

# Исследование влияния эксплуатационно-конструкционных характеристик дизельной техники на загазованность подземных горных выработок

С.Г. Гендлер<sup>1</sup>, А.С. Серёгин<sup>2</sup>, П.А. Белехов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «НПИ «НЭДРА», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ belekhovpavel@mail.ru

**Резюме:** Превышение концентраций вредных компонентов выхлопных газов подземного горного дизельного транспорта с двигателями внутреннего сгорания оказывает негативное влияние на здоровье работающих под землёй. В рамках данного исследования с применением компьютерного моделирования был проведен анализ зависимости эффективности разбавления выхлопных газов горных дизельных подземных машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, от положения места выброса выхлопных газов в подземной горной выработке. Основное внимание уделялось влиянию расположения выхлопной трубы, а также нагрузке на двигатель на данные параметры. В результате анализа был установлен ряд соотношений между расходами свежего воздуха и выхлопными газами для различных конфигураций выхлопной трубы на дизельной технике. Найденных отношений величин расходов воздуха к величинам расходов выхлопных газов рекомендуется придерживаться исходя из местоположения выхлопной трубы на дизельной технике для повышения эффективности проветривания тупиковой горной выработки. Найденные отношения играют важную роль для разработки решений по повышению эффективности системы проветривания, а также для улучшения безопасности и снижения вероятности негативного воздействия выхлопных газов на здоровье сотрудников, работающих под землёй.

**Ключевые слова:** рудничный воздух, транспортные средства с дизельным приводом, шахтные дизелевозы, выхлопные газы, концентрация загрязняющих веществ

**Для цитирования:** Гендлер С.Г., Серёгин А.С., Белехов П.А. Исследование влияния эксплуатационно-конструкционных характеристик дизельной техники на загазованность подземных горных выработок. *Горная промышленность*. 2025;(4):170–177. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-170-177>

## Study of the effects of operational and design characteristics of diesel equipment on gas contamination in underground mine workings

S.G. Gandler<sup>1</sup>, A.S. Seregin<sup>2</sup>, P.A. Belekhov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> NPI NEDRA LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ belekhovpavel@mail.ru

**Abstract:** Excessive concentrations of harmful exhaust gas components from underground mining diesel vehicles with the internal combustion engines have a negative impact on the health of people working underground. Within the framework of this study we analyzed the dependence of the dilution efficiency of the exhaust gases from mining diesel underground machines equipped with the internal combustion engine on the location of the exhaust gas emission source in the underground mine using computer modeling. The main focus was on the effects of the exhaust pipe location and the engine load on these parameters. As a result of the analysis, a number of relationships were established between the fresh air flow rate and the exhaust gases emission for various exhaust pipe configurations of the diesel equipment. It is recommended to adhere to the ratio of the air to exhaust gas flow rates found as the result of this research depending on the location of the exhaust pipe of the diesel vehicle in order to improve the efficiency of ventilation in dead-end mine workings. The ratios found play a key part in developing solutions to improve the efficiency of the ventilation system, as well as to improve the safety and reduce the probability of negative effects of the exhaust gases on the health of people working underground.

**Keywords:** mine air, diesel-powered vehicles, mine diesel locomotives, exhaust gases, concentration of pollutants

**For citation:** Gandler S.G., Seregin A.S., Belekhov P.A. Study of the effects of operational and design characteristics of diesel equipment on gas contamination in underground mine workings. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):170–177. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-170-177>

## Введение

Самоходная подземная техника с двигателями внутреннего сгорания играет ключевую роль в добыче полезных ископаемых. Использование дизельной подземной самоходной техники позволяет повысить производительность труда и снизить затраты на добычу полезных ископаемых [1; 2]. В то же время двигатели внутреннего сгорания (ДВС) являются одними из главных источников загрязнения атмосферы подземных горных выработок по причине выброса в атмосферу вредных выхлопных газов [3–5]. Основными компонентами выхлопных газов дизельной техники, рассмотренными в данном исследовании, являются монооксид углерода CO и оксиды азота NOx [6; 7]. Эти компоненты выхлопных газов выделены в исследовании как наиболее сложные для разбавления, если принять во внимание выбросы этих веществ и их ПДК.

