



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-203>

УДК 622.4

Определение расхода воздуха в горных выработках на основе натурных измерений фактической газовости оборудования с двигателями внутреннего сгорания

В. А. Сенаторов  

Филиал «Военизированный горноспасательный отряд Юга и Центра»
ФГУП «Военизированная горноспасательная часть», г. Губкин, Российская Федерация

 senatorovv.vladimir.1970@mail.ru

Аннотация

Все более сложные геологические и гидрогеологические условия отработки рудных месторождений, ведение работ на более глубоких горизонтах, а также амбициозные планы экономического развития предприятий поставили задачи использования высокопроизводительного, мощного дизельного самоходного и добычного оборудования. Это сказалось на увеличении нагрузки на вентиляционную сеть и потребовало использования новых методов обеспечения безопасности при ведении горных работ. Приведена оценка влияния взаимосвязанных производственных факторов на аэрологическую безопасность рудника. Представлены фактические данные по газам, поступающим от различных источников. Проведен анализ метода расчета необходимого количества воздуха по фактору выхлопные газы дизельного оборудования. Проведено численное моделирование динамических процессов (с изменяющимися во времени параметрами), позволившее установить распределение концентраций выхлопных газов по горным выработкам. Последующие натурные измерения позволили верифицировать полученные результаты математического моделирования в условиях горных предприятий. Проведенные натурные эксперименты и их анализ позволили обосновать необходимость внедрения новых, более совершенных методов расчета расхода воздуха для рудника, использующего оборудование с ДВС. В качестве основного метода расчета требуемого количества воздуха использовалась методика, разработанная в МГИ НИТУ «МИСИС» (далее – Методика), были оценены ее точность и преимущества.

Ключевые слова

рудник, вентиляция, выхлопные газы, требуемый расход воздуха, двигатель внутреннего сгорания, норма выбросов, газодинамические процессы, численное моделирование, шахтные измерения

Для цитирования

Senatorov V.A. Determining airflow requirements in mine workings based on field measurements of actual emissions from internal combustion engine equipment. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):53–59. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-203>


SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Determining airflow requirements in mine workings based on field measurements of actual emissions from internal combustion engine equipment

V. A. Senatorov  

South and Center Region Paramilitary Mine Rescue Team, Paramilitary Mine Rescue Unit, Gubkin, Russian Federation

 senatorovv.vladimir.1970@mail.ru

Abstract

The increasing complex geological and hydrogeological conditions ore deposit mining, deeper excavation sites, and ambitious business expansion strategies, necessitate the use of high-performance, heavy-duty self-propelled machinery and winning equipment. Such activities significantly strain mine ventilation systems and demand innovative safety measures during mining.

This study assesses the influence of interconnected production variables on the aerological safety of mining operations. It provides real-world data on emissions from diverse sources within mines. The analysis includes



an examination of current methodologies for estimating the air volume needed to dilute exhaust gases from diesel-powered machinery. Through numerical simulation that accounts for changes over time, the study was able to predict how exhaust gas concentrations would disperse within mines. These theoretical findings were then confirmed through empirical observations made in actual mining setting. The field studies conducted, alongside their thorough analysis, underscored the necessity for adopting new, more sophisticated approaches to calculate airflow requirements in mines operating ICE machinery. A particular methodology developed by the MMI of the NUST MISIS (hereinafter referred to as the Methodology) was put forward as the primary tool for this purpose. The Methodology's precision and benefits were closely scrutinized, revealing its effectiveness in ensuring aerological safety in mines.

Keywords

mine, ventilation, exhaust gases, required airflow, internal combustion engine, rated exhaust, gas dynamics, numerical simulation, field tests

For citation

Senatorov V.A. Determining airflow requirements in mine workings based on field measurements of actual emissions from internal combustion engine equipment. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):53–59. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-203>

Введение

Новые условия горного производства потребовали перехода на современные методы расчета необходимого количества воздуха, в том числе по удельным расходам воздуха на единицу мощности дизельного оборудования как наиболее явным показателям наряду с другими факторами. Потребовалось создание гибкого инструмента, способного производить расчеты в условиях реального производства, а также на будущих этапах развития предприятия с учетом экономических требований.

