявина С.В. Методика определения параметров системы подогрева воздуха в железнодорожных тоннелях,

- расположенных в суровых климатических условиях // Записки Горного института. 2017. Т. 224, – С. 215-222
- 37 Gendler S.G., Rudakov M.L., Kuznetsov V.S. Evaluation principles of the dust influence of mining enterprises on the environment // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2019. Т. 56. № 3, – С. 62-69.
 - 38 Semin, M.A., Levin, L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection. 2019, – pp. 167-171
 - 39 Зайцев А.В., Клюкин Ю.А. Ресурсосберегающие решения в системах кондиционирования рудничного воздуха / Проблемы недропользования. 2015. № 2 (5). С. 26-31.
 - 40 Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В. Теория и практика прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников. – М.: Недра, 2014. – 244 с.
 - 41 Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S7. С. 93-104.
 - 42 Кобылкин А.С. Сравнение результатов шахтных исследований с результатами моделирования процессов пылепереноса и пылеотложения / В книге: Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. 2018. – С. 269-273.
 - 43 Кобылкин А.С. Исследование распространения и осаждения частиц пыли в горных выработках, с учётом расположенного в ней оборудования / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. № S32. – С. 61-66.
 - 44 Кобылкин А.С. Исследование распределения частиц угольной пыли по горным выработкам / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. № S49. – С. 208-214.
 - 45 Кобылкин А.С. Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках, в зависимости от расположения источника

- пылевыведения / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. № 6. – С. 291-302.
- 46 Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Методология системного проектирования вентиляции шахт / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S1. С. 128-136
 - 47 Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. System solutions for ensuring methane safety of coal mines / Mining Journal. 2014. T. 5. C. 12.
 - 48 Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт / Горный журнал. – 2014. № 5. – С. 12-17.
 - 49 Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: Problems and solutions. Eurasian Mining – 2015 (2), – pp. 26-30 DOI: 10.17580/em.2015.02.07
 - 50 Каледина Н.О., Кобылкин С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт. Горный журнал. М.: Изд. «Руда и металлы» – 12.2014. – 99-104 с.
 - 51 Кобылкин С.С. Системное проектирование вентиляции горных предприятий / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. № S1. – С. 150-156.
 - 52 Коликов К.С., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Кафедра «Безопасность и экология горного производства»: прошлое, настоящее и // Горный журнал. –2018. – № 3. – 15-26 с.
 - 53 Кобылкин С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. МГИ НИТУ МИСиС, М.: 2018. – 322 с.
 - 54 Кобылкин С.С. Обоснование метода расчета параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. МГГУ, М.: 2011. – 128 с.

- 55 Wimshurst A. Fluid Mechanics 101 Calculators & Tools. 2019. – 7 p.
<https://www.fluidmechanics101.com/pages/tools.html> (дата обращения 03.09.2020)
- 56 Arya, Sampurna N. Investigation of the Effectiveness of an Integrated Flooded-Bed Dust Scrubber on a Longwall Shearer Through Laboratory Testing and CFD Simulation University of Kentucky, ProQuest Dissertations Publishing, 2018. – 197 p.
- 57 Arya, S., Sottile, J., Novak, T. Numerical Modeling of a Flooded-Bed Dust Scrubber Integrated into a Longwall Shearer // Mining, Metallurgy and Exploration / <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203530423>
- 58 Arya, S., Novak, T. Numerical Investigation of the Effect of a Novel Wet Scrubber on Dust Reduction in an Underground Coal Mine // Mining, Metallurgy and Exploration. – volume 37. 2020. – 129-139 pp.
- 59 Arya, S., Sottile, J., Rider, J.P., (...), Novak, T., Wedding, C. Design and experimental evaluation of a flooded-bed dust scrubber integrated into a longwall shearer / Powder Technology. - 2018. Volume 339, - pp. 487-496
- 60 ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 18.0. ANSYS, Inc. 2017. 1034 p.
- 61 Сапрончик по рудничной вентиляции. Под ред. К.З. Ушакова. М. Недра. 1977 – 328 с.
- 62 Официальный сайт организации CFT URL: <https://cft-gmbh.de/ru/obespylivanie> (дата обращения 13.09.2020)
- 63 Справочник по борьбе с рудничной пылью. Под редакцией Л.И. Барона. М.: Госинти. – 324 С.
- 64 Кудряшов В.В. Научные основы гидрообеспыливания шахт Севера. М.: Наука, 1984. – 264 С.
- 65 Кудряшов В.В., Воронина Л.Д., М.К. Шуринова, Воронина Ю.В., Большаков В.А. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах. М.: Наука, 1979. – 196 С.

