

Экспериментальное определение количества воздуха, необходимого для проветривания рудника по фактору разбавления выбросов загрязняющих веществ от машин с двигателями внутреннего сгорания

С.Г. Гендлер¹, А.С. Серёгин^{1, 2}, И.Р. Фазылов¹, П.А. Белехов¹ , М.А. Подрезова¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «НПИ «Недра», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

 belekhovpavel@mail.ru

Резюме: Натурные исследования были осуществлены при различных режимах работы двигателей внутреннего сгорания для парка машин, эксплуатируемых на руднике. Отдельное внимание было уделено определению компонентного состава рудничной атмосферы в рабочих зонах машин с двигателями внутреннего сгорания, а также анализу эффективности разбавления выхлопных газов свежей вентиляционной струей, подаваемой в рабочие зоны. На основании натурных и теоретических исследований осуществлён анализ количества воздуха, необходимого для обеспечения нормативных параметров рудничного воздуха, отвечающих требованиям правил безопасности.

Результаты проведённых расчетов позволили определить для каждого типа самоходного дизельного оборудования, входящего в состав подземного машинного парка подземного рудника, требуемые удельные показатели расхода свежего воздуха, необходимого для подачи в горные выработки с эксплуатируемыми в них машинами с двигателями внутреннего сгорания для того, чтобы не допускать превышений уровней предельно допустимых концентраций компонентов выхлопных газов в горных выработках и на рабочих местах.

Ключевые слова: загрязнение подземных горных выработок, выхлопные газы, дизельный двигатель внутреннего сгорания, проветривание горных выработок

Для цитирования: Гендлер С.Г., Серёгин А.С., Фазылов И.Р., Белехов П.А., Подрезова М.А. Экспериментальное определение количества воздуха, необходимого для проветривания рудника по фактору разбавления выбросов загрязняющих веществ от машин с двигателями внутреннего сгорания. *Горная промышленность*. 2025;(6):173–180. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-173-180>

Experimental determination of the amount of air required for mine ventilation in terms of the dilution factor of pollutant emissions from internal combustion engines

S.G. Gandler¹, A.S. Seregin^{1, 2}, I.R. Fazylov¹, P.A. Belekhov¹ , M.A. Podrezova¹

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

²NPI Nedra LLC, Russian Federation

 belekhovpavel@mail.ru

Abstract: Field studies of internal combustion engines (ICEs) were carried out under various operating modes for a fleet of machines operated in a mine. Special attention was paid to determining the component composition of the mine atmosphere in the working areas of machines with ICEs, as well as to analyzing the efficiency of diluting exhaust gases with fresh ventilation air supplied to the working areas. The amount of air required to ensure the regulatory parameters of the mine air that meet the requirements of the Safety Regulations was determined based on the field and theoretical studies.

The results of the calculations allowed us to determine the required specific consumption of fresh air for each type of underground diesel-engine mining machines in the park, in order to ensure that the levels of the exhaust gas components in the mine workings and workplaces do not exceed the permissible limits.

Keywords: pollution of underground mine workings, exhaust gases, diesel internal combustion engine, ventilation of mining operations

For citation: Gendler S.G., Seregin A.S., Fazylov I.R., Belekhov P.A., Podrezova M.A. Experimental determination of the amount of air required for mine ventilation in terms of the dilution factor of pollutant emissions from internal combustion engines. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):173–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-173-180>

Введение

Активно развивающийся тренд горной отрасли по повышению глубины ведения подземных горных работ, а также значительное увеличение объемов и эффективности добычи твердых полезных ископаемых свидетельствуют о необходимости строгого соблюдения установленных норм и правил в области промышленной безопасности [1; 2]. Высокие показатели глубины и производительности подземных работ увеличивают потенциальные риски возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с обрушениями, внезапными выбросами газов, авариями на технологическом оборудовании [3]. Подземные горные работы характеризуются повышенной сложностью и степенью опасности, что обуславливает необходимость применения систематического подхода к управлению вентиляцией и мониторингу качества воздуха [4; 5]. Эффективное проветривание горных выработок является критически важным для обеспечения безопасной работы персонала, так как оно позволяет предотвращать накопление токсичных и взрывоопасных газов, таких как метан и угарный газ [6–8]. Современные технологии проветривания подземных горных выработок включают в себя автоматизированные средства мониторинга и моделирования воздушных потоков, которые обеспечивают повышение эффективности и оптимизацию процесса проветривания подземного пространства [9–11]. В условиях стремительного развития горнорудной промышленности отрасли при ведении подземных горных работ, включая проходку горных выработок, погрузку и транспортировку полезных ископаемых и горной массы, благодаря своей надежности и эффективности широкое распространение получило самоходное дизельное оборудование (СДО) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Вместе с тем СДО с ДВС –

это основной источник значительного количества вредных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду [12–14], что особенно важно для условий подземных горных выработок. Так, концентрации компонентов выхлопных газов дизельного оборудования могут достигать уровней, опасных для здоровья персонала [15–17].