Использовавшиеся ранее методики¹ не учитывали разнообразия факторов, определяющих выход вредных примесей в рудничную атмосферу от самоходного дизельного оборудования как наиболее мощного источника вредностей для большинства рудников. Расчетные технологии не отражали реальной газовой ситуации, что приводило к существенному завышению подачи свежего воздуха.

Точность определения расчетного количества воздуха не превышала $\pm 50\%$. Для современного динамично развивающегося предприятия это является серьезной проблемой и тормозом в развитии.

В ходе научных экспериментов, выполненных в условиях подземного рудника АО «Яковлевский ГОК» в 2021 г.², был проведен анализ методов расчета необходимого количества воздуха по фактору выхлопных газов дизельного оборудования.

Методика МГИ, положенная в основу исследований³, была дополнена оригинальными способами фиксации аэрогазодинамических параметров источника выброса при различных нагрузках в процессе движения оборудования.

Для оценки фактической газовой машин с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) применялись методы, позволяющие в динамике измерить концентрацию выхлопных газов и другие газоаналитические параметры. Измерения проводились при помощи специальных приборов контроля параметров рудничной атмосферы (АПР-2, МБГО-2, ТГО-2МП, АПА-1, MRU Delta 2000 CD, Testo 350, Микросенс М3). Необходимые дополнительные измерения выполнялись по стандартным методикам.

В настоящее время определение требуемого количества воздуха для рудников проводится аналогично его определению для угольных шахт⁴. Однако рудники по своей специфике выделения вредных газов отличаются от угольных шахт. Прежде всего тем, что концентрация ведения взрывных работ на них существенно выше [1, 2].

Помимо этого, наиболее интенсивными источниками выделения вредностей на современных рудниках являются разнообразное самоходное дизельное оборудование и технологии, сопровождающиеся значительными выделениями тепла (применение твердеющей закладки, использование мощного и энергоемкого оборудования) [3–5]. В общем случае определение требуемого количества воздуха для стандартного рудного предприятия ведется по следующим факторам [1, 6, 7]:

– вредные газы от взрывных работ;

³ Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать и внедрить эффективные схемы проветривания глубоких рудников с учетом применения оборудования с дизельным приводом». Руководитель проф., д.т.н. Л.А. Пучков, МГИ; 1976.

⁴ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Приказ № 505 от 8 декабря 2020 г.

Руководство по проектированию вентиляции для угольных шахт. М.: Недра; 1975.

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Приказ № 505 от 8 декабря 2020 г.

Руководство по проектированию вентиляции для угольных шахт. М.: Недра; 1975.

Безопасность горнотранспортного оборудования угольных шахт: Сборник документов. Серия 05. Выпуск 12. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России»; 2004.

² Отчет о научно-исследовательской работе «Методика расчета воздуха и организации проветривания рудника подземного». Руководитель д.т.н. С.С. Кобылкин, НИТУ МИСИС; 2021.



- вредные газы от дизельного оборудования;
- вредные газы из обнаженных пород и отбитой руды;
- запыленность воздуха;
- тепловыделения;
- расход воздуха, необходимый для дыхания людей (по количеству людей, занятых под землей).

Следует также отметить, что методы расчета по факторам от взрывных работ и запыленности в настоящее время являются наиболее изученными и при определении требуемого количества воздуха дают минимальную ошибку [2, 8, 9], а количество воздуха по газам, выделяющимся из руд, расчет по людям – не являются определяющими.

Практика эксплуатации рудников, использующих высокопроизводительное оборудование с дизельным приводом, показывает, что существенной вредностью, определяющей расчет требуемого количества воздуха, являются выхлопные газы дизельного оборудования [5, 10].

Отметим, что несмотря на солидный опыт эксплуатации дизельного оборудования до настоящего времени не существует утвержденной методики расчета требуемого количества воздуха по этому фактору. Расчет ведется по установленной почти сто лет назад норме – не менее 5 м³/мин на 1 л.с.⁵ [11].

