

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)
Горный институт
Кафедра безопасности и экологии горного производства

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)»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор Кобылкин Сергей Сергеевич

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 принимаемых 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.

Условия труда рабочих, занятых подземной добычей угля, являются вредными. При этом лидирующее место по степени вредности принадлежит проходчикам и горнорабочим очистного забоя. Одним из основных вредных производственных факторов являются пылевые аэрозоли, которые приводят к росту профзаболеваемости.

Снижение запыленности рудничной атмосферы достигается путем применения локальных мероприятий, включающих различные виды пылеподавления и пылеотсос. Для проходки горных выработок сегодня применяют высокотехнологичные проходческие комплексы, которые позволяют ставить мировые рекорды по скорости проходки, что в свою очередь, приводит к образованию большего количества мелкодисперсной угольной пыли, наиболее опасной как с точки зрения профзаболеваемости, так и взрывчатости. Горнорабочие проходческих забоев чаще остальных страдают заболеваниями верхних и нижних дыхательных путей пылевой этиологии. Взрывы с участием угольной пыли приводят к тяжелым последствиям с большим числом погибших и пострадавших, порой приводящими к потере месторождений.. Таким образом, увеличение интенсивности ведения горных работ приводит к возрастанию роли пылевого фактора в обеспечении аэрологической безопасности.

Сегодня на угольных шахтах России при проходке горных выработок применяют комплекс мероприятий для снижения уровня запыленности рудничной атмосферы и пылеотложения.

Ведущую роль в них играют мероприятия по обеспыливанию рудничной атмосферы путем применения систем аспирационного обеспыливания. Но ни методическими, ни нормативными документами не регламентированы параметры работы таких систем, расчет совместной работы системы проветривания и систем пылеотсоса не проводится.

Поэтому тема диссертации, посвященная разработке способа научного обоснования оптимальных параметров аспирационного обеспыливания проходческих забоев угольных шахт, является актуальной.

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 $c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд},x}}}$ 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 Hoeke 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 ($K_{ск1}$), при достижении им значения 0,
 - критерию отсутствия рециркуляции ($K_{ск2}$) 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 $c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \frac{\Delta x}{v_{возд.х}}}$, 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 Hoeke Vent Scrubber (HCN) CFT;
3. Компьютерное численное моделирование распределения пыли в призабойном пространстве проходческих забоев, с применением системного проектирования, реализованного в ANSYS Design Xplorer;
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 встроенных 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», предложения 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 АО «СУЭК-Кузбасс» 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 11 печатных работ, из них 7 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в том числе 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, приводится обзор состояния исследований в области пылевой динамики. Отмечается, что 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. Ишук, 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. Агуа и другие авторы. Однако ряд вопросов, касающихся современных условий проходки, не нашел своего обоснования, что обусловило актуальность выбранной темы исследования. На основе выполненного обзора сформулирована цель и задачи исследований, основная идея работы. Также приведены защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор приводится динамика развития угледобывающей промышленности. 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.

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, зачастую, с потерей месторождения.

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

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.

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

Во второй главе на основе проведенного анализа применяемого комплекса мероприятий по снижению уровня запыленности рудничной атмосферы предложена классификация пылеотсасывающих установок с учетом функциональности, месторасположения их во времени и пространстве, а также принципов очистки рудничной атмосферы от пыли (табл. 1). Примеры схем по разработанной классификации приведены на рис. 1.

Проведенные натурные исследования запыленности рудничной атмосферы в проходческих забоях с учетом работы пылеотсоса, проведенные на шахтах «Им. С.М. Кирова», «Им. 7 Ноября – Новая» и «Талдинская-Западная 2», показали, что запыленность и наличие капельной жидкости наблюдаются на стороне, противоположной размещению воздуховода.