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных компонентов выхлопных газов дизельного оборудования с двигателями внутреннего сгорания в воздухе рабочей зоны и на рабочих местах регламентируются в соответствии с приказом от 8 декабря 2020 г. №505 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»¹. Согласно п. 181 этого приказа содержание кислорода по объему не должно быть менее 20%, а вредных компонентов ВГ не должно превышать значений в табл. 1 [18; 19].

Правилами запрещается использование дизельных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания в подземных горных выработках, в которых осуществляется подача недостаточного для разбавления компонентов выхлопных газов до предельно допустимой концентрации (ПДК) количества свежего воздуха [20]. В условиях растущей глобализации европейские стандарты Euro/Stage в определенной степени гармонизированы с американскими нормами Tier. В нашей стране с 2011 г. все транспортные средства, произведенные или ввезенные на территорию нашей страны, должны были соответствовать стандартам Евро 3, а с 2014 г. стандартам Евро 4 [21; 22].

Использование новых экологических стандартов дизельного топлива, характеризующихся более низкими показателями выбросов загрязняющих веществ, а также примене-

Таблица 1
Предельно-допустимые концентрации ядовитых газов, содержащихся в выбросах отработанных газов, в рудничной атмосфере (% по объему/мг/м³)

Table 1
Maximum permissible concentrations of toxic gases contained in the exhaust gases in the mine atmosphere (% by volume/mg/m³)

| Наименование ядовитых газов (паров) | Формула | Предельно допустимая концентрация газа в действующих выработках шахт | |
|---|----------------------------------|--|-------------------|
| | | % по объему | мг/м ³ |
| Окись углерода (оксид углерода) | CO | 0,0017 | 20 |
| Окислы азота (оксиды азота) в пересчете на NO ₂ | NO ₂ | 0,00026 | 5 |
| Сернистый газ (диоксид серы, сернистый ангидрид) | SO ₂ | 0,00038 | 10 |
| Сероводород | H ₂ S | 0,00071 | 10 |
| Акролеин | C ₃ H ₄ O | 0,000009 | 0,2 |
| Формальдегид | CH ₂ O | 0,00004 | 0,5 |
| Ртуть металлическая | Hg | - | 0,01 |
| Аммиак | NH ₃ | 0,0025 | 20 |
| Углеводороды алифатические (C ₁ –C ₁₀) предельные в пересчете на углерод | C _n H _{2n+2} | - | 300 |

¹ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности Инструкция по аэробиологической безопасности угольных шахт: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 дек. 2020 г. №505.

ние высокоэффективных систем очистки выхлопных газов обусловливают предпосылки для снижения нормы удельного расхода воздуха, подаваемого для проветривания горных выработок [23; 24]. С целью обоснования возможности снижения требуемых для проветривания подземных горных выработок величин расходов подаваемого воздуха на л.с. мощности используемого СДО с ДВС предприятия реализовывают проведение научно-исследовательских работ [25; 26].

В рамках отечественных исследований подобные методические разработки реализованы в ГМК «Норильский никель»² и АО «Апатиты»³. Проведённые исследования и экспериментальные работы подтвердили возможность снижения удельных нормативов расхода воздуха до 3 м³/мин на л.с. [27].

Материалы и методы

Нормы удельного расхода воздуха по фактору разбавления отработанных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) для машинного парка должны базироваться на результатах измерений фактических характеристик выбросов загрязняющих веществ при работе горнотранспортного оборудования с ДВС и их влияния на распределение концентраций СО и NOx в рудничном воздухе за стационарно стоящей машиной с ДВС [28; 29], выбранной в качестве исследуемой, около кабины водителя в случае движения этой машины, а также определения параметров выбросов загрязняющих веществ для всего машинного парка.

Методика проведения натурных измерений выброса загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах, включала следующую последовательность:

Анализ актуального парка горнотранспортного оборудования с ДВС шахты по показателям, включающим определение модели каждой единицы горнотранспортного оборудования, года выпуска каждой единицы горнотранспортного оборудования (экологический стандарт двигателя), типа двигателя [30], его установленной мощности, наработки ДВС в (м.ч.) для каждой единицы горнотранспортного оборудования [31].

Группировка машин и выбор конкретных машин для дальнейшего проведения измерений интенсивности выброса и его токсичности, которые бы удовлетворяли следующим условиям: одинаковый экологический стандарт для серии исследуемых машин с ДВС, одинаковый тип двигателя.

В рамках выполненных исследований для каждой из выбранных эксплуатируемых на шахте СДО с дизельными двигателями внутреннего сгорания, работающих в режимах холостого хода и на максимальной нагрузке, были определены следующие основные параметры: геометрия выхлопной трубы СДО, скорости газов (при разной нагрузке на двигатель СДО) и величины температуры и концентраций компонентов выхлопных газов (NO_x, CO).