Из изложенного следует, что определяющими факторами требуемого количества воздуха для рудников в ближайшем будущем в связи с интенсификацией ведения взрывных работ и эксплуатацией более мощного дизельного оборудования будут источники газовыделения техногенного характера, прежде всего – дизельное оборудование.

Помимо вопросов оптимизации, большое значение имеет качество методов расчета расхода воздуха. Только базируясь на достоверных расчетах количества воздуха, можно существенно снизить затраты на обеспечение проветривания рудника.

В настоящее время подача свежего воздуха в рудники исчисляется сотнями кубометров в секунду, и низкая точность определения требуемого расхода воздуха связана с огромными затратами. Так, при расчетах в рудничной вентиляции считается приемлемой погрешность 15–20%. Но сегодня воздух подается в рудники в количествах, превышающих потребность в нем до 50%. Такое огромное количество воздуха трудно поддается регулированию, поэтому распределение его в соответствии с потребностью объектов проветривания в вентиляционной сети также становится достаточно сложной инженерной задачей.

Все это говорит о том, что необходимо использовать новые, современные методы расчета. Наиболее перспективным может явиться тот, который более

дифференцированно учитывает параметры, связанные с технологией горного производства как основного фактора, определяющего выход вредных газов и пыли. Прежде всего это относится к основным источникам выделения указанных вредностей – взрывным работам и дизельному оборудованию [4, 6, 12].

Предлагаемая Методика расчета требуемого количества воздуха по фактору выхлопные газы дизельного оборудования позволяет существенно снизить затраты на проветривание за счет максимального учета всех факторов.

Сведения об объекте исследования

Рудник подземный АО «Яковлевский ГОК» имеет шахтную вентиляционную сеть с множеством параллельных и диагональных соединений, требующих большого количества регуляторов распределения воздуха.

При этом технологические процессы ведутся в сложных горно-геологических условиях при серьезной техногенной нагрузке. Все это накладывает определенные трудности и усложняет поддержание нормальных термовлажностных и пылегазовых параметров рудничного воздуха в местах ведения горных работ, особенно в условиях уменьшения концентрации кислорода и увеличения концентрации ядовитых газов, выделяющихся из взрывчатых веществ и двигателями внутреннего сгорания [12, 11].

Изменяются также влажность воздуха, его температура и абсолютное давление.

Экспериментальные измерения параметров воздуха рабочей зоны рудника показали, что основными источниками загрязнения вредными газами и пылью в условиях подземного рудника являются:

- взрывные работы;
- работа дизельного оборудования;
- процессы окисления;
- основные производственные процессы при добыче полезных ископаемых.

При этих процессах воздух рабочей зоны рассматриваемого рудника пополняется такими ядовитыми газами, как оксид углерода, оксиды азота, акролеин, формальдегид и др., которые могут вызывать патологические изменения в организме человека: нарушение регуляции дыхания и прочие негативные реакции [12].

Для оценки эффективности проветривания объекта по фактору выхлопные газы выполнено сравнение фактического и необходимого расхода воздуха.

Были определены состав и фактические выбросы выхлопных газов от машин с ДВС в стационарном режиме холостого хода и в динамике при различных нагрузках при эксплуатации техники с ДВС.

Работы проводились расчетными методами с проверкой результатов непосредственными замерами аэродинамических параметров горных выработок, вентиляционных сооружений и режима работы главной вентиляционной установки (ГВУ). При проведении расчетов производились периодические измерения интенсивности газовыделения по соответствующим вредным примесям в руднике. В резуль-

⁵ Руководство по проектированию вентиляции для угольных шахт. М.: Недра; 1975.

Безопасность горнотранспортного оборудования угольных шахт: Сборник документов. Серия 05. Выпуск 12. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России»; 2004.



тате проведенных измерений и плановых замеров контрольно-испытательной лаборатории (далее КИЛ) «ВГСО Юга и Центра» ФГУП «ВГСЧ» были получены фактические значения состава выхлопных газов, их количество и температура по имеющемуся парку самоходной дизельной техники и воздуха рабочей зоны в местах работы указанных ДВС.

Кроме повышенных концентраций вредных газов и пыли в воздухе рабочей зоны, к группе вредных физических производственных факторов в рудниках относятся тепловыделения, источниками которых являются оборудование и технологический процесс закладки отработанных очистных заходок⁶ [9].