Монооксид углерода CO – ядовитый газ без вкуса и запаха, являющийся продуктом неполного сгорания дизельных двигателей [8]. Образование монооксида углерода осуществляется в результате неполного сгорания углерода при условии недостатка кислорода и происходит в условиях сжигания различных видов топлив, таких как бензин, уголь, древесина и природный газ [9]. При наличии достаточного количества кислорода в процессе горения образуется углекислый газ CO<sub>2</sub> [10; 11]. С точки зрения биохимии монооксид углерода способен соединяться с гемоглобином в крови, разрушая карбоксигемоглобин. Это превращение значительно снижает способность крови переносить кислород, что может привести к гипоксии и в конечном итоге к смертельному исходу. Симптомы отравления CO могут варьироваться от легкой головной боли и головокружения до потери сознания и летального исхода при высоких концентрациях газа. Поэтому важно отслеживать уровни монооксида углерода в помещениях, особенно в местах, где происходит сжигание топлива [12; 13].

Оксиды азота NOx – это группа газов, состоящая в большей степени из таких газов, как оксид азота NO и диоксид азота NO<sub>2</sub> [14; 15]. Главной причиной их появления в дизельных двигателях внутреннего сгорания является реакция между свободным азотом N, содержащимся в воздухе, и кислородом O<sub>2</sub> при температуре, превышающей 1500 °C [16]. К числу факторов, влияющих на уровень выбросов оксидов азота, относятся конструктивные особенности двигателя, такие как его мощность, режимы работы, а также качество топлива [17].

В современных дизельных двигателях применяются различные технологии снижения выбросов NOx, включая рециркуляцию отработавших газов (EGR) и селективную катализическую редукцию (SCR) [18].

Selective Catalytic Reduction (SCR) – селективное катализическое восстановление (SCR) это технологический метод, направленный на снижение выбросов таких компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, как оксиды азота NOx. Технология заключается в добавлении раствора мочевины перед катализатором, которая при достижении температуры 200–400 °C расщепляется на аммиак NH<sub>3</sub> и углекислый газ CO<sub>2</sub>. В дальнейшем NH<sub>3</sub> входит в реакцию с оксидами азота при катализитическом материале. Катализитический материал стандартно состоит из оксидов ванадия или платины. В результате химической реакции NH<sub>3</sub> с NOx образуется азот N<sub>2</sub> и выделяются водяные пары H<sub>2</sub>O, которые представляют меньший вред для человеческого организма и здоровья. Степень эффективности такого технологического метода зависит от правильной концен-

трации и дозировки мочевины и поддержания необходимого температурного режима [19]. Однако для функционирования системы необходима регулярная дозаправка мочевиной, что требует дополнительных затрат и контроля со стороны пользователя. К положительным аспектам использования мочевины в SCR можно отнести снижение выбросов NOx до 90%, а также улучшение топливной экономичности техники за счет оптимизации работы двигателя и снижения температуры сгорания.

Система рециркуляции отработавших газов (EGR, Exhaust Gas Recirculation) является еще одной технологией снижения количества выбросов NOx в результате эксплуатации технических средств с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Принцип действия EGR заключается в частичном возврате отработавших газов обратно в цилиндры двигателя. Этот процесс снижает концентрацию кислорода в камере сгорания, что приводит к снижению температуры сгорания [20]. Снижение температуры является критическим фактором, поскольку образование NOx происходит преимущественно при высоких температурах, превышающих 2000 °C. Такой метод способствует уменьшению максимальных температур в процессе сгорания, что и является причиной снижения образования оксидов азота. Системы EGR могут быть как под высоким, так и под низким давлением. К недостаткам метода можно отнести повышение выбросов углеводородов HC и оксида углерода CO, а также к образованию отложений на впускных клапанах. Таким образом, система EGR требует тщательной настройки для достижения оптимального баланса между снижением NOx и уменьшением концентраций других компонентов выхлопных газов [21].

Эти методы направлены на уменьшение концентрации оксидов азота в выхлопных газах, что является важным аспектом соблюдения экологических стандартов и снижения негативного воздействия на окружающую среду [22]. Оксиды азота в дизельных двигателях представляют собой значимую группу загрязняющих веществ, образующихся в процессе сгорания [23].