Таблица 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

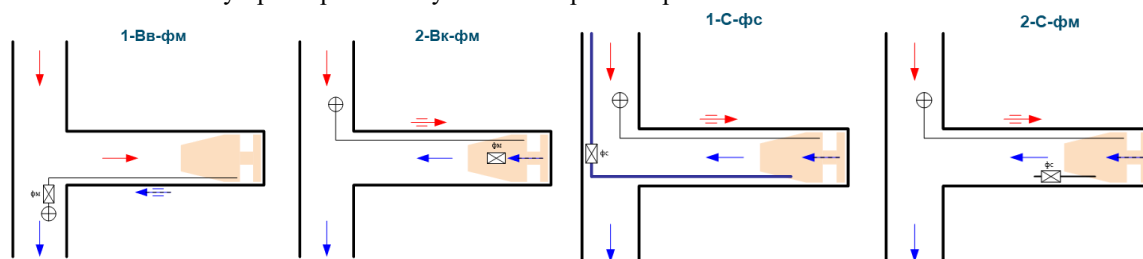


Рисунок 1 – Примеры схем по предложенной классификации

Полученные результаты по серии экспериментов (общая схема шахтного эксперимента рис. 2) по определению депрессии скрубберов показали, что в пределах погрешности средств измерений (50 Па), при проведении измерения, выполняемых через каждую минуту, производился отсчет величины депрессии развиваемой гидровентилятором ES6-150НYES6-150НУ (рис. 3). За время работы скруббера 5 минут величина депрессии возросла на 15 %, это вызвано загрязнение фильтра и, как следствие, увеличение его аэродинамического сопротивления, что может привести к выходу рабочей точки за допустимые границы безопасной и эффективной работы по аэродинамической характеристике гидровентилятора.

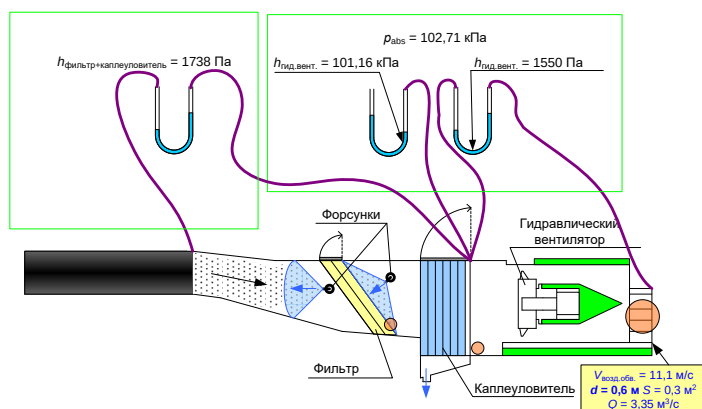


Рисунок 2 – Исследования работы скруббера (измерение депрессии и состава пыли)

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). Воздух, подающийся по гибкому ставу, разделяется на две части. Одна, отражаясь от резинового щита, поворачивает обратно в сторону, где располагается машинист горно-выемочных машин (комбайнёр). 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.

В результате проведения исследований на шахтах было отобрано 30 проб пыли, которая была рассмотрена под микроскопом с 250-кратным увеличением. 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. После каждого цикла проходки и крепления происходит осланцевание горной выработки, при включении дополнительных источников тяги и при перемещении проходческого комбайна (изменение положения относительно воздуховода изменяет аэродинамику всей призабойной части) инертная пыль, взмывает, попадает в систему пылевого контроля, искажая его показатели.

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.

Третья глава диссертационного исследования посвящена разработке нового способа проектирования вентиляции и выбора параметров аспирационных систем (пылеотсосов), встраиваемых в проходческие комбайны. Он заключается в применении компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys CFD (англ. Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидродинамика).

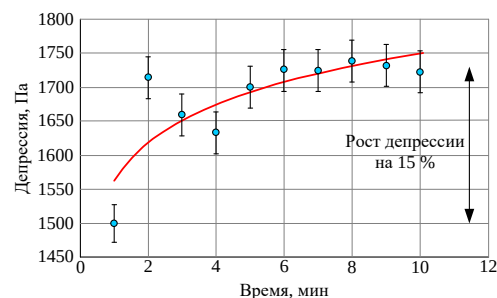


Рисунок 3 – Изменения депрессии, развиваемой гидровентилятором при работе за один цикл

Наиболее полное описание процессов распределения пыли в горной выработке при работающем скруббере происходит в нестационарной постановке решения задач. Разработана методика (табл. 2) выбора максимальной длины ребра расчетного элемента сетки (равной 0,2 м). Методика отталкивается от турбулентности потока в призабойной части и учитывает принимаемую модель турбулентности $k-\varepsilon$.