Для оценки влияния тепловых факторов при выполнении замеров были также применены основные принципы проведения тепловых съемок в шахтах в части тепловыделения от работы машин и механизмов.

При изучении микроклимата подземного рудника было отмечено, что по выработкам поступает свежий воздух, температура которого отличается от температуры окружающих пород, отличается также и газовый состав исходящей струи.

При этом дополнительным источником нагревания рудничной атмосферы выступают выхлопные газы, их температура находится в пределах от 40 до 370 °С.

Определение концентрации ядовитых компонентов выхлопных газов для машин с ДВС осуществлялось на основании результатов плановых отборов проб и экспресс-методом, использованным для определения концентраций неразбавленных выхлопных газов при различных технологических режимах работы машин. Исследования производились в стационарном режиме и в динамике.

Для расчетов необходимого количества воздуха по указанным факторам были использованы фактические объемы выбросов выхлопных газов, рассчи-

танные по натурным измерениям представленного парка техники.

По фактической величине выброса как функции фактического максимального потребления топлива и концентрации всех ядовитых газов определены объемы выделения загрязняющих веществ, по которым рассчитано количество воздуха, необходимого для разбавления ядовитых газов до ПДК для каждого типа техники.

Двигатель машины запускается, и производятся замеры с фиксацией числа оборотов двигателя, начиная с запуска его и заканчивая максимальными как в стационарном режиме, так и в динамическом при различной нагрузке во время выполнения типовых технологических операций.

Результаты замеров, динамика газовыделения и температуры выбросов изображены на рис. 1.

На основе выполненных исследований разработана методика для расчета расхода воздуха для рудников, использующих оборудование с ДВС, на основе оценки фактической газовой двигателей для используемого оборудования⁷.

Расчёт количества воздуха, необходимого для разбавления вредных газов, образующихся при работе машин с ДВС

Количество свежего воздуха, подаваемого в выработки рабочих зон, в которых постоянно или периодически используются машины с ДВС, должно быть не менее необходимого для разбавления основных ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO₂) до предельно допустимых концентраций или обеспечения нормативного содержания кислорода и определяется по формуле:

$$Q_{\text{ДВС}} = k_{\text{од}} \sum k_{\text{ц}} Q_{\text{м}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где $k_{\text{од}}$ – коэффициент одновременности работы машин с ДВС в отдельной выработке, $k_{\text{од}} = 1,0; 0,9; 0,85$

⁷ Там же.

