

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский технологический
университет МИСИС (НИТУ МИСИС)

СЕНАТОРОВ Владимир Александрович

**Определение расхода воздуха для проветривания
высокопроизводительных подземных рудников на основе
оперативной оценки фактической газовой ДВС**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор Каледина Нина Олеговна

Москва, 2026

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Развитие и рост производительности труда в горнорудной промышленности России обусловлены, в том числе, применением мощной мобильной техники. При этом использование машин с двигателем внутреннего сгорания (далее ДВС) является приоритетным направлением.

Современные высокопроизводительные рудники отличаются не только усложнением геологических и гидрогеологических условий разработки месторождений, связанным с ведением работ на глубоких горизонтах, но и использованием высокопроизводительного мощного дизельного самоходного и добычного оборудования, что приводит к увеличению нагрузки на вентиляционную сеть. Существующие вентиляционные сети рудников, зачастую, имеющие сложную топологию, не могут обеспечить необходимые расчетные значения требуемого количества воздуха по действующим нормативам, морально устаревшим еще в прошлом веке. При этом скорость движения воздуха по горным выработкам приближается к максимально допустимой.

В сложных условиях современных рудников задача обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха и рационального распределения его в вентиляционной сети должна базироваться на новых методах расчетов необходимого количества воздуха, адекватно учитывающих сложившиеся условия поступления и разбавления вредных веществ, выделяющихся в рудничную атмосферу.

Нормативно-методическая база проектирования вентиляции угольных шахт и высокопроизводительных рудников, использующих мощные машины с двигателями внутреннего сгорания, на сегодняшний день морально устарела, поскольку норма расхода воздуха, установленная почти 100 лет назад на единицу мощности двигателя, с тех пор не менялась, тогда как мощности оборудования и качество дизельных двигателей, в том числе и по степени очистки выхлопных газов, - существенно изменились. Действующие методики не отвечают условиям современных горных предприятий, поэтому многие из них вынуждены заказывать научное сопровождение вентиляционных расчетов, что каждый раз требует проведения локальных исследований и согласования результатов с органами надзора. Это обстоятельство снижает качество проектов, замедляет процесс текущего планирования развития горных работ и в результате ухудшает состояние проветривания рудников. В связи с изложенным, исследования, посвященные разработке метода расчета воздуха,

отвечающего требованиям обеспечения безопасности состояния рудничной атмосферы и энергосбережения в современных условиях эксплуатации дизельного оборудования высокопроизводительных рудников, являются актуальными.

Цель работы: разработать научное обоснование нового методического подхода к расчёту расхода воздуха, требуемого для проветривания горных выработок при работе в них горного оборудования с ДВС большой мощности.

Идея работы заключается в определении требуемого расхода воздуха с учетом изменения состояния атмосферы в горных выработках при движении в них машин с ДВС на основе оперативной оценки фактического объема и состава выхлопных газов (далее - фактической газовой двигателей).

Объект исследования: высокопроизводительные глубокие рудники, использующие оборудование с ДВС

Предмет исследования: изменения параметров состояния воздуха рабочей зоны в горных выработках при работе в них дизельного оборудования.

Основные задачи исследования:

1. Анализ методов расчета расхода воздуха для горных выработок, в которых используется оборудование с ДВС.
2. Анализ методов и способов определения фактической газовой ДВС.
3. Установление **факторов, влияющих на распространение** выхлопных газов - динамики их объемов и концентраций, - в процессе эксплуатации оборудования с ДВС в горных выработках высокопроизводительных подземных рудников.
4. Анализ теоретических описаний процесса диффузии выхлопных газов в подземных горных выработках для установления основных параметров, определяющих закономерности их переноса.
5. Разработка математических моделей для исследования закономерностей переноса выхлопных газов в горных выработках при движении оборудования с ДВС.
6. Разработка методики оперативной оценки фактической газовой оборудования с ДВС в условиях его эксплуатации.
7. Разработка методического подхода к расчету требуемого расхода воздуха для проветривания рудников, в которых эксплуатируются ДВС, и рекомендаций по его реализации.

Основные защищаемые положения:

1. Объемы выделения выхлопных газов зависят от типа машины, ее технического состояния и условий эксплуатации, поэтому норма удельного расхода воздуха на единицу мощности не может быть единой для всей горнорудной промышленности, а должна устанавливаться дифференцированно для каждого действующего рудника с учетом состояния техники.

2. Основными факторами, определяющими газовость двигателей, при эксплуатации мобильного оборудования в условиях высокопроизводительного подземного рудника являются: техническое состояние используемой техники в части систем впрыска топлива и отходящих газов (по результатам экспресс-анализов основных показателей на выхлопе), качество используемого топлива, наличие присадок к топливу (мочевина) и специальных добавок в системе движения вредных газов до катализатора.

3. Определение необходимого расхода воздуха следует производить с учетом установленных закономерностей переноса выхлопных газов в вентиляционной сети рудника в зависимости от факторов, отражающих характеристики имеющихся источников выделения выхлопных газов и условий их эксплуатации: коэффициентов диффузии выхлопных газов в горных выработках, фактической газовости ДВС, а также топологии (структуры) ШВС и парка используемого оборудования.

4. Оценку фактической газовости автомобильного парка следует осуществлять в условиях его эксплуатации **с учетом установленного влияния определяющих факторов на основе предложенной методики.**

Научная новизна:

1. Установлен комплекс индикаторных показателей, определяющих динамику объемов выделения и концентраций выхлопных газов дизельного оборудования в вентиляционной сети высокопроизводительного подземного рудника, учитывающий режим движения машин и условия их эксплуатации, использование которого позволяет оперативно оценить фактическую газовость дизельного оборудования для расчета расхода воздуха и обеспечить санитарно-гигиенические требования к составу воздуха рабочей зоны по фактору «выхлопные газы».