Таблица 2 – Методика определения размеров расчетной сетки

№	Описание действия	Расчетная зависимость и пример
1	Расчет числа Рейнольдса. При этом для учета локальных мест с сужением потока необходимо в расчетах использовать скорость движения воздуха и гидравлический диаметр именно этих областей	$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 0,25 \cdot 5,25}{0,0000181} = 89192,$ где ρ — плотность воздуха, кг/м³ (в расчетах принимается равной 1,23); v — скорость движения воздуха, м/с (в горной выработке по результатам натурных экспериментов она в среднем равна 0,25); d — гидравлический диаметр горной выработки, м, $d = 4S/P$; S — сечение горной выработки, м², $S = 21$; P — периметр горной выработки, м, $P = 16$, тогда $d = 4S/P = 4 \cdot 21/16 = 5,25$; μ — динамическая вязкость воздуха в горной выработке при измеренной температуре воздуха 23–25 °С, Па/с, $\mu = 0,0000181$
2	Оценка коэффициента поверхностного трения c_f	$c_f = [2 \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3} = 0,006$
3	Расчет напряжения сдвига стенки τ_w , Па	$\tau_w = 0,5 \rho v^2 c_f = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,25^2 \cdot 0,006 = 0,00023$
4	Расчет скорости трения u_τ , м/с	$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,00023}{1,23}} = 0,0137$
5	С учетом модели турбулентности определяется диапазон значения параметра y_+ . Для моделей турбулентности $k-\varepsilon$ $30 \leq y_+ \leq 300$. Принимая $y_+ = 100$, рассчитывается высота центра элемента y_p , м	$y_p = \frac{y_+ \mu}{u_\tau \rho} = \frac{100 \cdot 0,0000181}{0,0137 \cdot 1,23} = 0,1$
6	В итоге рассчитывается высота первой ячейки гексаэдра y_n , м	$y_n = 2y_p = 0,2$

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.

Научно обоснованы краевые условия и показаны параметры, которые необходимо определять на начальной стадии системного проектирования (табл. 3). 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.

Таблица 3 – Краевые условия для проведения численных расчетов

Вид граничного условия	Значение входного параметра
Вход в расчетную область (inlet)	В области входа (сечение воздуховода) задавалась скорость движения воздуха $v_{\text{вх}} = 12$ м/с
	На границе забора воздуха пылеотсасывающей установки скорость движения воздуха 11 м/с
Выход из расчетной области (outlet)	На выходной поверхности избыточное статическое давление $p_{\text{вых}} = 0$ Па
	На выходе из скруббера скорость воздуха 15 м/с
Стенка (wall)	Бортам, почве и кровле горной выработки задавались условия шероховатости поверхности 0,1 м
Плоскость поступления пыли (wall)	Плотность частицы пыли $\rho_{\text{п}} = 1400$ кг/м ³ . Молярная масса пыли равнялась стандартной величине для угля (углерод $M_{\text{C}} = 12$ г/моль). Начальная скорость вылета частиц пыли определялась по скорости вращения бара $v_{\text{п}} = 2$ м/с. Массовый расход пыли 50 кг/с. Размер пылинок от 10 до 300 мкм принимался по данным натурных измерений (перебор значений или фактическим распределением)

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, обусловливаемая 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.

В четвертой главе разработаны матрицы влияния соотношения производительности скруббера с поступающим количеством воздуха на качество пылеочистки (пример приведен в табл. 4). Матрицы позволяют определить диапазон эффективности совместной работы скруббера и режима проветривания тупиковых горных выработок.

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

Таблица 4 – 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 %

Для системного проектирования в условиях применения системы пылеудаления HCN300/1 НУ были определены влияющие параметры и их возможный диапазон (рис. 5).

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.

В заключении приведены выводы и результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования.

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)
	Радиус воздуховода	$r_{в}$, м	0,5 м	от 0,4 до 0,6 м (типоразмеры рукавов, используемые на предприятии)
	Ширина патрубка скруббера	y , м	0,65 м	можно изменить самостоятельно или по требованиям к производителю
	Высота патрубка скруббера	x , м	0,59 м	можно изменить самостоятельно или по требованиям к производителю
	Средняя скорость движения воздуха на всасе у скруббера	$v_{ск}$, м/с	11 м/с	от 8,3 до 22,2 м/с
	Средняя скорость движения воздуха из воздуховода	$v_{в}$, м/с	12 м/с	от 9,8 м/с до 12 м/с от расчетного количества по газовому фактору до максимальных значений по ВМП
	Плотность одной пылинки	$\rho_{п}$, кг/м ³	1400 кг/м ³	принимается равной плотности угля (возможно изменить на плотность вмещающих пород, подрабатываемых при проходке)
	Количество пылинок одной формы и из одного вещества	$N_{п, ск}$	100	количество пылинок, отслеживаемое в процессе расчета (принято 100 исходя из скорости расчетов)
	Радиус пылинки	$r_{п}$, м	10 мкм	от 10 мкм до 300 мкм принимается по данным натурных измерений (перебор значений или фактическим распределением)
	Молярная масса	M_c , кг/кмоль	12 кг/кмоль	стандартная величина для угля (углерод $M_c = 12$ г/моль)
	Начальная скорость вылета частиц пыли	$v_{п}$, м/с	2 м/с	определяется по скорости вращения бара
	Массовый расход пыли (Particle mass flow)	$m_{п}$, кг/с	50 кг/с	определяется по методике Колесниченко А.Е.
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	параметры проходческого забоя вентиляционной печи 24-64
	Минимальная допустимая скорость движения воздуха по выработке	$V_{г.в.min}$, м/с	0,25 м/с	0,15 – 0,25 м/с – по ФНП
	Высота местонахождения бара	z , м	от 0 до b м	от 0 до $b = 4,7$ м
	Минимальная допустимая скорость движения воздуха в призабойной части	$V_{г.в.min}$, м/с	0,5 м/с	0,5 м/с – по ФНП