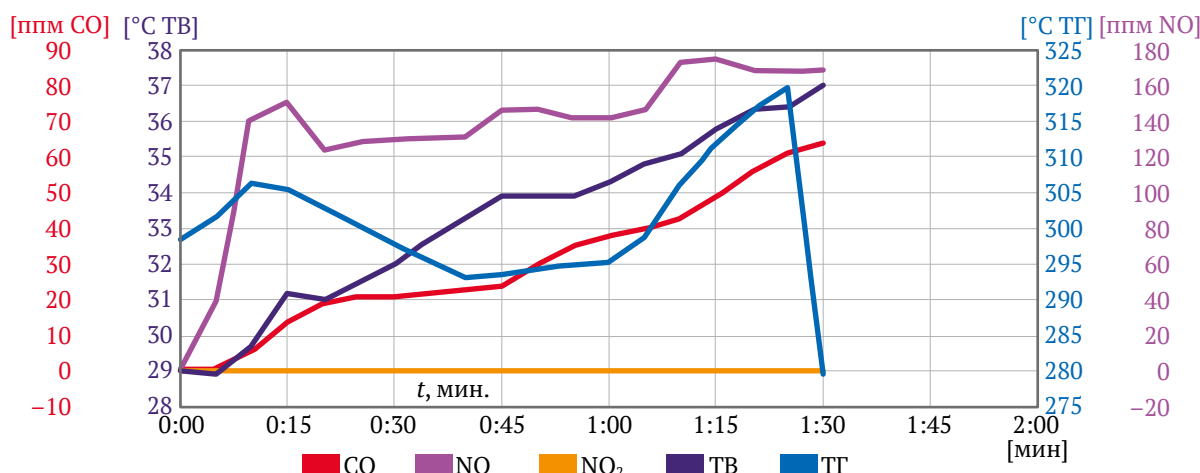


Рис. 1. Газо-температурные параметры работы двигателя на холостом ходу: CO, NO, NO₂ – изменение во времени концентрации соответственно оксида углерода, оксида азота, диоксида азота в выхлопных газах, ppm; TB – изменение во времени температуры воздуха, °С; TT – изменение во времени температуры выхлопных газов, °С; t – время, мин



при одновременной работе одной, двух, трех и более машин соответственно на одном вентиляционном участке; $k_{ц}$ – коэффициент цикличности работы машины с ДВС, принимается в зависимости от процентного соотношения времени нахождения машины с ДВС в горной выработке, для которой производится расчет, и времени цикла ее работы, изменяется в пределах от 0,1 до 1; Q_m – количество воздуха, необходимое для проветривания каждой машины по вредным факторам ДВС, м³/с.

Расчет коэффициента цикличности

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

где t – время работы машины в выработке, мин; $t_{ц}$ – время цикла работы машины, мин.

Расход воздуха по компонентам выхлопных газов, м³/с,

$$Q_m = \frac{c_{вых}}{c_{пдк}} g_{вых}, \quad (3)$$

где $c_{вых}$ – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (максимальная концентрация оксидов азота в пересчете на NO₂ в неразбавленных выхлопных газах двигателей), % по объему; $c_{пдк}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему; $g_{вых}$ – количество выхлопных газов после очистки, м³/с.

Количество выхлопных газов определяется по фактическому значению. Для самоходного дизельного оборудования, применяемого на руднике, количество выхлопных газов принято в соответствии с полученными фактическими значениями, приведенными в табл. 1.

При определении необходимого расхода воздуха исключаются из расчета потребности в воздухе выхлопных газов от буровых машин с дизельным приводом, используемых в комплексе с другими самоходными дизельными машинами, а также машин, выполняющих вспомогательные операции при их непрерывной работе в рабочей зоне не более 10 мин в течение 1 ч или 40 мин в смену.

Результаты показали, что наблюдаются общие закономерности динамики распределения выхлопных газов по объему горной выработки независимо от типа применяемой горной техники. При этом существенное влияние на газовую динамику оказывает место расположения выхлопной трубы.

Максимальные концентрации выхлопных газов наблюдаются вблизи выхлопной трубы.

Проведение динамического моделирования позволило оценить временные параметры распределения выхлопных газов, визуализировать аэродинамику газовоздушного потока и оценить параметры диффузии газов в горной выработке.

Результаты экспериментов и их анализ позволили получить среднестатистическое распределение относительного времени по выполнению производственных операций и среднестатистическую величину интенсивности газовыделения по основным вредным компонентам выхлопных газов.

Режим максимальной газовойности существует не всю рабочую смену, а строго определенное время, по которому целесообразно вести расчет требуемого количества воздуха. Учет этого факта позволяет наиболее точно определить требуемое количество воздуха.

Таблица 1

Результаты определения фактических концентраций газов, объемов выхлопных газов от погрузочно-доставочных машин (ПДМ) и расчётного количества воздуха по максимальным значениям газовыделения

Наименование ПДМ	Мощность двигателя N		Количество выхлопных газов после очистки $g_{вых}$	Концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода) $c_{вых} CO$	Предельно-допустимая концентрация по $c_{пдк} CO$	Предельно-допустимая концентрация по $c_{вых} NO_x$	Концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (сумма оксидов азота) $c_{пдк} NO_x$	Расход воздуха по $Q_m CO$	Расход воздуха по $Q_m NO_x$	Нормативное значение удельного расхода воздуха на машину
	кВт	л.с.								
Caterpillar CAT R1300G	123	165	0,077	79,68	20	476	5	0,3	7,3	2,7
SANDVIK LH307	160	215	0,060	925	20	837	5	2,8	10,0	2,8
Sandvik LH410	235	315	0,175	73,81	20	315	5	0,6	11,0	2,1
EPIROC ST1030	186	249	0,059	48,4	20	412	5	0,1	4,9	1,2
Caterpillar CAT R1300G	123	165	0,077	79,68	20	476	5	0,3	7,3	2,7
SANDVIK LH307	160	215	0,060	925	20	837	5	2,8	10,0	2,8
Sandvik LH410	235	315	0,175	73,81	20	315	5	0,6	11,0	2,1
EPIROC ST1030	186	249		0,059	48,4	20	412	5	0,1	4,9