Перед проведением отбора проб двигатель устойчиво работал в заданных режимах не менее 0,1 ч для того, чтобы сформировать необходимые и установившиеся условия для проведения эксперимента. Отбор проб осуществлялся в непосредственной близости к выхлопному тракту таким образом, чтобы исключить взаимодействие и перемешивание выхлопных газов с воздушной средой подземной горной выработки [32].

При осуществлении натурных измерений концентраций СО и NO_x в рудничной атмосфере были соблюдены следующие условия:

- протяженность выработки не менее 100 м;
- на выбранном участке должны отсутствовать сопряжения с другими выработками;
- поперечное сечение выработки должно быть постоянным;
- при использовании тупиковой выработки расстояние до забоя должно быть не менее 15 м;
- возможность изменения расхода воздуха в горной выработке.

При отборе проб отработавших газов отборщик проб находился на входящей вентиляционной струе по отношению к выхлопу. В рассматриваемой выработке транспортное средство располагалось статично, а измерение концентраций СО и NOx осуществлялось в сечениях, расположенных на различных расстояниях от работающей машины. В поперечном сечении выработки замерщик располагается лицом к потоку, пробоотборный штуцер располагает на вытянутых руках перед собой. Расстояние между первым поперечным сечением и машиной 5–15 м, каждое последующее 5–10 м (рис. 1).

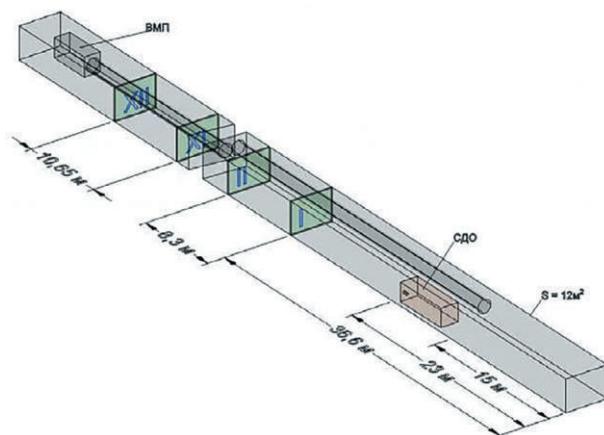


Рис. 1
Взаимное расположение сечений измерений в горной выработке

Fig. 1
Positional relationship of the measurement sections in the mine working

В каждом выбранном поперечном сечении с целью фиксации распределения температурных полей непрерывно в течение всего периода проведения исследований устанавливался термограф. Измерения концентраций вредных примесей в воздушной среде прекращались при условии, что изменение фиксируемых значений компонентов загрязняющих веществ, входящих в состав вытяжных газов, не превышало значения 10% по сравнению с предшествующими измерениями в данном поперечном сечении.

Концентрацииmonoоксида углерода и оксидов азота вблизи кабины машиниста самоходного оборудования измерялись в рабочей зоне (зона дыхания водителя машины) [33; 34]. При этом пробоотборный штуцер располагается таким образом, чтобы выдыхаемый работником воздух не оказался в зоне прямого влияния на показания датчика. Время измерения не менее 10 мин. По завершении измерений в протокол измерений заносились средние показатели концентраций за период измерений [35; 36].

² Методика расчёта количества воздуха, необходимого для проветривания и организации проветривания рудника «Северный» ОАО «Кольская ГМК».

³ Методика расчета количества воздуха и организации проветривания подземных рудников АО «Апатиты». Апатиты; 2015.

Расход воздуха устанавливался исходя из значений удельного расхода, измеренного в м³/мин/л.с., который для первой серии эксперимента составлял 3,5 м³/мин/л.с., а во второй и третьей серии эксперимента – соответственно 1,55 м³/мин/л.с. и 2,5 м³/мин/л.с.

Обсуждение и результаты

Для эксперимента выбран ПДМ ST-2D (СДО №1), работающий при проходке выработки, при этом на момент проведения измерений наработка машины после последнего капитального ремонта составляла около 9000 м/ч. Выбранная для эксперимента СДО обладает наибольшим временем наработки из основных технологических машин. Предполагалось, что наибольшее количество отработанных моточасов могло привести к нарушению работы системы очистки выхлопных газов, изменениям в подготовке топливной смеси, что могло негативно сказаться на концентрациях выхлопных газов. Таким образом, для экспериментальных целей был выбран наиболее пессимистичный вариант. Исследуемая машина оборудована четырехтактным дизельным двигателем с объемом 6,128 л, мощностью 84 л.с. Двигатель имеет рядное расположение 6 цилиндров. Топливо подается непосредственным впрыском в камеру сгорания. Система подачи воздуха не оборудована турбиной.

