

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО ФАКТОРУ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

А.С. Серегин¹, И.Р. Фазылов¹, Е.А. Прохорова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru

Аннотация: Широкое применение горнотранспортного оборудования с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) определяется необходимостью интенсификации процессов, связанных с добычей полезных ископаемых. Несмотря на очевидные преимущества этого оборудования, его использование приводит к появлению ряда негативных факторов, снижающих безопасность персонала, обслуживающего машины с ДВС, или находящегося от них в непосредственной близости. К этим факторам относятся выбросы содержащихся в выхлопных газах загрязняющих веществ, которые могут приводить к превышению концентраций вредных веществ в воздухе предельно-допустимых значений. Нормализация химических параметров рудничного воздуха достигается за счет подачи в выработки, где находятся машина с ДВС, необходимого количества воздуха. Его величина зависит от многих факторов: экологического стандарта машин с ДВС, срока их эксплуатации, мощности двигателя, режима работы машин с ДВС, конструктивных параметров оборудования, скорости его движения по выработкам и т.п. Рассмотрена задача определения количества воздуха, подаваемого в горную выработку, для разбавления вредных веществ, содержащихся в выхлопных газах, до величин, обеспечивающих в воздухе концентрации оксида углерода и окислов азота (в пересчете на диоксид азота), регламентируемые Федеральными нормами и правилами безопасности. Для установления величины выбросов загрязняющих веществ в натуральных условиях осуществлен комплекс экспериментальных исследований, включавших измерения расхода выхлопных газов, их температуры и объемной концентрации в них оксида углерода и оксидов азота. Эти величины использованы для расчетов весовой характеристики выбросов загрязняющих веществ и последующего определения количества воздуха, необходимого для их разбавления до допустимых концентраций.

Ключевые слова: рудничный воздух, шахтные автосамосвалы с дизельным приводом, выхлопные газы, термодинамические параметры, концентрация загрязняющих веществ, натурные измерения, каталитический нейтрализатор.

Благодарность: Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

Для цитирования: Серегин А. С., Фазылов И. Р., Прохорова Е. А. Обоснование безопасных условий работы горнотранспортных машин с двигателями внутреннего сгорания по фактору выделения загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 37–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_37.

Justification of safe operating conditions for mining transportation machines powered by internal combustion engines using air pollutant emission criterion

A.S. Seregin¹, I.R. Fazylov¹, E.A. Prokhorova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru

Abstract: Wide application of mining transportation equipment powered by internal combustion engines (ICE) is conditioned by intensification of all mineral mining processes. Being evidently advantageous, operation of this equipment induces some adversities which impair safety of personnel engaged in maintenance or operating in vicinity of ICE-powered machines. Such adversities are, first of all, air pollutant emission of exhaust gases in concentrations greatly higher than the maximum allowable values. Normalization of chemical parameters of mine air is possible by feeding required air quantity in roadways where ICE-powered machines operate. The required air quantity depends on many factors: ecological standard, lifetime, engine capacity and operating conditions of ICE machines, their design parameters, travel velocity in roadways, etc. This article discusses determination of air quantity to be fed in a roadway to dilute toxic substances in exhaust gases down to values which ensure carbon oxide and nitric oxide (in equivalence of nitrogen dioxide) concentrations as per the Federal Safety Norms and Regulations. Valuation of air pollutant emission on a full scale used a set of experiments including measurement of exhaust flow rate, temperature and concentrations of carbon oxide and nitric oxides. The resultant values were used to calculate the weight characteristics of air pollutant emissions and to determine the required air quantity to dilute them down to the allowable concentrations.

Key words: mine air, diesel-powered dump trucks, exhaust gases, thermodynamic parameters, pollutant concentration, full-scale measurements, catalytic neutralizer.

Acknowledgements: The study was supported under the state contract in the sphere of science for 2021, Grant No. FSRW-2020-0014

For citation: Seregin A. S., Fazylov I. R., Prokhorova E. A. Justification of safe operating conditions for mining transportation machines powered by internal combustion engines using air pollutant emission criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):37-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_37.

Введение

Одним из направлений повышения эффективности добычи полезных ископаемых является использование высокопроизводительного горнотранспортного оборудования, в том числе буровых установок и погрузочно-доставочных машин с ДВС. Подавляющее большинство машин с ДВС — это машины, оборудованные дизельными двигателями. При очевидных преимуществах этого

оборудования (значительная мощность двигателей, высокая мобильность, сравнительно большой коэффициент полезного действия) его эксплуатация сопровождается выделением в рудничный воздух многочисленных опасных и вредных веществ, содержащих в выхлопных газах: окись углерода (CO), оксиды азота (NO_x), формальдегид (CH₂O), акролеин (C₃H₂O) и др. Кроме того, в процессе работы машин образуются твердые

частицы (DPM), которые также имеют канцерогенные свойства [1 – 3].

Независимо от способа разработки месторождения (подземного или открытого), выбросы загрязняющих веществ могут приводить к превышению нормативных значений концентраций в рудничном воздухе опасных и вредных веществ, регламентируемых Федеральными нормами и правилами безопасности («Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»; Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности»).