2. Обоснован новый методический подход к проектированию вентиляции высокопроизводительного рудника, использующего оборудование с ДВС, включающий алгоритм расчета необходимого расхода воздуха с использованием

оперативной оценки фактической газовости машин, позволяющий снизить риски загазований атмосферы при оптимизации энергозатрат на проветривание.

3. Разработано научное обоснование алгоритма определения фактической газовости парка автомобилей с ДВС для подземного рудника в условиях его эксплуатации.

4. Разработана методика экспресс-оценки параметров загрязнения рудничной атмосферы выхлопными газами ДВС: состава и температуры выхлопных газов, избытка воздуха и дымности двигателя, а также сажевого числа.

Методы исследований:

При решении поставленных задач были использованы следующие методы: анализ состояния исследований по теме на основе обзора опубликованных результатов; компьютерное 3D-моделирование в программном комплексе Ansys (CFD и Fluent); анализ и обобщение результатов математического моделирования; шахтные эксперименты и натурные измерения; обработка результатов наблюдений и данных дистанционного контроля многофункциональных систем обеспечения безопасности методами математической статистики.

Достоверность научных положений подтверждается: значительным объемом шахтных экспериментальных исследований (в период с 2021 по 2025 годы проведено обследование более 100 типов различной самоходной техники, использующейся и вновь поступавшей на подземном руднике ООО «Яковлевский ГОК», также отдельные исследования проводились на АО «Урупский ГОК» и АО «Комбинат КМАруда»); большим объемом данных компьютерного моделирования процессов диффузии выхлопных газов в горных выработках (моделирование реализовано в программном комплексе Ansys CFD в объеме 20 сценариев); повторяемостью установленных закономерностей в исследованных условиях; успешным внедрением результатов исследований в нормативную базу и их практической апробацией.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

разработана методика расчета количества воздуха, необходимого для проветривания выработок с работающими машинами ДВС; разработаны формы чек-листов по экспресс-диагностике и определению неисправной техники; определен порядок плановой диагностики состояния парка машин по фактической газовости; внедрение разработанной методики обеспечило повышение эффективности вентиляции рудника – снижение рисков загазований выработок, - за счет обеспечения рабочих зон

необходимым расходом воздуха при его рациональном распределении без увеличения производительности вентиляторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Безопасность и экология горного производства» Горного института НИТУ МИСИС, совещаниях и научно-практических конференциях: Всероссийское совещание руководителей служб воздушно-депресссионных съемок ФГУП «ВГСЧ» МЧС России совместно с ведущими специалистами в области аэрологии горных предприятий НИИ и вузов. Новокузнецк (2023); VIII научно-практическая конференция Промышленно-металлургического холдинга. Секция «Охрана труда, промышленная безопасность, экология и менеджмент, управление». Москва, Кемерово, Губкин (2023); Конференция "Промышленная безопасность и охрана труда", СПГУ, С-Петербург (2023); Научно-практическая конференция «Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела. Внедрение новых методов расчета расхода воздуха для подземного рудника, использующего высокопроизводительное оборудование с ДВС», Москва, Инженерная академия РУДН (2023); XXI всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Секция 2. Горное дело. СТИ НИТУ МИСИС Старый Оскол (2024); Международный научный симпозиум «Неделя горняка» НИТУ МИСИС г. Москва (2023, 2024, 2025).

Реализация результатов работы «Методика расчета воздуха для проветривания рудника подземного» внедрена Яковлевским ГОК в Регламент технологических производственных процессов «Проветривание горных выработок», утвержденный приказом ОРД-П-/0302-23-000468 от 29.06.2023 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; обобщении и анализе данных; обосновании направлений и методов решения поставленных задач; проведении натурных измерений, а также численного компьютерного моделирования; апробации методики на горном предприятии при проведении воздушно-депресссионной съемки; определении фактической газовости рабочего парка техники и новых поступлений оборудования рудников; анализе состояния вентиляционной сети после внедрения разработанной методики и осуществлении авторского надзора; подготовке публикаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по специальности, из них 2 статьи опубликованы в журналах, зарегистрированных в базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 223 страницах машинописного текста, содержит 26 таблиц и 97 рисунков. Библиография включает 124 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность поставленной научной задачи; сформулированы цель и основные этапы (задачи) исследования, основные научные положения диссертации; определены научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе описывается современное состояние исследований в области проветривания шахт и рудников, приведен обзор научно-технической литературы по определению требуемого расхода воздуха для горных выработок, использующих оборудование с ДВС, определены цели и задачи исследований.

Значительный вклад в исследования вопросов проектирования вентиляции горных предприятий внесли выдающиеся отечественные ученые: академик А. А. Скочинский, член. корр. РАН Левин Л. Ю., член. корр. РАН Пучков Л. А., Ушаков К. З., Ксенофонтова А.И., Воронин Н.В., Гендлер С. Г., Зайцев А.В., Каледина Н.О., Качурин Н.М., Клебанов Ф.С., Козырев С.А., Колесниченко Е.А., Кобылкин С.С., Красноштейн А.Е., Матвиенко Н. Г., Медведев И.И., Мохирев Н.Н., Мясников А.А., Палеев Д.Ю., Патрушев М.И., Семин М.А., Сергеев И.В., Скопинцева О.В., Устинов Н.И., Файнбург Г.З. и многие другие, а также зарубежные исследователи К. Noack, Н. Janas (Германия), S.P. Banerjee, G.S. Marwaha (Индия), D. Cwiklinski, J-P. Josian (Франция) и другие авторы.

В настоящее время расчет воздуха для выработок, в которых используются машины с ДВС, рекомендовано осуществлять по норме удельного расхода воздуха на единицу мощности двигателя, установленной Госгортехнадзором СССР в 30-х годах прошлого столетия, затем неоднократно подтверждаемой новыми нормативными документами (последний раз в 1983 г.). За истекший период конструкции самоходных машин с ДВС и используемое дизельное топливо претерпели существенные качественные изменения, и количество вредных компонентов в выхлопе ДВС

значительно снизилось, что привело к многочисленным попыткам научного обоснования снижения этой нормы.