Место проведения измерений соответствовало всем предъявляемым требованиям методики эксперимента. Для регулирования подачи вентилятора путем перекрытия всаса вентилятора металлическим шибером устанавливалась различная подача вентилятора. Путем контроля расхода воздуха, выходящего из вентиляционного става в забое, были установлены три вентиляционных режима для эксперимента:

- с расходом воздуха 295 м³/мин (3,51 м³/мин/л.с.);
- с расходом воздуха 210 м³/мин (2,5 м³/мин/л.с.);
- с расходом воздуха 130 м³/мин (1,55 м³/мин/л.с.).

Проведенные с целью определения величин выбросов загрязняющих веществ натурные замеры позволили определить численные показатели объемной концентрации компонентов выхлопных газов, включая их температурные значения, а также объемные концентрации монооксида углерода (СО) и оксидов азота (NO_x) (в пересчете на диоксид азота). Эти измерения проводились при эксплуатации СДО с двигателями внутреннего сгорания в условиях тупиковой горной выработки. На основе полученных экспериментальных данных были построены графические зависимости, отражающие средние арифметические значения концентраций каждого из исследуемых компонентов в газовой смеси. Построенные графики отражают зависимость среднеарифметических величин объемных концентраций от расстояния от выхлопной трубы (рис. 2).

Как видно из результатов измерений полей концентраций, при расходе воздуха 3,5 м³/мин/л.с. концентрация СО достигает значений, не превышающих ПДК на расстоянии 13,6 м (что соответствует сечению I) от источника вредных газов (выхлоп СДО), при этом концентрация NO_x разбавляется до ПДК только на расстоянии 61,2 м (что соответствует сечению VII) от источника.

В случае когда воздух подается в количестве равном 2,5 м³/мин/л.с., концентрация NO_x превышает ПДК и составляет 112%, а при подаче 1,55 м³/мин/л.с. превышение ПДК NO_x составляет 142%.

Удельная величина интенсивности выбросов СО и NO_x из выхлопной трубы СДО рассчитывается по следующей формуле, мг/с на 1 л.с.,

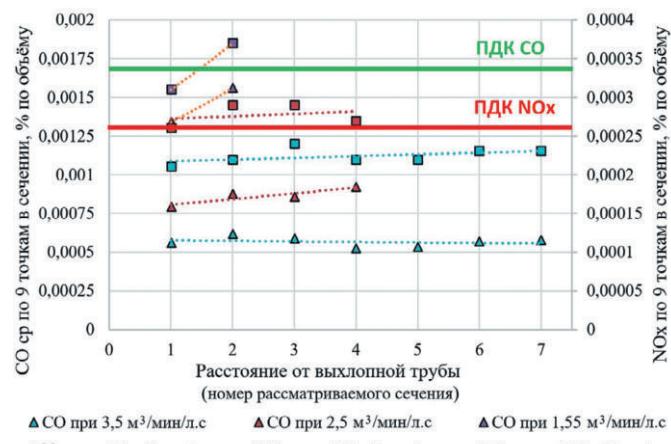


Рис. 2

Результаты измерений полей концентраций монооксида углерода и оксидов азота по сечениям при различных удельных расходах воздуха для оксидов азота и монооксида углерода

Fig. 2

Results of measuring carbon monoxide and nitrogen oxide concentration fields across cross-sections at different specific air flow rates for nitrogen oxides and carbon monoxide

$$J_{уди} = \frac{10C_iMPvS}{RTN}, \quad (1)$$

где C_i – объёмная концентрация загрязняющего компонента в выхлопных газах, %; v – скорость выхлопных газов, м/с; S – поперечное сечение выхлопного тракта в месте измерения скорости потока, м²; N – мощность ДВС, л.с.; M – молярная масса компонента; P – полное давление выхлопных газов, вычисленное как сумма барометрического давления в выработке и динамического давления, Па; T – температура газов, К.

В табл. 2 приведены результаты измерений концентраций СО и NO_x на выходе из выхлопного тракта, его сечения и скорости истечения потока выхлопных газов для горнотранспортного оборудования СДО, минимальные удельные расходы воздуха, требуемые для снижения концентрации выхлопных газов до безопасных значений, которые были определены для всего парка СДО шахты.

Наибольшее значение удельного выброса оксидов азота получено для машин СДО №1 и СДО №17. Эти машины оборудованы конструктивно схожими между собой двигателями и характеризуются наибольшим из всех остальных рассматриваемых типов СДО значением работы двигателя (моточасов). Вследствие этого они требуют подачи наибольшего количества воздуха для понижения концентраций вредных компонентов выхлопных газов дизельного транспортного оборудования до соответствующих значений ПДК.

Результаты измерения концентраций монооксида углерода и оксидов азота на рабочем месте водителя (непосредственно в кабине) для других типов машин из парка горнотранспортной техники представлены в табл. 3.