Нормализация химических параметров рудничной атмосферы достигается за счет подачи в рабочие зоны, где находятся машина с ДВС, воздуха в количестве, необходимом для обеспечения выполнения требований вышеупомянутых правил безопасности.

Для подземных горных выработок, характеризующихся устойчивым проветриванием, необходимое количество воздуха определяется, главным образом, геометрическими размерами выработок и мощностью горнотранспортного оборудования [4, 5]. Другая ситуация имеет место в карьерах, где количество воздуха в месте нахождения машин с ДВС зависит от многих факторов и претерпевает изменения в течение определенного промежутка времени [6, 7]. В этих условиях для оценки состояния карьерного воздуха необходимо дистанционное измерение концентраций загрязняющих веществ в рабочих зонах карьера с последующим принятием решения о необходимости осуществления компенсационных мероприятий [8–10].

Для подземных выработок рост мощностей двигателей горнотранспортного оборудования сдерживается пропорцио-

нальным увеличением количества воздуха, предельная величина которого ограничивается возможностью вентиляционной сети подземных объектов. В этой связи определение необходимого количества воздуха по фактору оборудования с дизельными двигателями следует считать актуальной задачей. Другой, не менее важной задачей является при росте мощности двигателей одновременное сокращение расхода топлива и снижение выбросов выхлопных газов на единицу их мощности [11, 12].

За рубежом предельнодопустимые нормы выбросов устанавливаются стандартами (TIER, STAGE, EURO и др.), см., например, стандарт Tier 3 Motor Vehicle Emissions and Fuel Standards [23]. Сравнение этих стандартов позволяет говорить о примерно одинаковых значениях выбросов загрязняющих веществ при работе оборудования с дизельными ДВС для одних и тех же мощностей двигателей и экологических требований к топливу. Вместе с тем, очевидно, что эти стандарты не могут в полной мере претендовать на полный учет условий, в которых эти машины будут эксплуатироваться: срок их эксплуатации, режимы работы машин, конструктивные характеристики оборудования, скорости его движения по выработкам, а также геометрические и аэродинамические параметры выработок (сечение, тип крепи, шероховатость стенок, направление движение воздуха, глубина горных работ и др. [13, 14].

В ряде стран расход воздуха, необходимый для разбавления выхлопных газов, определяется путем умножения мощности двигателя машин с дизельным ДВС на удельный расход воздуха в м³/с, приведенный к единице мощности [15]. Например, в Австралии эта величина составляет от 0,05 до 0,06 м³/с на кВт, в Канаде от 0,045 до 0,092 м³/с на кВт [16]. Данные требования к количеству

воздуха устанавливаются локальными правилами охраны труда, имеющими силу для горнодобывающей промышленности конкретной страны. Распространение этих норм на горнотранспортное оборудование, эксплуатируемое в России, из-за отсутствия научного обоснования вышеприведенных величин не вполне правомерно [17, 18]. В этой связи целью настоящего исследования является установление удельного расхода воздуха на единицу мощности оборудования, необходимого для разбавления до безопасных значений концентрации CO и NO_x , содержащихся в выбросах выхлопных газов при работе горнотранспортного оборудования с ДВС в подземных горных выработках [19–22].

Эти исследования были осуществлены на базе горнотранспортного оборудования, входящего в состав машинных парков Кировского рудника (АО «Апатит») и рудника «Ангидрит» (Норильский ГМК).

Методология проведения исследований

Методология определения необходимого количества воздуха для обеспечения в нем нормативных концентраций CO и NO_x при работе погрузочно-доставочных машин с ДВС предусматривает последовательное осуществление нескольких этапов:

- анализ актуального парка горнотранспортного оборудования с ДВС на Кировском руднике и руднике «Ангидрит»;

- отбор из машинного парка и рудника «Ангидрит» транспортно-погрузочных машин, характеризующихся одинаковыми экологическими стандартами, типами двигателя, сроками эксплуатации и различными установленными мощностями двигателей;

- выбор горной выработки со сквозной вентиляционной струей с расходом

воздуха в диапазоне $3 \div 5 \text{ м}^3/\text{с}$ для размещения исследуемой машины с ДВС;

- осуществление инструментальных измерений расходных характеристик выбросов выхлопных газов (скорости, полного давления), концентраций оксида углерода и окислов азота, температуры выхлопных газов при работе машин на холостом ходу, со средней и максимальной нагрузками на двигатель при неподвижной машине;

- выполнение измерений концентраций загрязняющих веществ в горной выработке на различных расстояниях от машины при включенном двигателе;

- разработка методики и вычисление по данным измерений расходных характеристик выбросов загрязняющих веществ;

- построение зависимостей расходных характеристик выбросов загрязняющих веществ от мощности двигателей при работе машин на холостом ходу со средней и максимальной нагрузками;

- определение удельных расходов воздуха на единицу мощности двигателя.

Технические характеристики самоходного дизельного оборудования (СДО) с ДВС, отобранного для проведения дальнейших исследований, представлены в табл. 1.