Для нормирования показателей концентрации ОГ используют такой утвержденный на законодательном уровне санитарно-гигиенический норматив, как предельно допустимая концентрация (ПДК) [24; 25]. Состав атмосферного воздуха в пределах горных выработок в условиях работы в ней автомобилей с ДВС в итоге зависит от методов проветривания и их эффективности. В условиях недостатка свежего атмосферного воздуха на большой части подземных горных работ задача обеспечения требуемых и нормативных санитарных и гигиенических условий рабочего труда – это параметр, определяющий граничные условия для активной эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания [26–28]. Согласно приказу от 8 декабря 2020 года №505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» концентрация кислорода в области рабочей зоны персонала не должна быть ниже 20% по объему, тогда как предельно допустимая концентрация (ПДК) по объему таких вредных компонентов выхлопных газов, как монооксид углерода CO и оксиды азота NOx (пересчитане на NO<sub>2</sub>), соответственно 0,0017 и 0,00026%<sup>1</sup>. Данные ПДК

<sup>1</sup> 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, п. 181. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573264143> (дата обращения: 23.03.2025).

поддерживаются за счёт подачи в горные выработки свежего воздуха [29–31]. Повышенные концентрации вредных компонентов выхлопных газов способны образовывать высококонцентрированные скопления в объёме горной выработки, значения концентраций в которых значительно превышают установленные ПДК. Кроме того, вредные компоненты могут попадать в кабину транспортного средства. В настоящей работе рассматривается наиболее эффективное отношение расхода подаваемого в выработку воздуха к расходу выхлопных газов в зависимости от различных вариантов расположения выхлопной трубы на транспортном средстве.

Подача свежего воздуха в подземные горные выработки является эффективным средством удаления отработанных газов и других вредных веществ, таких как оксиды азота и углерода, которые являются основными компонентами выхлопных газов при эксплуатации технических средств с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Это предотвращает появление повышенных концентраций этих компонентов в замкнутом пространстве горной выработки. Кроме того, свежий воздух, подающийся в горную выработку во время проветривания, способствует снижению концентраций вредных выхлопных газов, что снижает их воздействие на окружающую среду.

## Методы

Была разработана компьютерная математическая модель тупиковой горной выработки с работающей в ней машиной с ДВС (ST-2D) и вентиляционным трубопроводом. Параметры модели: длина – 80 м, ширина 4 м, высота – 3 м. Расстояние от тупика до источника выхлопа (выхлопная труба) – 23 м. Отставание конца вентиляционного става от тупиковой части выработки – 15 м (рис. 1).

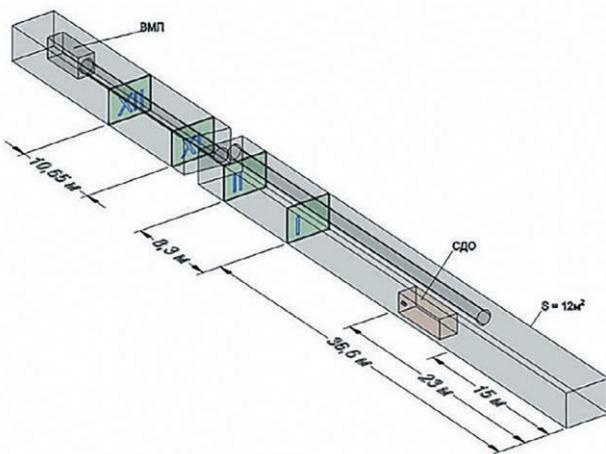


Рис. 1  
Геометрия расчетной модели

Fig. 1  
Geometry of the  
computational model

Математическая компьютерная модель была разработана по полученным ранее рядам натурных измерений концентраций вредных газов по сечению горной выработки и по её протяжённости. Были определены скорость, температура и величина концентраций вредных компонентов. Также были замерены геометрические параметры горной выработки и эксплуатируемой техники, величина расхода воздуха в горной выработке и температура воздуха.

При отборе проб отработавших газов отборщик проб

находился на входящей вентиляционной струе по отношению к выхлопу. Отбор проб осуществлялся в стеклянные пробоотборники и резиновые камеры, предназначенные для отбора проб отработавших газов. Кроме того, контроль концентраций моноксида углерода и оксидов азота осуществлялся с помощью переносного многокомпонентного газоанализатора ПОЛАР. Количественная оценка состава отобранных проб производилась в контрольно-испытательной лаборатории ВГСО. Концентрации угарного газа были получены с помощью методов газовой хроматографии (инструкция №37-2017 ФР 1.31.2018.30111).