В рамках проведенных измерений компонентов выхлопных газов было осуществлено детальное определение концентрационных уровней двух основных загрязняющих компонентов: монооксида углерода (СО) и оксидов азота (NO_x). Анализ полученных данных показал, что значения концентраций монооксида углерода (СО) и оксидов азота

Таблица 2

Результаты измерений концентраций, сечения выхлопного тракта и скорости потока выхлопных газов СДО и минимальные удельные расходы воздуха, требуемые для снижения концентрации выхлопных газов до безопасных значений

Table 2

Results of measuring concentrations, exhaust duct cross-section and exhaust gas flow rate of the mobile diesel equipment, and the minimum specific air consumption required to reduce the exhaust gas concentrations to safe levels

| Номер СДО | Мощность ДВС, л.с. | Объем ДВС, л | Площадь сечения выхлопных труб, м ² | Температура выхлопных газов, °С | | Расход выхлопных газов, м ³ /мин | | CO | NO _x | Требуемый удельный расход, м ³ /мин /л.с. (Qуд) |
|-----------|--------------------|--------------|--|---------------------------------|------------|---|-------------|-------|-----------------|--|
| | | | | хол. ход | макс. обор | хол. ход | макс. обор. | | | |
| СДО №1 | 84 | 6,128 | 0,0042 | 122 | 163 | 6,38 | 11,62 | 0,032 | 0,0118 | 3,51 |
| СДО №2 | 75 | 3,6 | 0,0041 | 27 | 34 | 3,80 | 19,61 | 0,021 | 0,0038 | 2,93 |
| СДО №3 | 88,37 | 6,5 | 0,0031 | 59 | 89 | 4,12 | 23,94 | 0,02 | 0,0041 | 2,15 |
| СДО №4 | 217,54 | 7,7 | 0,0086 | 173 | 196 | 5,81 | 20,08 | 0,03 | 0,007 | 2,65 |
| СДО №5 | 165 | 10,5 | 0,0184 | 83 | 102 | 2,82 | 11,80 | 0,018 | 0,0039 | 3,06 |
| СДО №6 | 232 | 7,1 | 0,0099 | 20 | 180 | 3,18 | 10,29 | 0,045 | 0,009 | 2,35 |
| СДО №7 | 150 | 6,472 | 0,0065 | 60 | 75 | 2,83 | 11,68 | 0,042 | 0,009 | 2,94 |
| СДО №8 | 220 | 6,7 | 0,0065 | 70 | 103 | 4,34 | 16,87 | 0,052 | 0,0089 | 2,84 |
| СДО №9 | 102 | 4,04 | 0,0039 | 165 | 193 | 4,25 | 17,47 | 0,04 | 0,0088 | 2,85 |
| СДО №10 | 175 | 4,8 | 0,0035 | 163 | 183 | 2,99 | 17,98 | 0,055 | 0,0095 | 1,77 |
| СДО №11 | 163,15 | 4,8 | 0,0068 | 102 | 115 | 6,38 | 9,58 | 0,043 | 0,0085 | 1,97 |
| СДО №12 | 78,86 | 6,5 | 0,0125 | 140 | 200 | 2,38 | 5,41 | 0,038 | 0,0072 | 2,93 |
| СДО №13 | 176 | 6,6 | 0,0066 | 60 | 79 | 4,06 | 17,78 | 0,037 | 0,0064 | 2,91 |
| СДО №14 | 75 | 3,6 | 0,0057 | 45 | 89 | 4,11 | 20,08 | 0,017 | 0,003 | 2,93 |
| СДО №15 | 163,15 | 12,8 | 0,0056 | 121 | 177 | 9,02 | 13,71 | 0,062 | 0,0092 | 2,68 |
| СДО №16 | 217,54 | 7,7 | 0,0086 | 173 | 196 | 5,94 | 19,68 | 0,035 | 0,008 | 2,96 |
| СДО №17 | 103,3 | 6,5 | 0,0118 | 36 | 46 | 1,26 | 4,45 | 0,033 | 0,009 | 3,20 |

Таблица 3

Результаты измерения концентраций выхлопных газов в кабине водителя при движении СДО