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



Количество подачи свежего воздуха для проветривания горных выработок при работе машин с ДВС можно определить по фактическому количеству вредных выбросов как основному фактору загрязнения рудничной атмосферы.

Базируясь на расчетах по количеству вредных примесей, можно определить норматив подачи свежего воздуха при работе машин с ДВС по мощности двигателя с учетом условий эксплуатации и типа машин с ДВС на каждом руднике. Полученное значение не обязательно должно быть фиксированным для всей горнорудной отрасли, что подтверждается мировой практикой [9].

Проведенное численное моделирование процессов распространения выхлопных газов при различных режимах проветривания выработок показало, что при увеличении скорости движения воздуха (т.е. его расхода) время разбавления выхлопных газов существенно снижается. Также ускоряется вынос газов из горной выработки. При проветривании с максимальной допустимой скоростью концентрация газов снижается в 3,5 раза по сравнению с концентрацией в тех же сечениях при проветривании с минимальной скоростью движения воздуха.

Выводы

По полученным данным фактического газовыделения от самоходного оборудования можно сделать вывод о том, что для каждого типа машин существуют свои значения газовыделения, при этом для одного типа машин значения концентрации вредных газов могут отличаться. При этом не всегда более мощные

машины выделяют больше вредных газов. Опытным путем также установлено, что увеличение оборотов двигателя не всегда приводит к увеличению концентрации выхлопных газов.

Полученные результаты измерений были использованы для определения начальных и граничных условий при компьютерном моделировании.

Проведенное численное моделирование динамических процессов (с изменяющимися параметрами во времени) позволило установить, что в процессе работы машин с ДВС распределение концентрации выхлопных газов со временем приобретает равномерный характер. Выравнивание концентрации выхлопных газов по сечению происходит на расстоянии около 100 м от источника (выхлопной трубы). При увеличении скорости движения воздуха время разбавления выхлопных газов существенно снижается и ускоряется их вынос из горной выработки. При проветривании с максимальной допустимой скоростью концентрация газов снижается в 3,5 раза по сравнению с концентрацией в тех же сечениях при проветривании с минимальной допустимой скоростью движения воздуха.

При работе одновременно нескольких машин с ДВС в разных заходках на одном добычном участке (блоке) при выдаче исходящей струи воздуха на общую вентиляционную горную выработку происходит суммирование концентраций выхлопных газов. В таких случаях при последовательном проветривании часть выхлопных газов может попасть в действующие горные выработки. Это необходимо учесть при разработке схем проветривания вентиляционных участков.

Список литературы / References

1. Воронин В.И., Воронина Л.Д., Вагриновский А.Д. *Руководство по проектированию и практическому осуществлению противопопылевых вентиляционных режимов в металлических рудниках*. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу; 1960.
Voronin V.I., Voronina L.D., Vagrinsky A.D. *Guidelines for the design and practical implementation of anti-dust ventilation regimes in metal mines*. Moscow: State scientific and technical publishing house of literature on mining; 1960. (In Russ.)
2. Ольховский Д.В., Паршаков О.С., Бублик С.А. Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):47–58. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>
Olkhovskiy D.V., Parshakov O.S., Bublik S.A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):47–58. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>
3. Смайлис В.И., Иктров В.А., Соколов В.С. Исследование токсичности выхлопных газов дизелей Д-108 и Д-130. *Труды ЦНИДИ*. 1963;47.
Smailis V.I., Iktrov V.A., Sokolov V.S. Study of the toxicity of exhaust gases of diesel engines D-108 and D-130. *Proceedings of the Central Research Diesel Institute*. 1963;47.
4. Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Гришин Е.Л., Семин М.А. Расчет количества воздуха по содержанию кислорода для проветривания рабочих зон при применении машин с двигателями внутреннего сгорания. *Безопасность труда в промышленности*. 2015;(8):43–46.
Levin L.Yu., Zaitsev A.V., Grishin E.L., Semin M.A. Calculation of the amount of air based on oxygen content for ventilating work areas when using machines with internal combustion engines. *Occupational Safety in Industry*. 2015;(8):43–46. (In Russ.)
5. Кузьминых Е.Г., Кормишиков Д.С. Анализ методов расчета требуемого количества воздуха для разжижения отработанных выхлопных газов. *Горное эхо*. 2020;(3):107–115. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.21>
Kuzminykh E.G., Kormshchikov D.S. Analysis of methods for calculating the required amount of air to dilute exhaust gases. *Gornoye Ekho*. 2020;(3):107–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.21>