- 66 Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н., Сергеев В.С. Предупреждение взрывов пыли в угольных шахтах. М.: Недра, 1974 – 304 С.
- 67 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Использование современных технических средств пылевого контроля для производства специальной оценки условий труда. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. «Горная книга». – 2016. №4. – С. 382-387.
- 68 Романченко С.Б., Гендлер С.Г., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н. Экспериментальные и теоретические исследования динамики взрывоопасных рудничных аэрозолей. / III Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». Тезисы докладов. Санкт-Петербургский Горный Университет, 2016, С.44-45.
- 69 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Сравнительные испытания стационарных и переносных измерителей концентрации пыли. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 11 (специальный выпуск 60-2). 648 с. М.: Изд. «Горная книга». 2015. – С.392-401.
- 70 Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Аппаратный контроль индивидуальной пылевой нагрузки и пылевзрывобезопасности на высокопроизводительных предприятиях / Международная научно-практическая конференция «Горное дело в 21-м веке: технологии, наука, образование» Тезисы докладов. Санкт-Петербургский Горный Университет, 2015. – С.44-45.
- 71 Подображин С.Н. Научное обоснование и разработка методологии снижения пылевыведения при добыче угля // автореферат дис. ... доктора технических наук / Ин-т проблем комплекс. освоения недр. М.: – 2013. – 31 С.

- 72 Подображин С.Н. Повышение эффективности увлажнения угольных пластов для предотвращения пылеобразования // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 28-30.
- 73 Кудряшов В.В., Кубрин С.С., Костеренко В.Н., Терешкин А.И. Проблемы пылевого контроля в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 1. – С. 89-98.
- 74 Кудряшов В.В. Измерение массы пыли, вдыхаемой работниками в период трудового процесса // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59. – № 7. – С. 430-432.
- 75 Кудряшов В.В., Кубрин С.С., Кобылкин А.С. Опыт исследования осаждения пыли на поверхности горной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S1. – С. 275-282.
- 76 Кубрин С.С., Кудряшов В.В., Терешкин А.И. Принципы пылевого контроля в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 257-272.
- 77 Трубицына Н.В., Подображин С.Н., Ахлестин Н.Н., Спирин С.В. Обеспечение пылевзрывобезопасности угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 6-10.
- 78 Забурдяев В.С., Подображин С.Н., Скотов В.В. Шахтный метан и угольная пыль: формирование взрывоопасных ситуаций // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 42-46.
- 79 Забурдяев В.С., Подображин С.Н., Скотов В.В. Условия и причины формирования в шахтах взрывоопасных по газу и пыли ситуаций // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 3. – С. 65-68.
- 80 Трубицын А.А., Подображин С.Н., Скотов В.В., Ворошилов Я.С., Мусинов С.Н., Трубицына Д.А. Разработка системы мониторинга

интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 6-13.

- 81 Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. М.: Недра, 1992. – С. 298
- 82 Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н., Сергеев В.С. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах. М.: – Недра. – 1974. – 304 С.
- 83 Кудряшов В.В. Проблемы пылевого мониторинга в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S1. – С. 254-269.
- 84 Кудряшов В.В. Вопросы методологии оценки взрывобезопасного отложения пыли в выработках современных угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 12. – С. 39-42.
- 85 Govorukhin Yu., Krivolapov V., Paleev D., Portola V. Numerical studies of the aerodynamic features of dead-end entries with side junction // В сборнике: E3S WEB OF CONFERENCES. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. 2020. С. 01057.
- 86 Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Исследование аэродинамических особенностей тупиковых выработок, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 392-400.
- 87 Фомин А.И., Ворошилов Я.С., Палеев Д.Ю. Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ // Горная промышленность. – 2019. – № 1 (143). – С. 33.
- 88 Кобылкин С.С., Каледин О.С., Кобылкин А.С. Опыт применения вентиляционных устройств AirMover при строительстве стволов // научной школы молодых учёных и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых учёных и специалистов» 23-27

ноября 2015 г. – М.: ИПКОН РАН, 2015 – 392 с. (370-373 стр.) ISBN 978-5-9905948-6-9

- 89 Гельфанд Ф.М., Журавлев В.П., Поелуев А.П., Рыжих Л.И. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах. М.: - Недра. – 288 С.