Установлено, что практически все авторы, занимавшиеся вопросами расчета расхода воздуха для горных выработок, в которых используется оборудование с ДВС, считают необходимым для теоретических и практических целей определять фактические объемы выделения и состав выхлопных газов (фактическую газовость ДВС), но методики, позволяющей с достаточной степенью точности определять этот показатель, не разработано. Сложность заключается не только в том, что парк используемого оборудования постоянно расширяется, появляются новые модели, но и в существенном влиянии на показатели газовости ДВС условий эксплуатации (состояния производственной среды) и технического состояния оборудования. Поэтому определение данного показателя в условиях разнообразия парка применяемых машин явилось базовой задачей, которая легла в основу разработки методики расчета необходимого расхода воздуха.

Исходя из выполненного анализа выделены основные требования к методикам расчета по фактору «вредные газы от дизельного оборудования», которые следует учитывать при определении расхода воздуха: топологические и технологические характеристики выработок; динамику работы дизельного двигателя, обусловленную характером работы и выполняемыми операциями; характер перемещения дизельного оборудования в горных выработках; разбавление и вынос вредных примесей турбулентным воздушным потоком; дифференцированное использование параметров газовости, изменяющихся от внешних условий и технического состояния двигателей; определения фактической газовости в реальных условиях эксплуатации дизельного оборудования; удобство использования при расчетах вентиляции на стадии проектирования и в реальных условиях эксплуатации дизельного оборудования.

Во второй главе приведен анализ теоретических описаний процесса диффузии выхлопных газов в подземных горных выработках, необходимый для установления основных параметров, определяющих закономерности переноса газов в выработках в динамической постановке задачи. На основе выполненного анализа выбрана методика проведения исследований, включающая полевые исследования изучаемого процесса с последующим компьютерным моделированием, и разработаны математические модели для выявления закономерностей переноса выхлопных газов (динамика объема и концентрации газов) в горных выработках при движении автомобилей с ДВС.

Основными геометрическими элементами модели, определяющими аэродинамику и процесс задымления, являются модели горных выработок и горного оборудования. Математическая модель реализована в комплексе Ansys CFD. В рабочей среде Workbench были созданы трехмерные модели горных выработок с техникой, применяемой на руднике (Normet Multimec SF 060 (213), Sandvik DD 311 (508)).

В основе описания процессов переноса - уравнения количества движения (в форме уравнений Навье-Стокса), неразрывности, сохранения энергии, а также физические модели турбулентности. Для экономии вычислительных мощностей использована стандартная k - ϵ модель турбулентности. Скорость и масштаб длины определяются из отдельных уравнений переноса: турбулентная кинетическая энергия, k , и диссипация турбулентных вихрей, ϵ , - которые задаются в краевых условиях.

Начальные и граничные условия трехмерного моделирования были получены из результатов натурных экспериментов. Средняя скорость движения воздуха в выработке принята 0,2 м/с; температура воздуха +26 °C; температура двигателя автомобиля +75 °C. Из выхлопной трубы газ выходит со скоростью 30 м/с при температуре 260 °C. Объемная доля угарного газа CO составляет 84 ppm, оксида азота NO – 90 ppm.

Трехмерная модель выработки разбивалась на элементарные объемы, представленные тетраэдрами для автоматической генерации со сгущением в местах сужения. В используемой модели принята сетка с элементом 0,2 м, на поверхностях с одним из линейных параметров меньше 0,1 м делалось сгущение сетки так, чтобы на данной линии было минимум 5 узлов. Общее количество элементов равно 4032002, количество узлов – 1378165.

Использование этой модели для определения влияния направления движения машины относительно вектора скорости воздушного потока показало ее адекватность и работоспособность, т. е. подтвердило возможность использования ее для решения поставленных задач исследований.

В третьей главе приведены результаты натурных (полевых) исследований параметров переноса выхлопных газов от машин с ДВС с учетом различной топологии горных выработок, количества и типов работающих машин. На рисунке 1 показан совмещенный график изменения концентраций компонентов выхлопных газов и их температуры в привязке к технологическим процессам.