В расчетной модели использовалась модель турбулентности Ментера SST (Shear Stress Transport) [32]. Такая модель прекрасно определяет свойства свободных течений и обеспечивает правильное описание пристеночной турбулентности. Модель представляет собой совокупность  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  модели и увеличивает эффективность работы в окрестности исследуемого участка модели [33; 34]:

$$V_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}. \quad (1)$$

Условием окончания расчёта было принято достижение величины установленных невязок на уровне  $10^{-6}$ .

Величина невязок составляла  $10^{-6}$ , а количество итераций вычислений ограничивалось 1000. При построении сетки использовалась тетраэдрическая структурированная сетка (Mesh) с размерами ячеек 0,1 м [35]. Дополнительное измельчение сетки проводилось в области выхлопной трубы и до 0,005 м. По предварительным результатам моделирования сделан вывод о влиянии параметров проветривания на качество разбавления выхлопных газов дизельной подземной техники.

Местоположение выхлопной трубы на транспортном средстве было принято согласно сценариям I–III (табл. 1).

Таблица 1  
Моделируемые сценарии

Table 1  
Simulated scenarios

№ Сценария	Расположение выхлопной трубы относительно транспортного средства	Транспортное средство
I	Сбоку ТС	Погрузочная машина Atlas Copco Scooptram ST-2D
II	Позади снизу ТС	Boomer-281, Sandwick LH-307
III	Позади сверху ТС	Проходческий буровой станок Boomer-M2 D

Каждый моделируемый сценарий соответствовал своему расположению выхлопной трубы на транспортном средстве.

В процессе моделирования изменялись такие параметры, как:

– скорость воздуха, подаваемого через трубопровод в тупиковую горную выработку;

– скорость и температура выхлопных газов, которые соответствовали различной нагрузке на двигатель (низкая, стандартная, максимальная)

Сравнение результатов является ключевым этапом в подтверждении адекватности полученных в моделирова-

Таблица 2

Рассчитанные по данным натурных измерений и моделирования величины выбросов оксида углерода

Table 2

Carbon oxide emission values calculated based on in-situ measurements and simulations

№ сечения	CO сред, ppm (математическая модель)	CO сред, ppm (натурные исследования)	CO модельное / CO нат.исс., %
1	4,9	5,6	86
2	6,0	6,2	97
3	5,9	5,9	100
4	5,4	5,2	104
5	5,1	5,3	96
6	5,5	5,7	97
7	5,6	5,8	97

нии результатов. С целью верификации разработанной математической компьютерной модели были сопоставлены результаты натурных измерений с данными, полученными в результате программного моделирования. Результаты были выведены в виде табл. 2. Проведено сравнение средних значений концентрацийmonoоксида углерода по семи сечениям в исследуемой зоне.

На основе проведенной верификации можно с уверенностью утверждать, что полученные результаты математического компьютерного моделирования имеют достаточно хорошую сходимость с результатами натурных экспериментальных данных. В данном случае результаты верификации подтверждают, что модель адекватно отражает процессы, происходящие в горной выработке. Модель можно считать верифицированной.

## Результаты

По результатам моделирования можно сделать вывод о различных распределениях концентрационных полей компонентов выхлопных газов для разного расположения

выхлопной трубы относительно транспортного средства (рис. 2).

Так, вариант с расположением выхлопной трубы позади снизу ТС (а) характеризуется преимущественно концентрацией NOx у почвы выработки, не превышающей высоту 0,78 м, а для случая б характерно скопление оксидов азота с противоположной от вентиляционной трубы стороны выработки. Случаю в – расположение выхлопной трубы позади сверху – свойственна обратная ситуация по распределению. Для него оксиды азота скапливаются вблизи трубопровода и непосредственно за ним в объеме между горной выработкой и поверхностью вентиляционной трубы.

Для различных случаев расположения выхлопной трубы были определены рекомендуемые значения соотношений  $Q/q$ , где  $Q$  представляет собой расход свежего воздуха, а  $q$  – расход выхлопных газов.