6. Semin M., Levin L. Mathematical modeling of air distribution in mines considering different ventilation modes. *Mathematics*. 2023;11(4):989.
7. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Методология системного проектирования вентиляции шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(S1): 128–136.
Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylykin S.S. Methodology of system design mine ventilation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(S1):128–136. (In Russ.)
8. Кобылкин А.С. Сравнение результатов шахтных исследований с результатами моделирования процессов пылепереноса и пылеотложения. В: *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр*. 2018. С. 269–273.
Kobylykin A.S. Comparison of the results of mine research with the results of modeling the processes of dust transfer and dust deposition. In: *Problems and Prospects for the Integrated Development and Conservation of the Earth's Interior*. 2018. Pp. 269–273. (In Russ.)
9. Barrett Ch., Gaillard S., Sarver E. Demonstration of continuous monitors for tacking DPM trends over prolonged periods in an underground mine. In: *Diesel Particulate Control. Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. Colorado School of Mines, Colorado, USA, June 17–22, 2017. Pp. 5-29–5-36.
10. Кобылкин С.С., Каледина Н.О., Кобылкин А.С., Сенаторов В.А. Динамика выхлопных газов от дизельных машин в рудниках. *Горный журнал*. 2023;(12):94–102. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.15>
Kobylykin S.S., Kaledina N.O. Diesel exhaust gas dynamics in underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):94–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.15>
11. Кузьминых Е.Г., Левин Л.Ю., Мальцев С.В. Распределение продуктов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания в шахтной вентиляционной сети. *Горное эхо*. 2023;(2):96–103. <https://doi.org/10.7242/echo.2023.2.17>
Kuzminykh E.G., Levin L.Yu., Maltsev S.V. Distribution of exhaust gas products from equipment with internal combustion engines in the mine ventilation network. *Gornoye Ekho*. 2023;(2):96–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2023.2.17>
12. Суриков А.В., Лешенюк Н.С. Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2018;2(2):147–160. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2018.2-2.147>
Surikov A., Leshenyuk N. Modeling of visibility in a room under fire conditions with application of the FDS software complex. *Journal of Civil Protection*. 2018;2(2):147–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2018.2-2.147>

Информация об авторе

Владимир Александрович Сенаторов – помощник командира отряда, филиал «Военизированный горноспасательный отряд Юга и Центра» ФГУП «Военизированная горноспасательная часть», г. Губкин, Российская Федерация; ORCID [0009-0003-0486-4623](https://orcid.org/0009-0003-0486-4623); e-mail: senatorov.vladimir.1970@mail.ru

Information about the author

Vladimir A. Senatorov – Assistant Detachment Commander, Branch of the “Militarized Mine Rescue Squad of the South and Center” of the Federal State Unitary Enterprise “Militarized Mine Rescue Unit”, Gubkin, Russian Federation; ORCID [0009-0003-0486-4623](https://orcid.org/0009-0003-0486-4623); e-mail: senatorov.vladimir.1970@mail.ru

Поступила в редакцию

12.01.2024

Received

12.01.2024

Поступила после рецензирования

07.02.2024

Revised

07.02.2024

Принята к публикации

17.02.2024

Accepted

17.02.2024