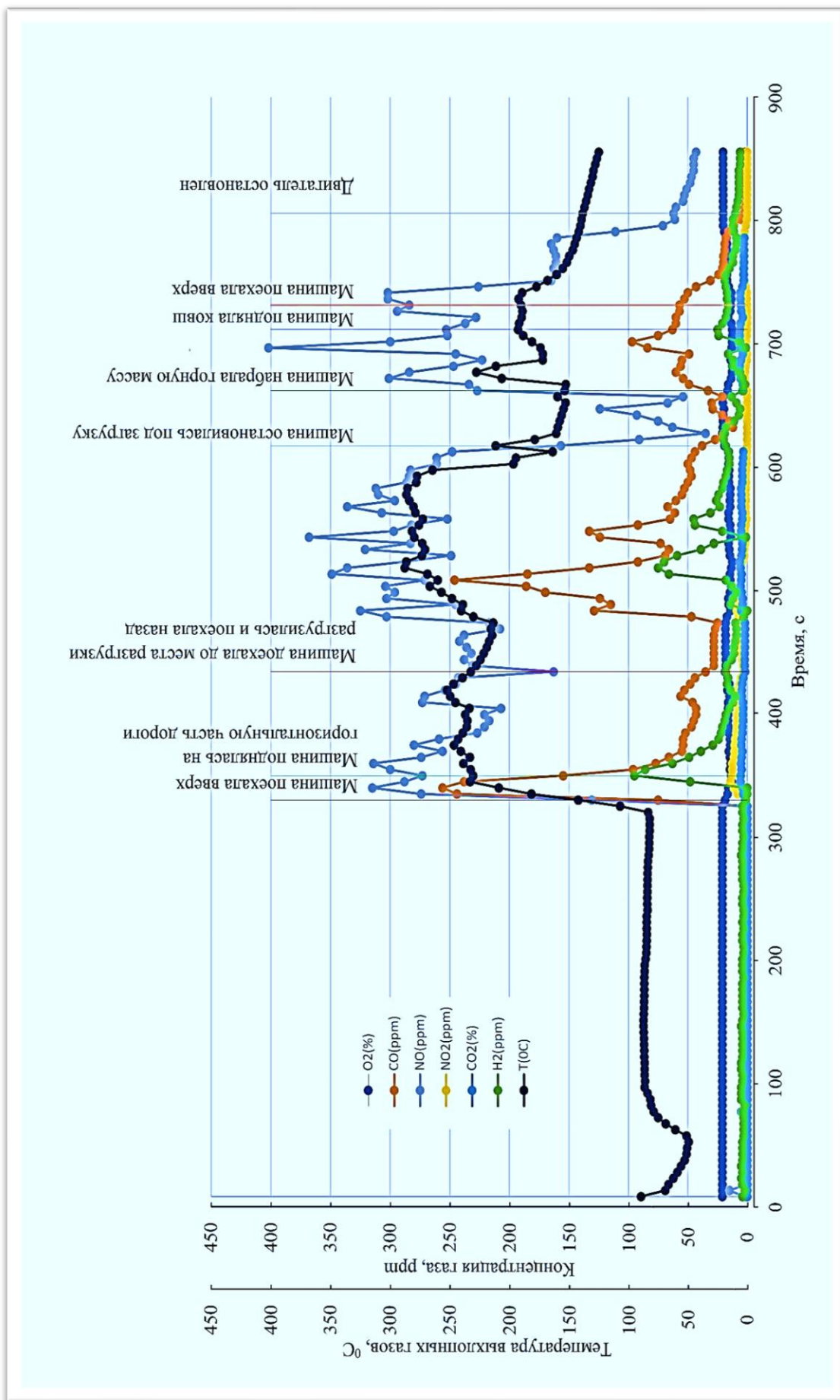


Рисунок 1 - Совмещённый график изменения концентраций компонентов выхлопных газов и их температуры при работе ПДМ ЛН-310 в привязке к технологическим процессам

Методика проведения натурных экспериментов по определению фактической газовойности оборудования ДВС предусматривает использование многоканальных газоанализаторов, предназначенных для измерений концентраций веществ, содержащихся в выхлопных газах (далее ВГ). В зависимости от поставленных исследовательских задач эксперименты проводились с использованием различного оборудования: Testo 350-XL, многофункциональные газоанализаторы для экологических и технических измерений MRU NOVA Plus, MRU Vario Plus Industrial, MRU Optima 7. Максимально допустимая температура измерения равна 500 °С. Станции измеряют все параметры, необходимые для контроля процессов горения топлива (например, концентрации O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂, H₂S, H₂). Регистратор в зависимости от подключенных зондов (до 4-х зондов одновременно) может измерять и записывать значения температуры, относительной влажности, скорости потока воздуха/ВГ, дифференциального давления и др.

По результатам измерений фактического газовыделения от самоходного оборудования, работающего на дизельном топливе, установлено следующее: для каждого типа машин характерны свои значения газовыделения, при этом даже для одного типа машин значения концентрации вредных газов могут отличаться, и не всегда более мощные двигатели выделяют больше вредных газов; факторы, влияющие на количественные показатели выхлопных газов (далее ВГ), зависят от качества топлива, газового состава, термовлажностных показателей атмосферы горных выработок, абсолютного давления и технического состояния машины; наибольшее количество вредностей дают машины большой мощности, работающие в постоянном режиме – это погрузочно-доставочные машины (далее ПДМ) и шахтные самосвалы (далее ШС). На основе данных результатов сформулировано **первое научное положение**.

В четвертой главе приведены результаты математического моделирования процессов переноса выхлопных газов в горных выработках при работе в них машин с ДВС. В качестве начальных и граничных условий при компьютерном моделировании использовались параметры выхлопных газов (концентрации CO и NO_x, средняя температура и средняя скорость истечения, м/с), установленные экспериментально (полевым методом). Моделировались возможные сценарии влияния режима движения воздуха на распространение вредных газов (всего 20 сценариев), в которых варьировались тип машины, скорость движения воздуха на входе в модель, м/с;

направление движения воздуха относительно направления движения техники, режим работы (стоит, движется горизонтально или вверх), угол наклона выработки (рисунок 2). Динамическое моделирование позволило оценить временные параметры распределения выхлопных газов, визуализировать аэродинамику газоздушного потока и оценить параметры диффузии газов в горной выработке. Для моделирования была выбрана ПДМ LH-310 и горная выработка шириной 5,3 м и высотой 4,2 м.

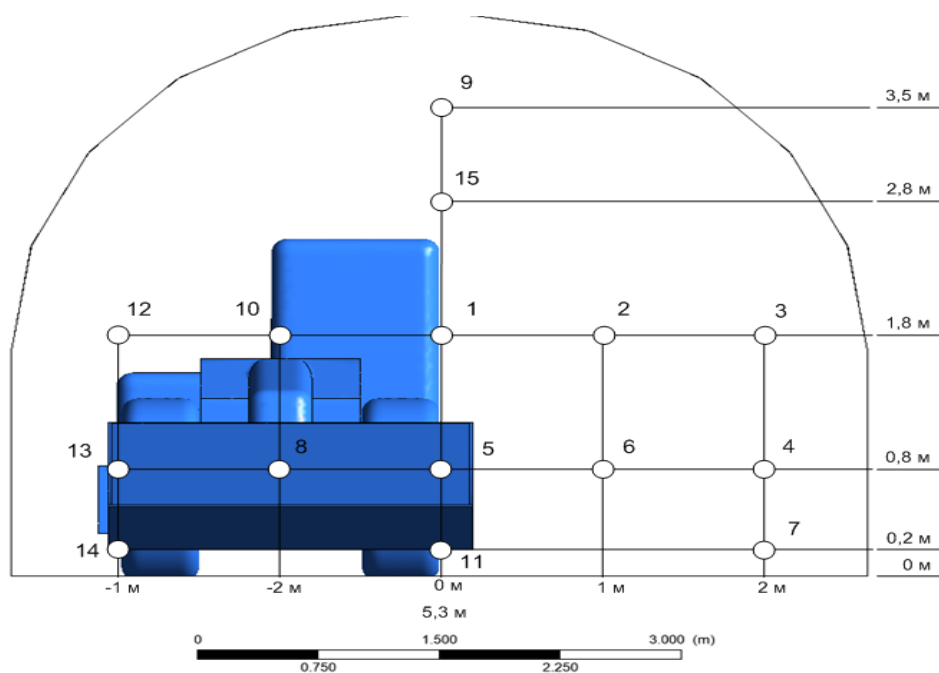
Визуализация результатов моделирования представлена в приложении к диссертации. На рисунке 3 приведен пример для варианта единовременной работы нескольких машин с ДВС в разных заходках на одном добычном участке (блоке) при выдаче исходящей струи воздуха на общую вентиляционную горную выработку. В сечении горной выработки на расстоянии 25 метров, по направлению движению потока воздуха, содержание СО составило 3.23121×10^{-6} % об.д., NO – 1.68875×10^{-5} % об.д., T – 298, 355 [K] (25, 355°C).