Рисунок 5 – Параметры численного моделирования и их возможные диапазоны

Основные результаты отражены в следующих научных положениях:

1. Эффективность аспирационного пылеудаления при нагнетательном способе проветривания тупиковой горной выработки зависит от разработанных критериев:

- критерию очистки воздуха от пыли ($K_{ск1}$), при достижении им значения 0,
- критерию отсутствия рециркуляции ($K_{ск2}$) при достижении им значения 1.

По проведенному анализу применяемой системы аспирационного обеспыливания воздуха, были рассмотрены все возможные варианты их работы с учетом проветривания (рис. 4). Рассмотрены возможные варианты влияния работы скруббера на режим проветривания. Установлено, что есть режимы аэрологически небезопасные, при которых могут образовываться зоны рециркуляции и застойные зоны (рис. 5).

С учетом предлагаемого системного проектирования, в основу которого положено широко используемое в аэрологии горных предприятий компьютерное моделирование, необходимо совместно с общей вентиляцией проходческого участка решить задачу по выбору оптимальных критериев оценки эффективности работы систем пылеотсоса. Скруббер, забирая часть запыленной рудничной атмосферы, очищает воздух от пыли и возвращает его в горную выработку. Для оценки эффективности работы системы

пылеотсоса разработаны критерии. Первый может быть определен по формуле

$$K_{\text{ск1}} = (c_{\text{п}} - c_{\text{ск}})/c_{\text{п}},$$

где $c_{\text{п}}$ – концентрация пыли, мг/м^3 , образовавшаяся при работе исполнительного органа проходческого комбайна (бара) и поступившая в рудничную атмосферу за один цикл работы; $c_{\text{ск}}$ – концентрация пыли, мг/м^3 , которая задержана пылеотсасывающей системой.

При отсутствии или неработающем скруббере $c_{\text{ск}}$ будет равна 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, оказывается в скруббере, и воздух полностью очищается. Следовательно, критерий очистки от пыли находится в диапазоне от 0 до 1. Чем меньше значение критерия (ближе к 0), тем выше эффективность работы системы пылеотсоса.

Второй критерий может быть определен по формуле

$$K_{\text{ск2}} = Q_{\text{возд}}/(Q_{\text{ск}} + Q_{\text{г.в min}}),$$

где $Q_{\text{возд}}$ – количество воздуха, поступающее в забой, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{возд}} = v_{\text{возд}} S_{\text{возд}} = v_{\text{возд}} \pi r_{\text{возд}}^2$; $v_{\text{возд}}$ – средняя скорость движения на выходе из воздуховода, м/с ; $r_{\text{возд}}$ – радиус воздуховода, м ; $Q_{\text{ск}}$ – количество воздуха, забираемое системой пылеотсоса, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{ск}} = v_{\text{ск}} S_{\text{ск}} = v_{\text{ск}} \pi (yx)^2$; $v_{\text{ск}}$ – средняя скорость движения воздуха на всасе у скруббера); y , x – соответственно ширина и высота патрубка скруббера, м ; $Q_{\text{г.в min}}$ – минимальное количество воздуха для проветривания выработки, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{г.в min}} = v_{\text{г.в min}} S_{\text{г.в}} = v_{\text{г.в min}} (ab)^2$; $v_{\text{г.в min}}$ – минимально допустимая скорость движения воздуха, м/с ; a , b – соответственно ширина и высота горной выработки, м .

При условии, если $Q_{\text{возд}}/Q_{\text{ск}} = 1$, 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.

Если $Q_{\text{возд}}/Q_{\text{ск}} < 1$ (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.