Графики зависимостей концентраций от расстояния от места выброса поmonoоксиду углерода (слева) и оксидам азота (справа) в принятых вариантах расположения

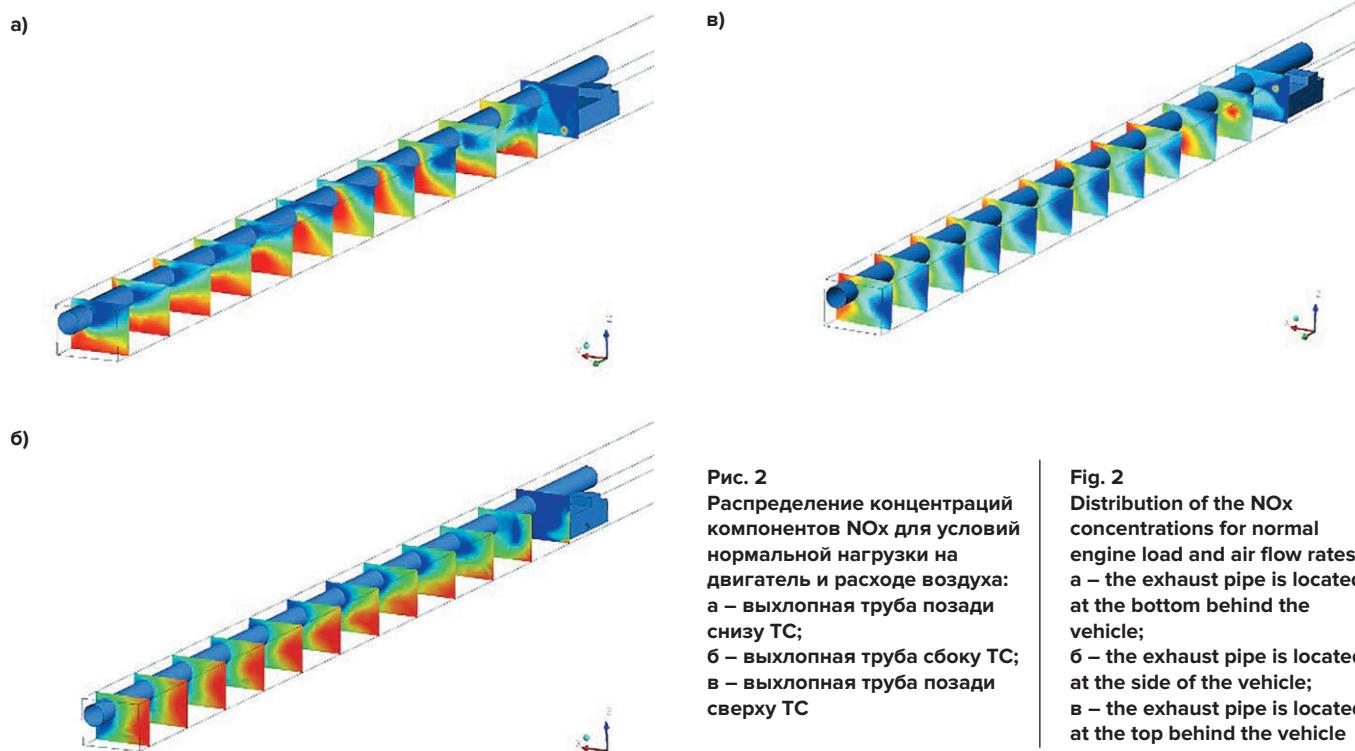
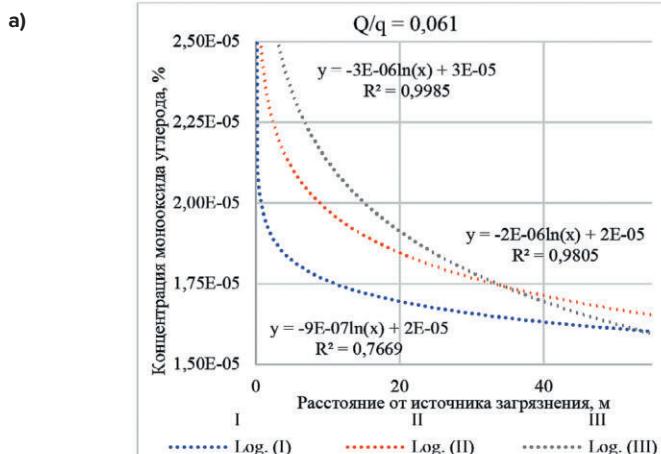