Полученные результаты позволили сформулировать **второе научное положение**.

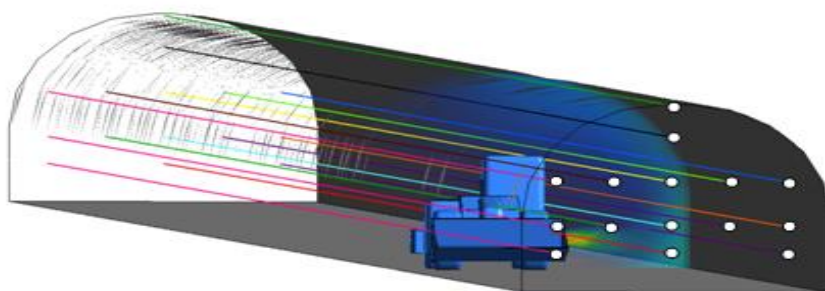
Результаты моделирования показали, что наблюдаются следующие общие закономерности динамики распределения выхлопных газов по объему горной выработки независимо от типа применяемой горной техники: объем выделения ВГ в значительной степени зависит от режима работы машины, скорости ее движения и уклона горной выработки; на распределение концентраций существенное влияние оказывает направление движения техники относительно вектора скорости воздушного потока (минимальное загрязнение воздуха в зоне дыхания машиниста имеет место при встречном движении, наибольшее – при спутном со скоростью, близкой к скорости движения воздуха); при прочих равных условиях наиболее существенное влияние на распределение газов в объеме горной выработки оказывает место расположения выхлопной трубы как источника газовой выделения; максимальная концентрация выхлопных газов находится вблизи выходного отверстия выхлопной трубы; в процессе работы машин с ДВС поле концентраций выхлопных газов со временем выравнивается на расстоянии около 100 м от источника загрязнений; при увеличении скорости движения воздуха (и, как следствие, его расхода), время разбавления выхлопных газов существенно снижается; при единовременной работе нескольких машин на одном добычном участке (блоке) и выдаче исходящей струи воздуха на общую вентиляционную выработку (последовательное проветривание) происходит суммирование объемов ВГ, происходит накопление вредных примесей и их дальнейшее

разбавление происходит медленнее; коэффициент диффузионного осреднения газовой смеси учитывает влияние продолжительности работы дизельной машины в режиме максимальной газовой смеси и интенсивности диффузионного перемешивания газов в воздушном потоке, что позволяет использовать его для определения фактической газовой смеси оборудования в динамическом режиме применительно к условиям каждого действующего подземного рудника.

а)



б)



в)



Рисунок 2 – Распределение выхлопных газов по горной выработке:
а) фронтальный вид модели, б) трехмерный вид с обозначенными линиями, по которым строятся графики концентрация, в) вид сбоку.