Table 3

Results of measuring exhaust gas concentrations in the operator's cabin when driving the mobile diesel equipment

| Номер СДО | Удельный расход, м ³ /мин /л.с. (Qуд) | Концентрации компонентов в кабине | |
|-----------|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| | | CO, % по объёму | NO _x , % по объёму |
| СДО №1 | 3,50 | 0,00005 | 0,00002 |
| СДО №2 | 7,52 | 0,00020 | 0,00002 |
| СДО №3 | 6,99 | 0,00015 | 0,00003 |
| СДО №4 | 6,51 | 0,00014 | 0,00002 |
| СДО №5 | 7,49 | 0,00022 | 0,00004 |
| СДО №6 | 7,50 | 0,00012 | 0,00002 |
| СДО №7 | 6,52 | 0,00019 | 0,00003 |
| СДО №8 | 6,00 | 0,00020 | 0,00004 |
| СДО №9 | 6,00 | 0,00019 | 0,00004 |
| СДО №10 | 6,51 | 0,00020 | 0,00003 |
| СДО №11 | 6,51 | 0,00005 | 0,00002 |
| СДО №12 | 6,47 | 0,00004 | 0,00002 |
| СДО №13 | 6,00 | 0,00012 | 0,00004 |
| СДО №14 | 6,48 | 0,00009 | 0,00002 |
| СДО №15 | 5,99 | 0,00015 | 0,00003 |
| СДО №16 | 7,50 | 0,00017 | 0,00003 |
| СДО №17 | 6,51 | 0,00007 | 0,00002 |

(NO_x) в атмосфере рабочей зоны машинистов всего машинного парка самоходного дизельного оборудования соответствуют установленным нормативно-техническим требованиям и не превышают допустимых пределов, определенных действующими нормативными документами для условий рабочей зоны. Максимальные показателиmonoоксида углерода были зафиксированы в кабине машиниста СДО №5, а оксида азота – в СДО №13, 9, 8 и 5 и равнялись концентрации 0,00022% и 0,00004% соответственно.

Заключение

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований представляется возможным сформулировать следующие основные выводы:

Разбавление вредных газов до нормативных концентраций осуществляется за счёт подачи свежего воздуха в рабочую зону, при этом для удобства расчётов определяется норма расхода воздуха Q (м³/мин на 1 л.с.) мощности двигателя. Этот показатель зависит от нескольких факторов: экологического класса двигателя, технического состояния каталитической системы и системы очистки выхлопных газов, а также от режима работы двигателя (нагрузки на двигатель). Это определяет степень загрязнения рудничной атмосферы конкретной техникой с ДВС.

Главным параметром, являющимся характеристикой безопасной эксплуатации в подземных горных выработках транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, является концентрация в рудничном воздухе оксидов азота. Для исследуемой машины эти показатели СДО №1 находятся в интервале 0,00021–0,00037%, причем первое значение соответствует максимальному расходу воздуха 4,9 м³/с (3,51 м³/мин на л.с.), а второе – минимальному рас-

ходу воздуха 2,17 м³/с (1,55 м³/мин на л.с.). Выбросы оксидов азота для этой машины составляют 1,05 г/ч на л.с., что пре-восходит выбросы NO_x других типов машин с дизельными ДВС, эксплуатируемых на подземном руднике. Причиной этого следует считать наибольшую по сравнению с другими типами машин продолжительность работы двигателя (моточасы).

Вычисления значений выбросов NO_x и связанных с ними удельных расходов воздуха показали, что для СДО из машинного парка подземного рудника величины удельного расхода воздуха не будут превосходить 1,76–2,98 м³/мин на 1 л.с. в зависимости от типа дизельного оборудования, за исключением СДО №17 – 3,2 м³/мин на л.с. и СДО №1 – 3,51 м³/мин на л.с.