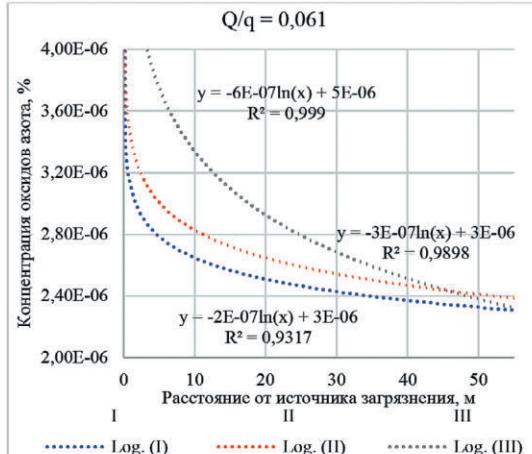
Рис. 2  
Распределение концентраций компонентов NOx для условий нормальной нагрузки на двигатель и расходе воздуха:  
а – выхлопная труба позади снизу ТС;  
б – выхлопная труба сбоку ТС;  
в – выхлопная труба позади сверху ТС

Fig. 2  
Distribution of the NOx concentrations for normal engine load and air flow rates:  
a – the exhaust pipe is located at the bottom behind the vehicle;  
б – the exhaust pipe is located at the side of the vehicle;  
в – the exhaust pipe is located at the top behind the vehicle

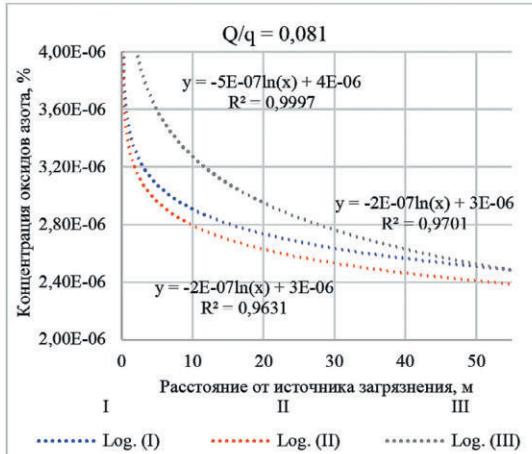
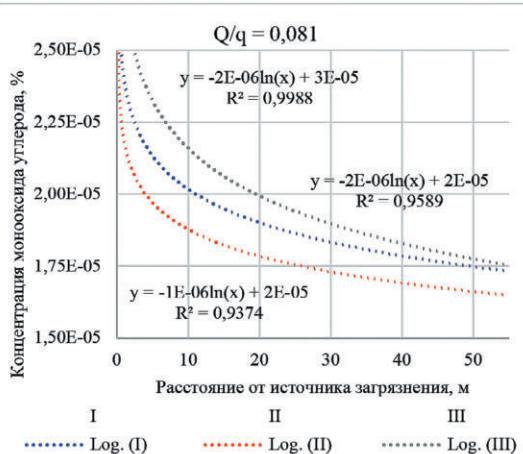
Монооксид углерода (CO)



Оксиды азота (NOx)



б)



в)

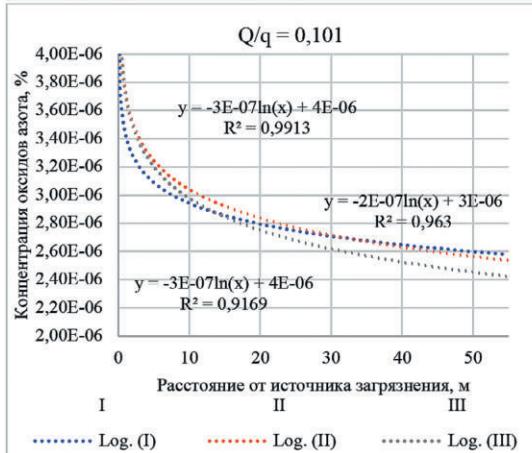
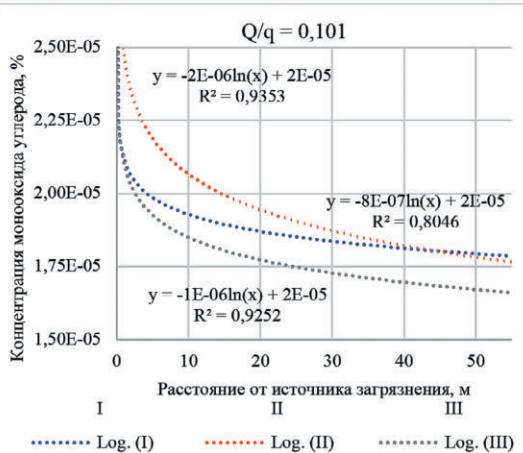