Геометрические и аэродинамические характеристики выработки для размещения СДО приведены в табл. 2.

Измерение расходных и концентрационных показателей выхлопных газов при работе машин с ДВС в натуральных условиях

Натурные исследования расходных и концентрационных показателей выхлопных газов осуществлялись при неподвижном транспортном средстве в горной выработке и работе двигателя на холостом ходу (х.х.), средних и макси-

Таблица 1

Технические характеристики машин с ДВС
Specifications of ICE machines

Тип СДО	Экологический стандарт	Мощность двигателя, кВт	Площадь сечения выхлопного тракта, м ²
Кировский рудник			
ПДМ TORO 7М	Tier 3	133,9	0,013
Самосвал TORO 40D	Tier 3	258,9	0,025
ПДМ SANDVIK LH 514	Tier 3	178,7	0,025
ПДМ ST 1030	Tier 3	141,2	0,008
Рудник Ангидрит			
Самосвал МТ-42	Tier 3	387,8	0,017
Самосвал МТ-42	Tier 3	387,8	0,017
Самосвал AD45B	Tier 3	439,2	0,021
Буровая установка, Boomer M2D	Tier 3	121,5	0,011
ПДМ, ST-18	Tier 3	335,6	0,031

мальных оборотах (сред. об. и макс. об.) коленчатого вала и включали измерения:

- расходов воздуха в выработке, где расположена испытываемая машина с ДВС;
- средних по сечению выработки температур воздуха по ходу движения воздуха перед автомашиной (а/м) с ДВС и после машины;
- скоростей газов на выходе из выхлопной трубы;

- концентраций СО и NO_x в выхлопных газах;
- температур выхлопных газов;
- концентраций СО и NO_x в вентиляционной струе перед машиной с ДВС и на расстоянии 30 м за машиной по ходу движения воздуха.

Для измерения скоростей газов в выхлопной трубе использовались трубка Пито и прибор МБГО-2, а скоро-

Таблица 2

Характеристика горной выработки для размещения СДО
Characteristics of roadway for placement of diesel-powered machines

Модель СДО	Сечение, м ²	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /с
Кировский рудник			
ПДМ TORO 7М	24,5	0,45	11
TORO 40D	24,5	0,90	22,1
SANDVIK LH 514	24,5	0,62	15,2
ST 1030	27	0,44	12
Рудник Ангидрит			
МТ-42	22,38	1,64	36,71
AD45B	22,38	1,64	36,71
Boomer M2D	24,76	0,83	20,55
ST-18	20,88	2,08	43,45

стей воздуха в выработке — анемометр АПР-2 и термоанемометр Testo 425. Регистрация температуры и относительной влажности рудничного воздуха осуществлялась с помощью измерителя параметров микроклимата Метеоскоп-М.

Отбор проб и определение концентраций оксида углерода и оксидов азота выполнялась совместно с ФГУП «Военизированной горноспасательная часть».

Отбор проб из выхлопного тракта производится после каталитического нейтрализатора непосредственно из выхлопной трубы работающего ДВС. При этом пробоотборный штуцер помещался в сечение выхлопной трубы для исключения смешивания с атмосферным воздухом. Исследуемые машины располагались на свежей струе воздуха, что гарантировало отсутствие в поступающей струе загрязняющих веществ.

Пробы CO отбирались в резиновые камеры, а пробы на NO_x — в стеклянные вакуумированные емкости с раствором Грисса-Илосвая.

Количественная оценка состава отобранных проб производилась в Контрольно-испытательной лаборатории ВГСЧ. Концентрации угарного газа были получены с помощью методов газовой хроматографии (инструкция № 37-2017 ФР 1.31.2018.30111). Исследование содержания суммы оксидов азота в отработавших газах ДВС выполнено с реактивом Грисса-Илосвая (Инструкция № 11-2011).

Результаты измерений

Результаты натуральных измерений расходных, термодинамических и химических показателей выхлопных газов при работе машин с ДВС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные инструментальных измерений расходных, термодинамических и химических показателей выхлопных газов при работе машин с ДВС
Instrumental measurements of flow rate, temperature and chemistry of exhaust gases in operation of ICE machines

А/м, мощность, кВт	Место отбора пробы	Температура, °С	Расход газов, м³/с	Относительная влажность, %	Концентрация, %	
					CO	NO
Рудник «Ангидрит»						
ШАС, МТ-42, 387,8, № 2, Tier 3	выработка до а/м	10,63	26,51	18	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	90	0,16	5	0,03	0,02
	выхлоп сред. об.	102	0,34	3,3	0,03	0,03
	выхлоп макс. об.	135	0,62	0,3	0,05	0,03
	выработка после а/м в 30 м	10,7	26,51	18,1	0,0002	<0,0001
	в кабине	–	–	–	0,0001	<0,0001
AD45B, 439,2, Tier 3	выработка до а/м	9,2	36,71	18	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	141	0,3	5	0,02	0,02
	выхлоп сред. об.	150	0,71	3,8	0,03	0,02
	выхлоп макс. об.	176	1,07	0,1	0,05	0,03
	выработка после а/м в 30 м	9,7	36,71	16	0,0007	<0,0001
	в кабине	–	–	–	0,0002	<0,0001