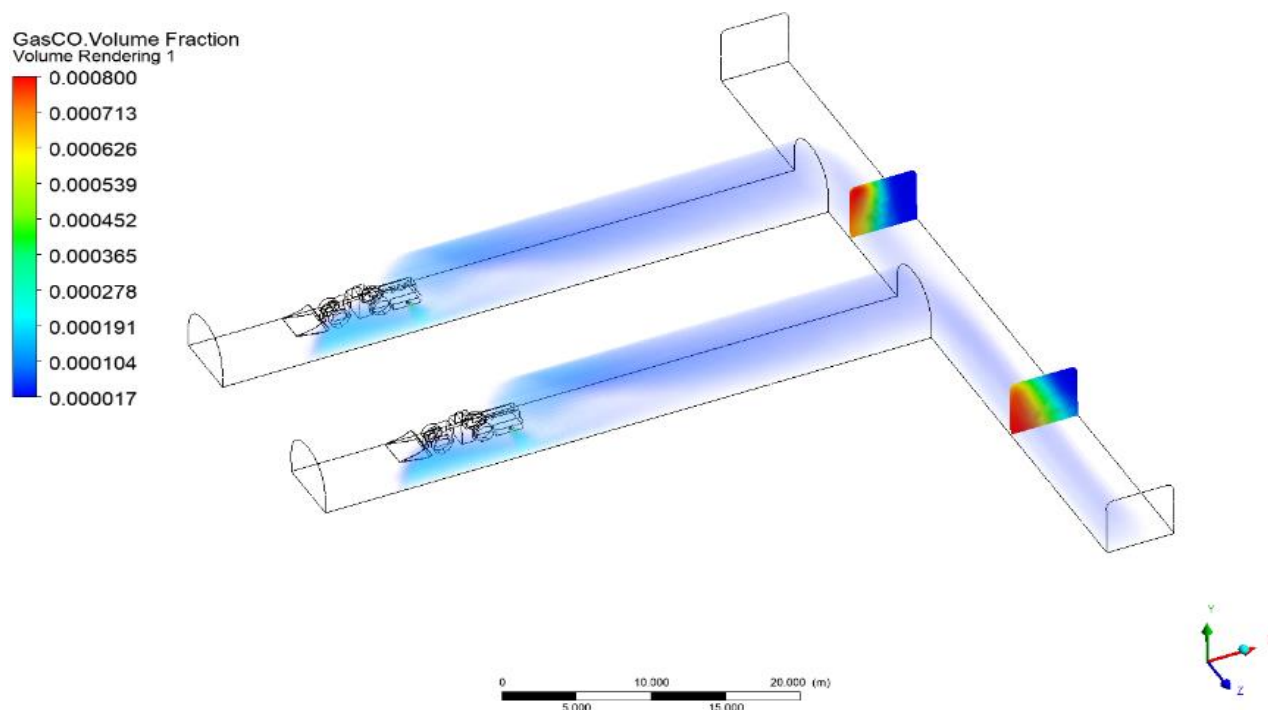


Рисунок 3 – Распределение выхлопных газов (CO) с учетом работы в двух заходках в блоке

Ориентируясь на фактическую газовость в стационарном режиме, можно определить норматив подачи свежего воздуха при работе машин с ДВС по мощности двигателя с учетом типа машин с ДВС и условий их эксплуатации на каждом руднике. По фактической величине выхлопа (как функции фактического максимального потребления топлива) и концентрации всех ядовитых газов в нем можно определить загрязняющий фактор работы машин с ДВС и рассчитать количество воздуха, необходимого для разбавления ядовитых газов до ПДК.

Проведенные исследования фактической газовости для различных типов оборудования показали, что состояние двигателя существенно зависит от условий работы машины, которые для подземных горных предприятий постоянно изменяются, поэтому оценку данного показателя следует проводить в оперативном режиме с учетом изменения состояния техники в процессе эксплуатации с периодической корректировкой требуемых расходов воздуха для обеспечения нормативных значений концентраций вредных газов (**третье научное положение**).

В пятой главе приведено обоснование метода расчета расхода воздуха для рудника на основе нормативов, определяемых в оперативном режиме с учетом фактической газовости парка дизельного оборудования и разработаны рекомендации по внедрению ее оперативной оценки.

Расчет расхода воздуха производится на суммарный объем выхлопных газов от всех дизельных машин, одновременно работающих в горных выработках рудника, с учетом их распределения по выемочным блокам и горизонтам. Количество свежего воздуха, подаваемого в выработки рабочих зон дизельного оборудования, должно обеспечивать статическое разжижение основных ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2) до предельно допустимых концентраций или обеспечения нормативного содержания кислорода и определяется по формуле

$$Q_{\text{ДВС}} = k_{\text{од}} \cdot \sum (k_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{м}}), \quad (1)$$

где $k_{\text{од}}$ – коэффициент одновременности работы машин с ДВС в отдельной выработке; $k_{\text{од}} = 1,0; 0,9; 0,85$ при одновременной работе одной, двух, трех и более машин соответственно; $k_{\text{ц}}$ – коэффициент цикличности работы машины с ДВС, принимается в зависимости от процентного соотношения времени нахождения машины с ДВС в горной выработке, для которой производится расчет, ко времени цикла ее работы, изменяется в пределах от 0,1 до 1; $Q_{\text{м}}$ – количество воздуха, необходимое для проветривания каждой машины по вредным факторам ДВС, $\text{м}^3/\text{с}$.

Расчет коэффициента цикличности принят по методике УрО РАН (Кашников А.В., Левин Л.Ю., 2017) по формуле:

$$k_{\text{ц}} = \frac{t}{t_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где $t, t_{\text{ц}}$ – соответственно время работы машины в выработке и время цикла работы машины мин; определяется с учетом времени, затрачиваемого на операции погрузки-разгрузки, выполнение вспомогательных операций, ожидания транспортирующего средства, время в пути порожняком в выработке и за ее пределами, время пути груженой машины по выработке и за ее пределами, скорость движения машины порожняком и груженой, $\text{м}/\text{мин}$.

Коэффициент цикличности можно связать с показателями фактической газовой в динамическом режиме по методике определения фактической газовой, учитывая динамические газовые показатели с максимальными значениями по режимам работы двигателя и усредняя их для удобного использования с поправками от коэффициента избытка воздуха и сажевого числа. Расчет необходимого количества воздуха $Q_{\text{м}}$ производится отдельно для каждого нормируемого компонента выхлопных

газов (при максимально возможных оборотах двигателя), и для кислорода, принимается наибольшее из полученных значений; при этом величина удельного расхода воздуха $q_{\text{лс}}$ должна быть не менее 1,5 м³/мин на 1 л.с. Расход воздуха по компонентам выхлопных газов

$$Q_M = \frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{пдк}}} \cdot g_{\text{вых}}, \quad (3)$$

где $c_{\text{вых}}$ – фактическая концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO₂), % по объему; $c_{\text{пдк}}$ – предельно-допустимая концентрация по соответствующему компоненту, % по объему; $g_{\text{вых}}$ – фактическая газовость определяемая по разработанной методике, м³/с;

Результаты расчета необходимого удельного расхода воздуха с учетом определения концентрации и дебита выхлопных газов от ПДМ (максимальные значения) по фактическим измерениям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта необходимого удельного количества подаваемого воздуха по измерениям фактической газовости

Наименование ПДМ	N кВт	N л.с.	$g_{\text{вых}}$ м ³ /с	$c_{\text{вых}}$ СО мг/м ³	$c_{\text{пдк}}$ СО мг/м ³	$c_{\text{вых}}$ NO _x мг/м ³	$c_{\text{пдк}}$ NO _x мг/м ³	Q_M СО м ³ /с	Q_M NO _x м ³ /с	Нормативное значение м ³ /мин на 1 л.с.
Машина погрузочно-доставочная Caterpillar CAT R1300G	123	165	0,077	79,68	20	476	5	0,3	7,3	2,7
Машина погрузочно-доставочная ПДМ SANDVIK LH307	160	215	0,060	925	20	837	5	2,8	10,0	2,8
Машина погрузочно-доставочная ПДМ Sandvik LH410	235	315	0,175	73,81	20	315	5	0,6	11,0	2,1
Машина погрузочно-доставочная ПДМ EPIROC ST1030	186	249	0,059	48,4	20	412	5	0,1	4,9	1,2

Примечание: в пересчете на NO₂ концентрация NO_x = 1,53 NO + NO₂)

Важнейшим элементом предложенного методического подхода к расчету воздуха по фактору ДВС является оперативное определение фактической газовости в реальных условиях рудника с применением современных рабочих станций для комплексного измерения состава выхлопных газов с учетом их температуры.