Список литературы / References

1. Родионов В.А., Карпов Г.Н., Лейсле А.В. Методологический подход к оценке взрывопожароопасных свойств суль-фидсодержащих полиметаллических руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;,(6-1):198–213. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_198
Rodionov V.A., Karpov G.N., Leisle A.V. Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;,(6-1):198–213. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_198
2. Коршунов Г.И., Никулин А.Н., Красноухова Д.Ю. Разработка рекомендаций по управлению профессиональными ри-сками работников горнообогатительного комбината. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):199–214. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_199
Korshunov G. I., Nikulin A. N., Krasnoukhova D. Yu. Development of recommendations for professional risk management of employees of the mining and processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):199–214. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_199
3. Chang P., Xu G., Zhou F., Mullins B., Abishek S., Chalmers D. Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;87:112–121. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.014>
4. Rudakov M.L., Kolvakh K.A., Derkach I.V. Assessment of environmental and occupational safety in mining industry during underground coal mining. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2020;11(3):579–588. [https://doi.org/10.14505/jemt.v11.3\(43\).10](https://doi.org/10.14505/jemt.v11.3(43).10)
5. Жихарев С.Я., Цыганков В.Д., Родионов В.А., Исаевич А.Г. Оптимизация процессов пылеподавления при ведении под-земных горных работ на основе данных натурных экспериментов и моделирования в программе ANSYS Fluent. *Гор-ный журнал*. 2023;(11)70–75. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.11.11>
Zhikharev S.Ya., Tsygankov V.D., Rodionov V.A., Isaevich A.G. Optimization of dust suppression processes during underground mining based on full-scale experimentation and ANSYS Fluent simulation. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(11)70–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.11.11>
6. Лесин А.В., Исаев А.В., Тонконогов Б.П., Дунаев С.В., Куликов А.Б. Математическая модель зависимости динамической вязкости моторных масел от температуры, концентрации сажи и ее морфологии. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):485–496. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496>
Lesin A.V., Isaev A.V., Tonkonogov B.P., Dunaev S.V., Kulikov A.B. A mathematical model of the dynamic viscosity dependence of motor oils on temperature, soot concentration, and its morphology. *Fine Chemical Technologies*. 2024;19(6):485–496. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496>
7. Марчук Н.А., Таланова В.А., Кулентсан А.Л. Анализ выбросов загрязняющих веществ различными источниками. *Modern Science*. 2022;(2-1):35–39.
Marchuk N.A., Talanova V.A., Kulentsan A.L. Analysis of pollutant emissions from various sources. *Modern Science*. 2022; (2-1):35–39. (In Russ.)
8. Verschaeren R., Verhelst S. Increasing exhaust temperature to enable after-treatment operation on a two-stage turbocharged medium speed marine diesel engine. *Energy*. 2018;147:681–687. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.081>
9. Волкодаваева М.В., Володина Я.А. Развитие методов пробоотбора при мониторинге атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны предприятий минерально-сырьевого комплекса. *Горный информационно-аналитиче-ский бюллетень*. 2023;(3):72–82. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_72
Volkodavaeva M.V., Volodina Ya.A. Methods of sampling in atmospheric air monitoring at sanitary protection zone boundary of mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(3):72–82. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_72
10. Чеботарёв А.Г., Гибадулина И.Ю., Горячев Н.С. Загрязнение рудничной атмосферы при использовании самоходного оборудования с дизельным приводом и мероприятия по её нормализации. *Горная промышленность*. 2019;(2):74–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-74-76>
Chemotaryov A.G., Gibadulina I.Yu., Goryachev N.S. Contamination of mine air with exhaust gases of self-propelled machinery and proposed corrective measures. *Russian Mining Industry*. 2019;(2):74–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-74-76>
11. Романченко С.Б., Нагановский Ю.К., Корнев А.В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности гор-ных выработок. *Записки Горного института*. 2021;252:927–936. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.14>
Romanchenko S.B., Naganovskiy Y.K., Kornev A.V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:927–936. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.14>

12. Muralidharan K., Vasudevan D. Applications of artificial neural networks in prediction of performance, emission and combustion characteristics of variable compression ratio engine fuelled with waste cooking oil biodiesel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2015;37(3):915–928. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0213-4>
13. Balasubramanian D., Hoang A.T., Venugopal I.P., Shanmugam A., Gao J., Wongwuttanasatian T. Numerical and experimental evaluation on the pooled effect of waste cooking oil biodiesel/diesel blends and exhaust gas recirculation in a twin-cylinder diesel engine. *Fuel*. 2021;287:119815. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119815>
14. Stoumpos S., Theotokatos G. Multiobjective optimisation of a marine dual fuel engine equipped with exhaust gas recirculation and air bypass systems. *Energies*. 2020;13(19):5021. <https://doi.org/10.3390/en13195021>
15. Yi H., Park J., Kim M.S. Characteristics of mine ventilation air flow using both blowing and exhaust ducts at the mining face. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34(3):1167–1174. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0218-0>
16. Серегин А.С., Ахтымов К.Д., Фазылов И.Р., Белехов П.А. Влияние расположения вентиляционного трубопровода на эффективность проветривания тупиковой горной выработки при эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания. *Горный журнал*. 2025;(5):66–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.05.09>
Seregin A.S., Akhtyamov K.D., Fazylov I.R., Belekhov P.A. Influence of ventilation pipe location on airing efficiency in blind drift during operation of machines with internal combustion engines. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(5):66–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.05.09>
17. Дацко Р.Э., Романов И.С. Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н). *Записки Горного института*. 2021;247:20–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>
Dashko R.E., Romanov I.S. Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region, Anadyr district). *Journal of Mining Institute*. 2021;247:20–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>
18. Woo J.R., Choi H., Ahn J. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017;51:340–350. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.005>
19. Bickert S., Kampker A., Greger D. Developments of CO₂-emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015;36:138–151. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.004>
20. Davis M.E., Hart J.E., Laden F., Garshick E., Smith T.J. A Retrospective Assessment of Occupational Exposure to Elemental Carbon in the U.S. Trucking Industry. *Environmental Health Perspectives*. 2011;119(7):997–1002. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002981>
21. Rogers A., Davies B. Diesel particulates – recent progress on an old issue. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2005;49(6):453–456. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mei020>
22. Borak J., Bunn W.B., Chase G.R., Hall T.A., Head H.J., Hesterberg T.W. et al. Comments on the diesel exhaust in miners study. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2011;55(3):339–342, <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer005>
23. Park R.M. Risk assessment for conventional diesel exhaust (before 1990) and lung cancer in a cohort of miners. *Risk Analysis*. 2024;44(6):1413–1429. <https://doi.org/10.1111/risa.14231>
24. Zeraati-Rezaei S., Alam M.S., Xu H., Beddows D.C., Harrison R.M. Size-resolved physico-chemical characterization of diesel exhaust particles and efficiency of exhaust aftertreatment. *Atmospheric Environment*. 2020;222:117021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117021>
25. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания. *Горное эхо*. 2020;(3):120–123. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.23>
Nakaryakov E.V., Grishin E.L. Analysing the impact of the load-and-haul machine's production cycle on the ventilation efficiency in a blind stope. *Gornoe Ekho*. 2020;(3):120–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.23>
26. Beloglazov I., Morenov V., Leusheva E. Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2021;30(4):43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.11.001>
27. Wagner G.R., Michaels D. Invited perspective: Diesel exhaust and lung cancer – delayed findings confirmed, but consequences continue. *Environmental Health Perspectives*. 2023;131(8):081301. <https://doi.org/10.1289/EHP13258>
28. Кашников А.В., Круглов Ю.В. Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики. *Записки Горного института*. 2023;262:594–605. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.75>
Kashnikov A.V., Kruglov Y.V. Strategy of mine ventilation control in optimal mode using fuzzy logic controllers. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:594–605. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.75>
29. Kuzmin K.A., Kosolapova S.M., Rudko V.A. Investigating the mechanism of action of polymer pour point depressants on cold flow properties of biodiesel fuels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024;702(Part 1):134971. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134971>
30. 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 air quantity on oxygen content for ventilation of the working areas when using machines with internal-combustion engine. *Occupational Safety in Industry*. 2015;(8):43–46. (In Russ.)