СБУ ВСО, Boomer M2D, 121,5, Tier 3	выработка до а/м	7	20,55	87	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	90	0,09	3,5	0,02	0,02
	выхлоп сред. об.	114	0,11	0,5	0,03	0,02
	выхлоп макс. об.	160	0,18	0,1	0,05	0,03
	выработка после а/м в 30 м	7,2	20,55	85	0,0002	<0,0001
	в кабине	–	–	–		<0,0001
ПДМ, ST-18, 335,6, Tier 3	выработка до а/м	9,3	43,45	55	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	139	0,18	2,9	0,02	0,03
	выхлоп сред. об.	160	0,31	0,5	0,05	0,03
	выхлоп макс. об.	172	0,45	0,1	0,05	0,03
	выработка после а/м в 30 м	9,2	43,45	53	<0,0001	<0,0001
	в кабине	–	–	–	<0,0001	0,000
Кировский рудник						
TORO 7M, 133,9, Tier 3	выработка до а/м	11,2	41,7	56	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	95	0,16	3,4	0,01	0,01
	выхлоп сред. об.	120	0,22	2,5	0,01	0,01
	выхлоп макс. об.	161	0,52	0,1	0,01	0,01
	выработка после а/м в 30 м	11,3	41,7	55	0,0002	0,00004
	в кабине	–	–	–	0,0005	0,00010
TORO 40D, 258,9, Tier 3	выработка до а/м	11,3	41,7	53	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	117	0,13	3,1	0,02	0,01
	выхлоп сред. об.	137	0,3	0,8	0,02	0,01
	выхлоп макс. об.	167	0,64	0,2	0,02	0,01
	выработка после а/м в 30 м	11,5	41,7	53	0,0001	0,00006
	в кабине	–	–	–	0,0007	0,00020
SANDVIK LH 514, 178,7, Tier 3	выработка до а/м	11,3	41,7	52	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	103	0,11	3,1	0,01	0,01
	выхлоп сред. об.	126	0,23	1,5	0,01	0,01
	выхлоп макс. об.	163	0,49	0,1	0,02	0,01
	выработка после а/м в 30 м	11,4	41,7	52	0,0001	0,00003
	в кабине	–	–	–	0,0006	0,00016
ST-1030, 141,2, Tier 3	выработка до а/м	11,3	41,7	55	<0,0001	<0,0001
	выхлоп х. х.	97	0,12	3,2	0,01	0,01
	выхлоп сред. об.	121	0,18	1,8	0,03	0,01
	выхлоп макс. об.	161	0,3	0,1	0,03	0,01
	выработка после а/м в 30 м	11,3	41,7	56	0,0001	0,00003
	в кабине	–	–	–	0,0005	0,00012

Вычисление расходной характеристики выбросов загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах машин с ДВС

Массовый расход загрязняющих веществ, поступающих в горную выработку по выхлопной трубе СДО (J_i), рассчитывается по следующей формуле:

$$J_i = C_{wi} Q_{ог}, \text{ мг/с} \quad (1)$$

где C_{wi} – концентрация загрязняющего компонента в выхлопных газах СДО, мг/м³; $Q_{ог}$ – объемный расход выхлопных газов, м³/с.

$$Q_{ог} = vS, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2)$$

где v – скорость выхлопных газов, м/с; S – поперечное сечение выхлопного

Таблица 4

Рассчитанные по данным натурных измерений величины выбросов загрязняющих веществ и их удельные нормативные значения

Air pollutant emissions calculated based on in situ measurements and as per standards

Модель СДО, мощность ДВС, кВт	Режим работы ДВС	Общие значения выбросов, г/ч		Удельный выброс, г/(ч·кВт) г/(ч·л.с.)		Удельный выброс двигателя по стандарту г/(ч·кВт) г/(ч·л.с.)	
		CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NMHC+NO _x
AD45B, 439,2	х. х.	190,39	190,39	0,34(0,25)	0,39(0,29)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	664,35	442,90	1,53(1,12)	1,02(0,75)		
	макс. об.	1567,64	940,58	3,61(2,66)	2,17(1,59)		
MT-42, 387,8	х. х.	177,01	118,01	0,46(0,34)	0,30(0,22)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	359,91	359,91	0,94(0,69)	0,94(0,69)		
	макс. об.	1000,10	600,06	2,61(1,92)	1,56(1,15)		
Boomer M2D, 121,5	х. х.	61,88	61,88	0,51(0,37)	0,51(0,37)	5 (3,7)	4 (3)
	сред. об.	113,70	75,80	0,94(0,69)	0,63(0,46)		
	макс. об.	271,21	162,72	2,26(1,66)	1,35(0,99)		
ST-18, 331	х. х.	117,17	175,75	0,35(0,26)	0,53(0,39)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	466,59	279,95	1,40(1,03)	0,84(0,62)		
	макс. об.	670,93	402,56	2,02(1,49)	1,21(0,89)		
TORO 7M, 134	х. х.	28,43	39,80	0,21(0,15)	0,29(0,21)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	65,40	73,60	0,48(0,35)	0,54(0,40)		
	макс. об.	156,55	118,28	1,16(0,86)	0,88(0,64)		
TORO 40D, 259	х. х.	92,55	37,86	0,35(0,26)	0,14(0,10)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	186,92	126,08	0,72(0,53)	0,48(0,35)		
	макс. об.	457,39	257,48	1,76(1,29)	0,99(0,73)		
SANDVIK LH 514, 174,7	х. х.	53,44	24,94	0,29(0,21)	0,13(0,10)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	102,54	89,02	0,57(0,42)	0,49(0,36)		
	макс. об.	327,89	214,74	1,83(1,34)	1,20(0,88)		
ST 1030, 141,2	х. х.	55,20	66,04	0,39(0,28)	0,46(0,34)	3,5 (2,6)	4 (3)
	сред. об.	162,82	102,52	1,15(0,84)	0,72(0,53)		
	макс. об.	261,30	125,46	1,85(1,36)	0,88(0,65)		