Разработанная методика определения фактической газовости ДВС включает: определение точек измерения концентраций, режим работы двигателя при измерениях, перечень измеряемых параметров, указания по интерпретации результатов измерений и алгоритм расчета нормы подачи воздуха на единицу мощности. Преимущество

данной методики и основные условия ее внедрения заключаются в простоте подхода к проведению измерений и расчетов при работе в рудниках как в стационарных, так и динамических условиях. Подготовительные работы рекомендовано проводить при плановых измерениях и отборах проб на машинах с ДВС.

Первым этапом внедрения разработанного алгоритма является экспресс-оценка фактической газовой двигателей всего парка оборудования в соответствии с разработанной методикой определения данного показателя в условиях рудника. Это наиболее трудоемкий этап при внедрении предлагаемого методологического подхода. Далее в процессе эксплуатации осуществляется корректировка необходимого расхода воздуха по результатам периодического контроля фактической газовой дизельных машин на основе мониторинга параметров работы двигателей с целью диагностики его состояния и настройки силовой установки. При пополнении парка новыми типами машин для каждой из них также производится определение индивидуального норматива подачи воздуха с последующей корректировкой расчета общего расхода воздуха для рудника.

На основе выполненных исследований разработаны рекомендации по оперативной диагностике режима работы дизельного двигателя и организации движения оборудования с ДВС. Для этого с учетом полученных результатов разработан Протокол измерений (чек-лист). Для снижения объема выхлопных газов необходимо обеспечивать соответствующее обслуживание дизельного оборудования с целью поддержания требуемого технического состояния на основе достоверной оценки режима его работы. Данный подход позволил повысить точность расчета необходимых расходов воздуха до 20 %.

Результаты данной главы легли в основу **четвертого научного положения.**

Реализация методики на Яковлевском руднике подтвердила эффективность разработанного подхода, выражающуюся в отсутствии загазований при снижении расчетного количества воздуха для рудника на 8,3 %. Изменение расчетного количества воздуха при использовании разработанной методики расчета требуемого расхода воздуха по фактору ДВС позволило заменить вентиляторы местного проветривания ВМЭВО-8А (90 кВт) на менее энергоемкие ВМЭ-8/1 (50 кВт), что в совокупности позволило снизить производительность ГВУ ТАР 39,8\22,4-1. При этом основные экономические показатели работы ГВУ - статический и полный КПД, - практически не изменились, а агрегаты работали в зоне экономичного использования. Экономический

эффект, полученный от снижения стоимости подачи 1 м³ воздуха за счет его рационального использования, составил в целом 812448 руб/мес, а в расчете на один забой - 154752 руб/мес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является законченной научной квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований поставлена задача разработки методического подхода к расчету необходимого расхода воздуха для действующих рудников, использующих высокопроизводительное оборудование с ДВС, в основе реализации которого лежит оперативная оценка фактической газовойности оборудования. Предложенные решения имеют важное значение для горнорудной отрасли страны в части обеспечения безопасного и энергосберегающего осуществления подземной разработки рудных месторождений с использованием мощной высокопроизводительной дизельной техники.

В результате проведенных исследований лично автором получены следующие научные результаты.

1. Выполненный анализ методов расчета расхода воздуха для горных выработок, в которых используется оборудование с ДВС, показал, что действующая нормативная база не отвечает современным условиям и характеристикам применяемых машин, т. к. норматив подачи свежего воздуха при работе машин с ДВС по мощности двигателя не должен быть фиксированным для всей горнорудной отрасли; он должен определяться с учетом условий эксплуатации и типа машин с ДВС на каждом руднике, но переход к расчетам по фактическому объему выделения вредных газов затруднен отсутствием универсальных методов и способов определения фактической газовойности двигателей.

2. Обосновано, что для достижения поставленной цели исследования необходимо сочетание методов компьютерного динамического моделирования и натурных исследований; данные натурных экспериментов являются основанием для установления начальных и граничных условий математической модели.

3. Анализ теоретических описаний процесса диффузии выхлопных газов в подземных горных выработках для установления основных параметров, определяющих закономерности их переноса, позволил выявить основные факторы, определяющие динамику объемов и концентраций выхлопных газов, и разработать

математические модели для исследования закономерностей переноса выхлопных газов в горных выработках при движении автомобилей с ДВС.

4. Установленные на основе компьютерного моделирования закономерности выделения и переноса выхлопных газов (динамика объема и концентраций газов) от большегрузных автомобилей в вентиляционной сети подземного высокопроизводительного рудника подтверждены результатами натурных измерений.

5. Разработан научно обоснованный метод оценки фактической газовой парки автомобилей с ДВС в условиях подземного рудника, которая изменяется в зависимости от внешних условий, технического состояния двигателя и режима его работы. Данный показатель позволяет дифференцированно определять интенсивность каждого источника вредных газов (для всех типов применяемого оборудования), на основе чего возможно более точное определение требуемого расхода воздуха для их разбавления до установленных санитарно-гигиенических норм.