31. Benbrahim-Tallaa L., Baan R.A., Grosse Y., Lauby-Secretan B., El Ghissassi F., Bouvard V. et al. Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet Oncology*. 2012;13(7):663–664. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(12\)70280-2](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(12)70280-2)
32. Кречманн Ю., Плиен М., Нгуен Т.Х.Н., Рудаков М.Л. Эффективное наращивание потенциала в горном деле за счет обучения, расширяющего возможности в области управления охраной труда. *Записки Горного института*. 2020;242:248–256. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.248>
Kretschmann J., Plien M., Nguyen T.H.N., Rudakov M.L. Effective capacity building by empowerment teaching in the field of occupational safety and health management in mining. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:248–256. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.248>
33. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Сгорание и тепловыделение в дизеле, работающем на смесевом спиртовом топливе. *Двигателестроение*. 2019;(2):26–31.
Likhanov V.A., Lopatin O.P. Combustion and heat release in engine firing fuel-spirit mix. *Engines Construction*. 2019;(2):26–31. (In Russ.)
34. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Коликов К. С. Управление аэробиологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6):85–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94>
Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kolikov K. S. Aerobiological risk management in designing, operation, closure and temporary shutdown of coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6):85–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94>
35. Чеботарёв А.Г., Гибадулина И.Ю., Горячев Н.С. Гигиеническая оценка физико-химических свойств рудничного аэрозоля. Профессиональная патология горнорабочих, обслуживающих самоходное дизельное оборудование. *Горная промышленность*. 2020;(2):130–135. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-2-130-135>
Chebotarev A.G., Gibadulina I.Yu., Goryachev N.S. Hygienic assessment of physical and chemical properties of mine aerosol. occupational pathology of mine technicians who service mobile diesel equipment. *Russian Mining Industry*. 2020;(2):130–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-2-130-135>
36. Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В. Правила безопасности в угольных шахтах. *Горная промышленность*. 2019;(2):42–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-42-46>
Novikov A.V., Panevnikov K.V., Pisarev I.V. Safety rules for underground coal mines. *Russian Mining Industry*. 2019;(2):42–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-2-144-42-46>

Информация об авторах

Гендлер Семён Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>; e-mail: sgendler@mail.ru

Серёгин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; заместитель директора ООО «НПИ «Недра», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2897-8604>; e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru

Фазылов Ильдар Робертович – ассистент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7975-9471>; e-mail: fazyllov_IR@pers.spmi.ru

Белехов Павел Александрович – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: belekhovpavel@mail.ru

Подрезова Мария Андреевна – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-7009-0194>

Information about the authors

Semyon G. Gandler – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Production Safety, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>; e-mail: sgendler@mail.ru

Aleksandr S. Seregin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; Deputy Director of NPI Nedra LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2897-8604>; e-mail: seregin_as@pers.spmi.ru

Ildar R. Fazylov – Assistant Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7975-9471>; e-mail: Fazylov_IR@pers.spmi.ru

Pavel A. Belekhov – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: belekhovpavel@mail.ru

Maria A. Podrezova – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-7009-0194>

Article info

Received: 30.08.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 24.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.08.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 24.10.2025