Примечание. NMHC – неметановые углеводороды.

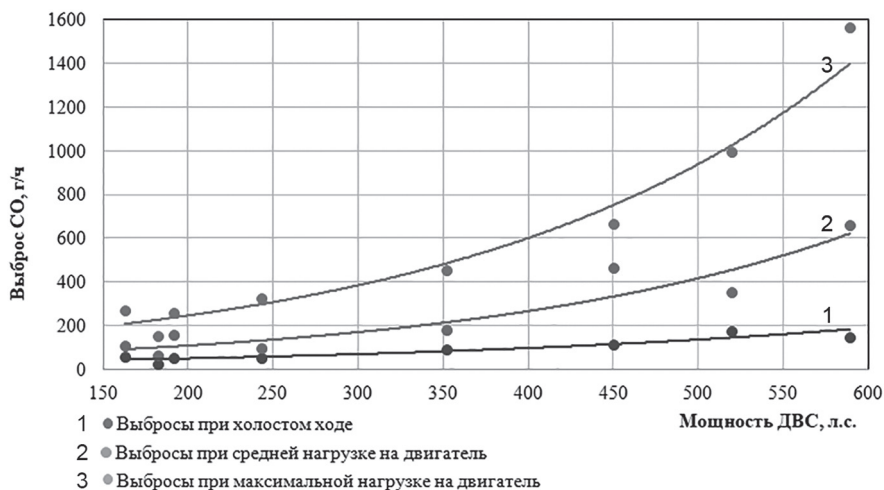


Рис. 1. Зависимость величины выбросов CO от номинальной мощности оборудования
 Fig. 1. CO emissions versus rated capacity of equipment

тракта в месте измерения скорости потока, м².

$$C_{wi} = (10C_i MP)/RT, \text{ мг/м}^3 \quad (3)$$

где C_i — объемная концентрация загрязняющего компонента, %; M — молярная масса компонента; P — полное давление выхлопных газов, вычисленное как сумма барометрического давления в выработке и динамического давления, Па; T — температура газов, К.

При известной интенсивности выбросов CO и NO_x их удельная величина, измеряемая в мг/с на 1 л. с., составляет:

$$J_{\text{уд}i} = J_i / N, \text{ мг/с} \quad (4)$$

где N — мощность ДВС, л. с.

Вычисленные значения удельных выбросов представлены в табл. 4.

Результаты вычислений выбросов CO и NO_x в зависимости от установленной мощности двигателей ($N_{\text{дв}}$), обра-

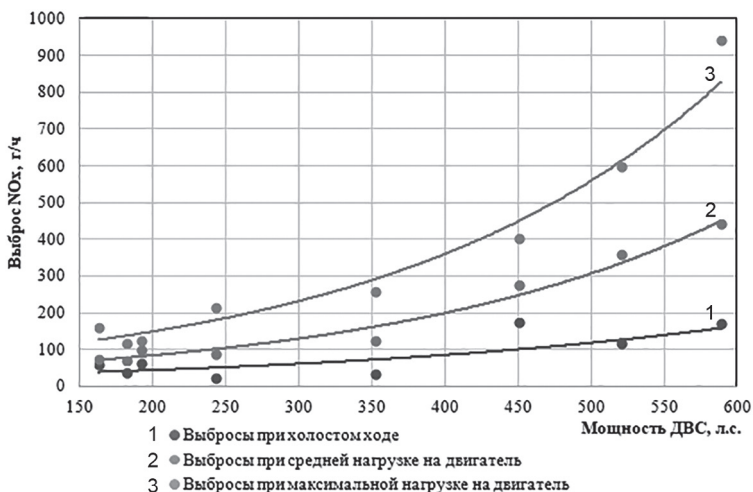


Рис. 2. Зависимость величины выбросов NO_x от номинальной мощности оборудования
 Fig. 2. NO_x emissions versus rated capacity of equipment

Таблица 5

Значения коэффициентов A_i , B_i в формуле (4)
Values of coefficients A_i and B_i in formula (4)

Значения коэффициентов	Для расчета выбросов СО (рис. 1)			Для расчета выбросов NO _x (рис. 2)		
	холостой ход	средняя нагрузка	максимальная нагрузка	холостой ход	средняя нагрузка	максимальная нагрузка
A_i	25,71	44,446	100,8	23,252	35,837	66,055
B_i	0,0033	0,0045	0,0045	0,0033	0,0043	0,0044
Коэффициент детерминации R^2	0,8573	0,8891	0,9759	0,6827	0,9763	0,9739

ботанные на основе регрессионно-корреляционного метода, представлены на рис. 1–2.