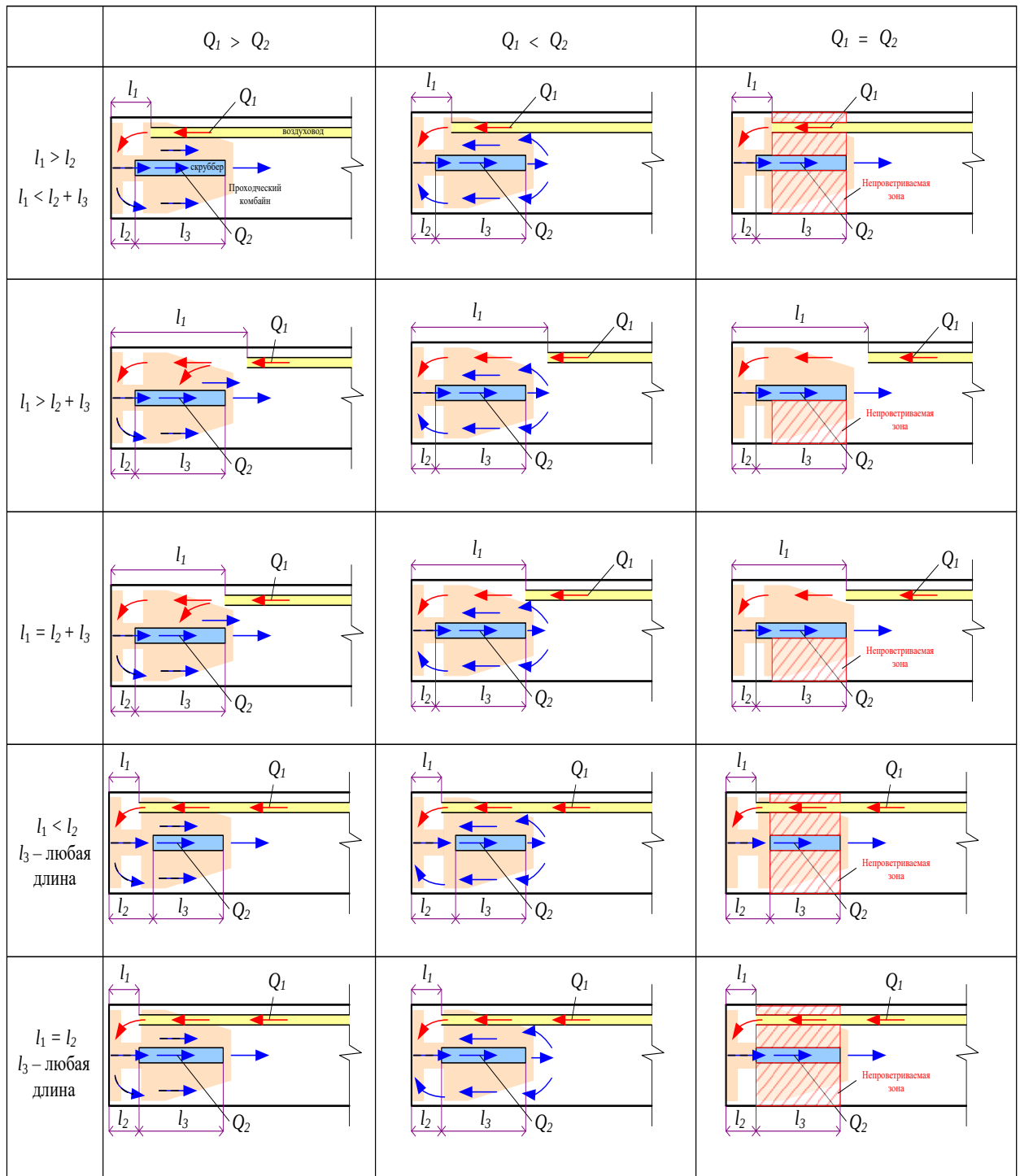


Рисунок 4 – Варианты взаимного влияния режима работы скруббера на режим проветривания проходческого забоя

Эффективность работы скруббера будет возможна только при выполнении условия $Q_{\text{возд}}/Q_{\text{ск}} > 1$ (т.е. расход скруббера меньше количества воздуха, поступающего в забой). Увеличение количества воздуха, поступающего в забой, приведет к выносу пыли и попаданию его в скруббер. Следовательно, должно быть минимальное значение разницы в поступающем в забой воздухе и забираемой системой пылеотсоса. Эта величина определяется из требований правил безопасности, по которым необходимо обеспечить движение воздуха в горной выработке с минимально

допустимой скоростью. Для газовых шахт $v_{\min \text{ газ}} > 0,5 \text{ м/с}$, для негасовых шахт $v_{\min \text{ н.газ}} > 0,25 \text{ м/с}$.