6. На основе полученных результатов обоснован новый методический подход к расчету вентиляции высокопроизводительного рудника, использующего оборудование с ДВС, включающий алгоритм расчета необходимого расхода воздуха с использованием оперативной оценки фактической газовой парки машин в условиях их эксплуатации, обеспечивающий повышение аэрологической безопасности за счет обеспеченности выработок необходимым расходом воздуха и снижения вредных выбросов от ДВС (путем своевременной регулировки двигателей), повышение безопасности эксплуатации дизельного оборудования за счет повышения качества технического обслуживания и снижение затрат электроэнергии на проветривание вследствие снижения общего расхода воздуха, подаваемого в рудник; внедрение данного подхода дает синергетический эффект повышения эффективности и безопасности горных работ.

7. Использование разработанной методики расчета, учитывающей основные факторы, определяющие выход вредных примесей, их разбавление и фактор движения дизельного оборудования, позволило повысить точность определения расчетного количества воздуха до 20%, что подтверждается данными систем контроля состояния атмосферы на действующем руднике о соблюдении ПДК вредных газов при снижении общего расхода воздуха, поступающего в выработку, при неизменных параметрах работы дизельной техники.

8. Разработаны рекомендации по организации движения мобильного дизельного оборудования с учетом установленных закономерностей переноса выхлопных газов в вентиляционной сети рудника и показателей режима работы двигателей, выраженных в минимальном расходе топлива, максимальном КПД и мощности, снимаемой с единицы объема цилиндров, устойчивости работы, стабильных нагрузок и средних оборотов работы ДВС, а также минимальных выбросов углеводородов, частиц (сажи) и соответственно окислов азота и монооксида углерода при коэффициенте избытка воздуха 1,1-1,3.

9. Внедрение предложенного подхода на Яковлевском руднике позволило снизить расчетный расход воздуха на 8,3 % и заменить вентиляторы местного проветривания ВМЭВО-8А (90 кВт) на менее энергоемкие ВМЭ-8/1 (50 кВт), что в совокупности позволило снизить производительность вентилятора главного проветривания (ГВУ) ТАФ 39,8\22,4-1. При этом загазований и изменений метеорологических параметров рудничного воздуха в исследуемых горных выработок не наблюдалось, а основные экономические показатели работы ГВУ, - оставались в зоне устойчивого и экономичного использования, т. е. эффективность проветривания обеспечивалась согласно требованиям действующих нормативных документов. Снижение расхода электроэнергии составило при этом 40 кВт/ч для одного вентилятора в одном забое при уменьшении производительности устройства на 4 м³/с; снижение производительности ГВУ с 420 м³/с до 380 м³/с выразилось в снижении потребляемой мощности на 210 кВт/ч с получением экономии 14,5 млн. рублей

Основные результаты исследований опубликованы в следующих изданиях:
в рекомендованных изданиях ВАК, Scopus:

1. Сенаторов В. А. Определение расхода воздуха в горных выработках на основе натуральных измерений фактической газовойности оборудования с двигателями внутреннего сгорания // Горные науки и технологии. – 2024. № 9(1). С.53-59. 2024;9(1):53-59. DOI: 10/17073/2500-0632-2024-01-203 (K1, Q2 Scopus)
2. Сенаторов В.А. Основные параметры атмосферы подземных рудников, оказывающие влияние на состояние условий труда работников // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. №5 (281). С.12-20. (K2)
3. Senatorov V.A. /Diesel exhaust gas dynamics in underground mines/ Kobylkin S. S., Kaledina N. O., Kobylkin A. S., Senatorov V.A., Nagornyuk V.V. // Gornyi Zhurnal 2023; (12): 94-102. - [In Russ]. (Кобылкин С. С., Каледина Н. О., Кобылкин А. С., Сенаторов

В. А., Нагорнюк В. В. Динамика выхлопных газов от дизельных машин в рудниках // Горный журнал. – 2023. - №12. – С. 94-102. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.15 (K1, Q3 Scopus).

- в других изданиях:

4. Сенаторов В.А., Сенаторова М.Г. Основные направления экспресс-диагностики двигателей внутреннего сгорания на основе состава выхлопных газов самоходных машин подземных рудников /В сборнике «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» // Секция 2. Горное дело: материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции (Том 1), СТИ НИТУ МИСИС, Старый Оскол, 29 ноября 2024 г. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСИС, 2024. - С.289-294. (РИНЦ).

5. Сенаторов В.А., Сенаторова М.Г., Калинин И.М. Совершенствование схемы проветривания рудника на основе математического моделирования аэрогазовых процессов при добыче железной руды / В сборнике «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» // Секция 2. Горное дело (Том 1): материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции, СТИ НИТУ МИСИС, Старый Оскол, 29 ноября 2024 г. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСИС, - 2024. - С.295-300. (РИНЦ).

6. Сенаторов В.А. Методика проведения натурных экспериментов по определению компонентов фактического газовыделения от машин с двигателями внутреннего сгорания в стационарном и динамическом режиме / В сборнике "Промышленная безопасность и охрана труда": тезисы докладов I Всероссийской научной конференции (с международным участием), С-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 13-15 декабря 2023 г. - С-Пб: СПбГУ, 2024. – С.122 -124. - (РИНЦ).

7. Сенаторов В.А., Калинин И.М. Основные техногенные факторы, влияющие на параметры рудничного воздуха при его движении по горным выработкам подземного рудника «Яковлевского ГОКа / В сборнике «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» // Секция 2. Горное дело: материалы XX Всероссийской научно-практической конференции, СТИ НИТУ МИСИС, Старый Оскол-Губкин, 13 апреля 2023. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСИС, - 2023. - С.143 -150. - (РИНЦ)..

8. Сенаторов В.А. Внедрение новых методов расчета расхода воздуха для подземного рудника, использующего высокопроизводительное оборудование с ДВС / В сборнике «Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела» // Актуальные проблемы геотехнологии, геомеханики, маркшейдерии, геометрии недр, обеспечения безопасности ведения горных работ и аэрологии: материалы научно-практической конференции, РУДН, Москва, 29 сентября 2023 г. - М: РУДН, 2023. – С.79–82.