Зависимости, характеризующие величины выбросов, имеют вид:

$$J_i = A_i \exp(B_i N_{\text{дв}}), \quad (5)$$

где значения коэффициентов A_i , B_i зависят от режима работы машины с ДВС и типа загрязняющего вещества (табл. 5).

Корреляционные зависимости, представленные на рис. 1–2, имеют экспоненциальный характер и характеризуются корреляционным отношением, превышающем 0,95 при статистической надежности 0,95.

Определение удельных расходов воздуха на единицу мощности двигателя

При известной величине выбросов загрязняющих веществ удельный расход воздуха для разбавления до нормативных значений их концентраций легко вычислить по формуле:

$$Q_{\text{уді}} = 60 J_{\text{уді}} / (C_{\text{пджі}} \cdot N), \quad (6)$$

м³/(мин·л.с.)

где $C_{\text{пджі}}$ – предельно допустимая концентрация загрязняющего компонента мг/м³; N – мощность ДВС, (кВт), л.с.

Результаты расчетов $Q_{\text{уді}}$ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Величины удельных расходов воздуха
Specific air flow rates

Модель СДО, мощность ДВС, кВт	Удельный расход воздуха, м ³ /(мин·кВт), м ³ /(мин·л.с.), формула (6)		Фактический удельный расход воздуха, м ³ /(мин·кВт), м ³ /(мин·л.с.)	
	по СО	по NO _x	по СО	по NO _x
AD45B, 439,2	1,63(2,22)	1,01(1,38)	5,08	3,74
MT-42, 387,8	1,18(1,6)	2,83(3,85)	5,76	4,24
Boomer M2D, 121,5	1,02(1,39)	0,45(3,33)	10,28	7,56
ST-18, 331	0,91(1,24)	2,19(2,98)	7,88	5,79
TORO 7M, 134	0,53(0,72)	1,59(2,17)	4,93	3,63
TORO 40D, 259	0,8(1,08)	1,79(2,44)	5,12	3,77
SANDVIK LH 514, 174,7	0,83(1,12)	2,17(2,95)	5,10	3,75
ST 1030, 141,2	0,83(1,13)	1,6(2,18)	5,10	3,75

Обсуждение результатов

Как следует из рис. 1 и 2, корреляционные зависимости величин выбросов оксида углерода и окислов азота в выхлопных газах исследуемого горнотранспортного оборудования с дизельным приводом имеют экспоненциальную зависимость от мощности двигателя. При этом величина выбросов при одинаковой установленной мощности двигателя определяется режимом работы горнотранспортного оборудования, достигая максимального значения при максимальной загрузке двигателя и минимального значения при холостом ходе. В случае максимальной загрузки двигателя выбросы оксида углерода и окислов азота изменяются в интервале соответственно 156–1567 г/ч и 125–940 г/ч, а при холостом ходе – 28–190 г/ч и 25–190 г/ч. Расчетные расходы воздуха, вычисленные по экспериментально установленным выбросам оксида углерода и окислов азота, практически для всего исследуемого парка оборудования, за исключением буровой установки Woomeg M2D, не превосходят 3 м³/мин на л.с.

Фактические удельные расходы воздуха, рассчитанные по расходу воздуха, поступающему в выработку, где находится оборудование с ДВС, превосходят удельные расходы, определенные по выбросам оксида углерода и окислов азота в 1,5–2,3 раза. При этих значениях фактических удельных расходов в контрольных точках вблизи кабины водителя и на удалении 30 м от машины величины концентраций в воздухе оксида углерода и окислов азота находятся ниже пределов их точного измерения. Это дает возможность утверждать, что снижение количества воздуха до величины, вычисленной по удельному значению 3 м³/(мин·л.с.), не приведет к увеличению концентраций загрязняющих веществ в контрольных точках выше нормативных значений.

Вместе с тем, этот вывод нуждается в дополнительном обосновании, которое может быть реализовано на основе вычислительного эксперимента, учитывающего как полученные экспериментально значения выбросов, так и реальные условия работы машин с ДВС, находящихся в выработках.

Следует отметить, что возможности вычислительного эксперимента не ограничиваются лишь вычислением концентраций загрязняющих веществ в контрольных точках. Его результаты могут быть использованы для построения полей концентраций загрязняющих веществ по объему выработки, позволяющих выделить зоны, где значения концентраций могут превосходить нормативные значения, а также дать оценку эффективности снижения этих концентраций на основе изменения направления и скорости выброса выхлопных газов.