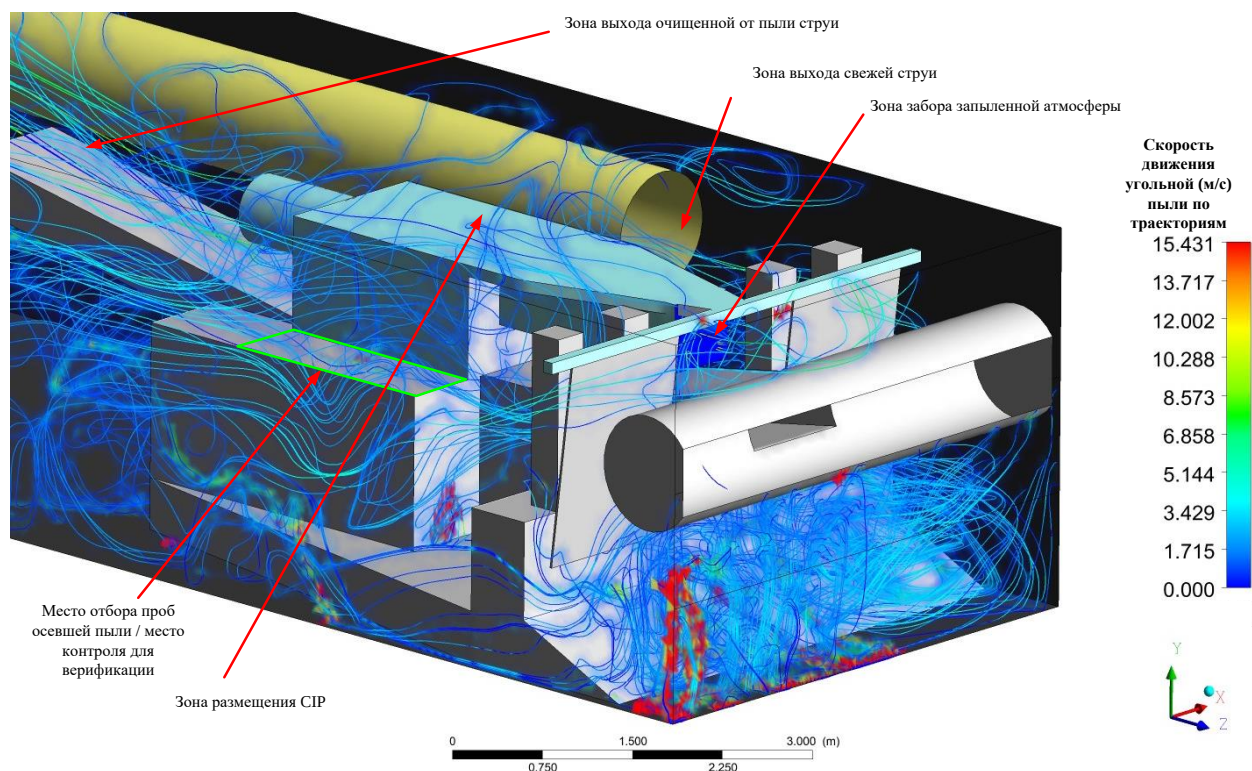


Рисунок 5 – Результаты численного стационарного расчета и контрольные зоны

2. Использование разработанного алгоритма работы искусственного интеллекта позволяет обосновать эффективные параметры аспирационного обеспыливания проходческих забоев угольных шахт.

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

Алгоритм системного проектирования совместной работы скруббера и вентиляции проходческого забоя с элементами работы искусственного интеллекта приведен на рис. 6. В его основу положено компьютерное моделирование в программном комплексе Ansys CFD

Для проведения численных расчетов достаточным является виртуальный аналог проходческого комбайна Sandvik (рис. 5), состоящий из простых фигур. Они на 90 % отражают фактическую геометрию проходческого комбайна. Как показала верификация, мелкими деталями (размер которых менее 0,05 м) при проведении расчетов можно пренебречь.

По результатам численных расчетов производилась визуальная и количественная оценка распространения пыли в призабойной части тупиковой горной выработки. Контрольные зоны выбирались с учетом необходимости верификации (рис. 5).