Заключение

Результаты выполненных исследований дают основание сделать следующие выводы:

- Обеспечение безопасных условий труда горнорабочих по фактору выбросов загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах машин с дизельными ДВС, связано с подачей в горные выработки, где находятся эти машины, свежего воздуха, расход которого определяется его удельным количеством на единицу установленной мощности двигателя, измеряемого, например, в м³/(мин·л.с.);
- Корректное вычисление удельного количества воздуха следует осуществлять не по проектным показателям, характеризующим двигатель внутреннего сгорания (суммарный рабочий объем цилиндров, скорость вращения коленчатого вала), а в соответствии с экспериментально установленными величинами выбросов оксида углерода и окис-

лов азота, содержащимися в выхлопных газах, при измерении которых следует учитывать площадь сечения выхлопного тракта, скорость и температуру выхлопных газов на выходе из выхлопного тракта, а также расположение выхлопной трубы относительно кабины машины;

- В качестве контрольных точек для измерения концентраций загрязняющих веществ в выработках, где находится машина с дизельным ДВС, в первую очередь следует выбирать точки, расположенные вблизи кабины водителя, а также сечение, отстоящее от машины на 30 м;

- Вычисление выбросов оксида углерода и окислов азота может быть осуществлено по полученным на основе обработки данных экспериментальных измерений корреляционным зависимостям, устанавливающим связь между величиной выбросов для различных режимов работы двигателя и его установленной мощности;

- При выборе величины удельного количества воздуха для разбавления загрязняющих веществ следует ориентироваться на величину выбросов окислов азота и их нормативную предельно допустимую концентрацию, установленную правилами безопасности. При этом максимальная величина удельного количества воздуха не должна превосходить $3 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{л.с.})$;

- Определение необходимого количества воздуха, обеспечивающего нормативные содержания загрязняющих веществ в рудничном воздухе, следует осуществлять на основе математического моделирования аэрогазовых и термодинамических процессов в системе «машина с ДВС — рудничный воздух — горная выработка», учитывающего как полученные экспериментально значения выбросов, так и реальные условия работы машин с ДВС, находящихся в выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Э. М., Качурин Н. М. Углекислый газ в угольных шахтах. — М.: Недра, 1987. — 141 с.

2. Sobatowo M. G. Mathematical models for the prediction of the effects of carbon-monoxide on human health under continuous and periodic exposures // Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 157–164.

3. Benbrahim-Tallaa L. Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes // The Lancet Oncology. 2012, vol. 13, no. 7, pp. 663–664. DOI: 10.1016/S1470-2045(12)70280-2.

4. Окасов Д. Т. Количество вентиляционного воздуха для снижения концентраций токсичных компонентов выхлопа машин с ДВС до ПДК в рудничном воздухе // Вестник ВКГУ. Геология, горное дело, металлургия. — 2007. — № 2. — С. 21–27.

5. 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. — С. 43–46.

6. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 99–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.

7. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 218–227. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

8. Зиновьева О. М., Кузнецов Д. С., Меркулова А. М., Смирнова Н. А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 113–123. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.

9. Grigorev E., Nosov V. Improving quality control methods to test strengthening technologies: a multilevel model of acoustic pulse flow // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 9, article 4549. DOI: 10.3390/app12094549.

10. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Wong W. Y., Mujumdar A. S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines // Science of the Total Environment. 2014, vol. 481, pp. 317–334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058.

11. Noll J. D., Patts L., Grau R. The effects of ventilation controls and environmental cabs on diesel particulate matter concentrations in some limestone mines / Proceedings of the 12th US/ North American Mine Ventilation Symposium. 2008, pp. 9–11.

12. Jundika C. K., Agus P. S., Wai Y. W., Arun S. M. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines // Science of the Total Environment. 2014, vol. 481, pp. 317–334.

13. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Magomet R. D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings // Journal of Applied Science and Engineering. 2020, vol. 24, no.1, pp. 105–110. DOI: 10.6180/jase.202102_24(1).0014.

14. Zinurov V. E., Nikandrova M. V., Kharkov V. V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector / Ural Smart Energy Conference (USEC 2020). 2020, pp. 68–71.

15. Halim A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines-Are we using the correct values / 16th North American Mine Ventilation Symposium. Golden, Colorado. 2017, pp. 1–7.

16. Haney R. A. Ventilation requirements for modern diesel engines / Nort American Mine Ventilation Symposium, Salt Lake City, Utah, USA, 2012, pp. 249–256.

17. Bugarski A. D. Diesel aerosols and gases in underground mines; guide to exposure assessment and control. Pittsburgh: PA. 2011, pp. 159.

18. Коршунов Г. И., Еремеева А. М., Дребенштедт К. Обоснование применения растительной добавки к дизельному топливу в качестве способа защиты подземного персонала угольных шахт от воздействия вредных выбросов дизель-гидравлических локомотивов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 39–47. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.5.

19. Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 623–632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

20. Sudarikov S., Narkevsky E., Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the mid-atlantic ridge as a result of the combined use of exploration methods: methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys // Minerals. 2021, vol. 11, no. 7, pp. 726. DOI: 10.3390/min11070726.

21. Смирняков В. В., Фьен Н. М. Обоснование методики аэрологической оценки мета-ноопасности при проведении подготовительных выработок на шахтах Вьетнама // Записки Горного института. — 2018. — Т. 230. — С. 197–203. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.197.

22. Николаев А. В., Файнбург Г. З. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. — № 14. — С. 92–98.

23. Tier 3 motor vehicle emissions and fuel standards, Federal Register. 2015, vol. 80, no. 33. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Sokolov E. M., Kachurin N. M. *Uglekislyy gaz v ugol'nykh shakhtakh* [Carbon dioxide in coal mines], Moscow, Nedra, 1987, 141 p.
2. Sobamowo M. G. Mathematical models for the prediction of the effects of carbon-monoxide on human health under continuous and periodic exposures. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 157 – 164.
3. Benbrahim-Tallaa L. Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet Oncology*. 2012, vol. 13, no. 7, pp. 663 – 664. DOI: 10.1016/S1470-2045(12)70280-2.
4. Okasov D. T. Quantity of ventilation air to reduce concentrations of toxic components of exhaust from machines with internal combustion engines to MPC in mine air. *Vestnik VKGTU. Geologiya, gornoe delo, metallurgiya*. 2007, no. 2, pp. 21 – 27. [In Russ].
5. Levin L. Y., Zaitsev A. V., Grishin E. L., Semin M. A. Calculation of air quantity by oxygen content for ventilation of working areas when using machines with internal combustion engines. *Occupational Safety in Industry*. 2015, no. 8, pp. 43 – 46. [In Russ].
6. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Aerodynamic control in open pit gold mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 99 – 107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
7. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the Arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 218–227. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.
8. Zinovieva O. M., Kuznetsov D. S., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 113–123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.
9. Grigorev E., Nosov V. Improving quality control methods to test strengthening technologies: a multilevel model of acoustic pulse flow. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 9, article 4549. DOI: 10.3390/app12094549.
10. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Wong W. Y., Mujumdar A. S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines. *Science of the Total Environment*. 2014, vol. 481, pp. 317 – 334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058.
11. Noll J. D., Patts L., Grau R. The effects of ventilation controls and environmental cabs on diesel particulate matter concentrations in some limestone mines. *Proceedings of the 12th US/ North American Mine Ventilation Symposium*. 2008, pp. 9 – 11.
12. Jundika C. K., Agus P. S., Wai Y. W., Arun S. M. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines. *Science of the Total Environment*. 2014, vol. 481, pp. 317 – 334.
13. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Magomet R. D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020, vol. 24, no. 1, pp. 105 – 110. DOI: 10.6180/jase.202102_24(1).0014.
14. Zinurov V. E., Nikandrova M. V., Kharkov V. V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. *Ural Smart Energy Conference (USEC 2020)*. 2020, pp. 68 – 71.
15. Halim A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines-Are we using the correct values. *16th North American Mine Ventilation Symposium*. Golden, Colorado. 2017, pp. 1 – 7.
16. Haney R. A. Ventilation requirements for modern diesel engines. *Nort American Mine Ventilation Symposium*, Salt Lake City, Utah, USA, 2012, pp. 249 – 256.
17. Bugarski A. D. *Diesel aerosols and gases in underground mines; guide to exposure assessment and control*. Pittsburgh: PA. 2011, pp. 159.
18. Korshunov G. I., Eremeeva A. M., Drebenstedt C. Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the

impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 39 – 47. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.5.

19. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Y., Zaitsev A. V. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623 – 632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

20. Sudarikov S., Narkevsky E., Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the mid-atlantic ridge as a result of the combined use of exploration methods: methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 7, pp. 726. DOI: 10.3390/min11070726.

21. Smirnyakov V. V., F'en N. M. Justification of a methodical approach of aerologic evaluation of methane hazard in development workings at mines of Vietnam. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 230, pp. 197 – 203. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.197.

22. Nikolaev A. V., Fainburg G. Z. On energy and resource-saving of underground oil mine workings. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2015, no. 14, pp. 92 – 98. [In Russ].

23. Tier 3 motor vehicle emissions and fuel standards, Federal Register. 2015, vol. 80, no. 33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Серегин Александр Сергеевич¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2897-8604,

Фазылов Ильдар Робертович¹ — аспирант,

e-mail: Fazylovir@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7975-9471,

Прохорова Елизавета Александровна¹ — аспирант,

e-mail: prokhorovaea96@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5018-1773,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Серегин А.С., e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Seregin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2897-8604,

I.R. Fazylov¹, Graduate Student,

e-mail: Fazylovir@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7975-9471,

E.A. Prohorova¹, Graduate Student,

e-mail: prokhorovaea96@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5018-1773,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.S. Seregin, e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 25.10.2021; получена после рецензии 09.03.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 25.10.2021; received after the review 09.03.2022; accepted for printing 10.10.2022.