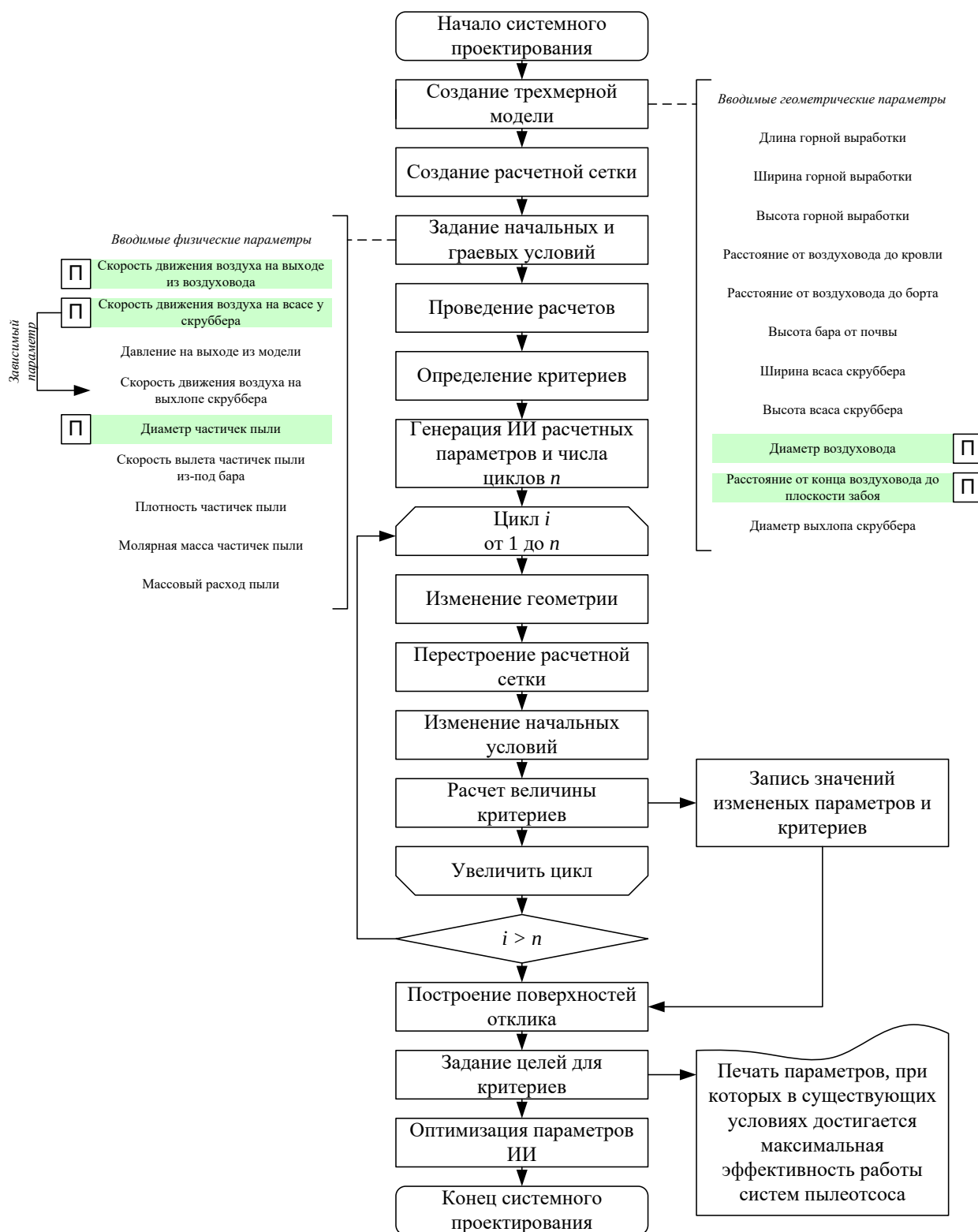


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма системного проектирования совместной работы скруббера и вентиляции проходческого забоя с элементами работы искусственного интеллекта

По траекториям движения частиц можно определить места скопления пыли, отложения и выноса угольной пыли. По областям («тумановая» область) определяются места. 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, при проектировании мероприятий, можно будет сделать вывод о месте контроля пылеотложения и запыленности рудничной атмосферы призабойной части горной выработки при ее проходке.

Анализ результатов численного моделирования распределения пыли различного диаметра показал о том, что пыль с диаметром 10 мкм витает во всем призабойном пространстве горных выработок. Пыль с диаметром 50 мкм ведет себя аналогично мелкой 10 мкм пыли. Траектория полета частиц пыли совпадает с изолиниями воздушного потока, которые огибают горное оборудование и отражаются от элементов защиты проходческого комбайна. Крупная пыль (от 50 до 300 мкм) оседает на всех поверхностях горного оборудования и выработок, а также засасывается в скруббер.

В основу работы искусственного интеллекта положен параметрический анализ, реализованный модулем Ansys DesignXplorer, базирующийся на методе поверхности отклика (RSM). Суть предлагаемого способа заключается в следующем:

- при разработке трехмерной компьютерной модели влияющие факторы (диаметр воздуховода, отставание его от плоскости забоя) задаются как параметры (т.е. величины, которые можно изменять в процессе проектирования);
- 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);
- после проверки расчета по критериям сходимости невязок и верификации подключается модуль Ansys DesignXplorer, реализующий работу искусственного интеллекта.

Автоматически программа генерирует совокупность различных сочетаний влияющих факторов в заданном проектировщиком диапазоне. По этим данным рассчитываются значения критериев эффективной и безопасной работы скруббера с учетом системы проветривания. По полученным данным строятся поверхности откликов путем аппроксимации полученных значений. В алгоритме просчитывается 1 тыс. вариантов для выбора одного, при котором значения критериев максимально близки к требуемым.

В результате выполненных работ для системы пылеотсоса HCN300/1 НУ, встраиваемой в проходческий комбайн Sandvik, получены оптимальные скорость движения воздуха (22 м/с), радиус воздуховода (0,6 м) и расстояние от конца воздуховода до плоскости забоя (5 м).

3. Коэффициент снижения уровня запыленности (k_v) в уравнении М.И. Нецепляева
$$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + k_v \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд}, x}}},$$
 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;

Для расчета распределения концентрации пыли вдоль выработок при проектировании новых проходческих участков применяют различные эмпирические зависимости. Одна из таких формул получена М.И. Нецепляевым

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

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.

При проведении серии шахтных экспериментов (23 проходческих забоя на 8 шахтах Кузнецкого угольного бассейна) в условиях использования различных способов обеспыливания (орошения и пылеотсоса) был определен эмпирический коэффициент. Условия эксперимента во всех случаях одинаково выдерживались. Скорость воздуха в проходческих забоях шахт находится в диапазоне 0,25 м/с ÷ 0,5 м/с. Длина контрольного участка равнялась 50 м от плоскости проходческого забоя.

Среднее по всем экспериментальным данным (табл. 2) значение k_v равно 0,01041, поэтому для расчетов уравнение (1) предлагается модифицировать к виду

$$c(x, v_x) = \frac{c_0}{1 + 0,01041 \cdot \frac{\Delta x}{v_{\text{возд.х}}}}. \quad (2)$$

Данное уравнение с экспериментально полученной величиной коэффициента k_v может быть использовано в качестве базовой зависимости при сопоставлении распределения концентрации пыли в выработках при применении и без применения систем пылеотсоса в последующих работах.

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 $k_v = 0,01041$ для расчета распределения концентрации пыли вдоль выработок в условиях использования различных способов обеспыливания (орошения, пылеотсоса) для формулы

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

6. 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.
7. 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.
8. Рассмотрены возможные варианты влияния работы скруббера на режим проветривания. Установлено, что существуют режимы аэрологически небезопасные, при которых могут образовываться зоны рециркуляции и застойные зоны.
9. Разработаны критерии эффективности систем пылеотсоса с учетом системы проветривания проходческого забоя, которые могут быть использованы как при обычном проектировании, так и при системном.
10. 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.

11. 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:

Публикации в международной базе цитирования Scopus:

- 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)**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

- 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. – 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). – 2015. – С.392-401. **(индексируется в базе данных ВАК)**

- 7 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)
- 8 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)

Монографии:

- 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 Костогрызов 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.

В прочих изданиях:

- 11 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.

Личный вклад соискателя. Основные положения диссертации получены лично автором. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора заключается в следующем: анализ применяемых систем обеспыливания воздуха в проходческих забоях угольных шахт, разработка методических положений исследования, исследование состояния применяемых систем аспирационного пылеудаления, разработка критериев эффективности применения пылеотсосов, разработка компьютерных моделей процесса проветривания тупиковых горных выработок в которых применяются встраиваемые в проходческие комбайны скрубберы, предложена система искусственного интеллекта для выбора оптимальных режимов работы пылеотсосов, получен коэффициент снижения уровня запыленности (k_v) в уравнении М.И. Нецепляева для условий угольных шахт Кузнецкого бассейна.