Рис. 3

Рассчитанные зависимости вариантов расположения выхлопной трубы поmonoоксиду углерода и оксидам азота для различных соотношений  $Q/q$

- а – для соотношения  $Q/q = 0,061$ ;  
б – для соотношения  $Q/q = 0,081$ ;  
в – для соотношения  $Q/q = 0,101$

выхлопной трубы при различных отношениях расхода воздуха к расходу выхлопных газов  $Q/q$  представлены на рис. 3.

Обсуждение результатов

Проблема попадания выхлопных газов дизельного доставочного оборудования с двигателем внутреннего сгорания

Fig. 3

Calculated dependencies of the exhaust pipe location options on carbon monoxide and nitrogen oxides for different  $Q/q$  flow rates.

- а – for the  $Q/q$  flow rate = 0,061,  
б – for the  $Q/q$  flow rate = 0,081;

в – for the  $Q/q$  flow rate = 0,101

является одной из самых важных при эксплуатации подземных транспортных средств. Наибольшую опасность для здоровья водителя представляют оксиды азота NOx и монооксид углерода CO.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при расположении выхлопной трубы позади транспортного средства наиболее оптимальной величиной

отношения расхода воздуха, подаваемого в выработку, к расходу выхлопных газов дизельного транспортного средства (ТС) является значение 0,081 ( $Q/q$ ). При расположении выхлопной трубы сбоку ТС – 0,061 ( $Q/q$ ). В случае местонахождения выхлопной трубы (ВТ) сверху позади ТС – 0,101. Данных соотношений для каждого конкретного принятого варианта можно достигать при помощи повышения расхода свежего воздуха либо путём уменьшения нагрузки на двигатель с целью уменьшения расхода выхлопных газов. Также имеет место регулирование одновременно обоих параметров.

Различные варианты расположения выхлопной трубы оказывают различное влияние на распределение оксидов азота в пространстве поперечного сечения подземной горной выработки.

Наибольшая скорость снижения концентраций вредных компонентов выхлопных газов наблюдается на расстоянии более 10–15 м от источника загрязнения (выхлопной трубы). В большинстве случаев значения предельно допустимой концентрации (ПДК) для компонентов выхлопных газов достигаются в этом диапазоне. Дальнейшее снижение происходит с меньшей интенсивностью вплоть до конца исследуемой зоны.

### Заключение

Для различных вариантов расположения выхлопной трубы были определены рекомендуемые значения соотношений  $Q/q$ . Эти соотношения позволяют оптимизировать процесс проветривания и способствуют эффективному удалению вредных газов из рабочей зоны. В частности, при размещении выхлопной трубы сбоку транспортного средства (ТС) рекомендованное соотношение составило 0,061. Для случая, когда выхлопная труба располагается позади транспортного средства снизу, это значение увеличивается до 0,081. Наконец, в случае, когда выхлопная труба расположена позади транспортного средства сверху, рекомендуемое соотношение достигает 0,101. Исследование

проводилось с учетом различных позиций расположения выхлопной трубы, что является важным аспектом в контексте обеспечения безопасных условий работы в подземных горных выработках шахт и рудников.

Результаты проведенного исследования могут служить основой для корректировки параметров расхода свежей струи воздуха и регулирования нагрузки на двигатель дизельного транспортного средства. Это позволит достичь заданных значений  $Q/q$ , что является залогом эффективного проветривания тупиковых горных выработок. Важно отметить, что соответствующее регулирование этих параметров поможет не только уменьшить концентрацию оксидов углерода и других вредных веществ в воздухе, но и обеспечить безопасность работников, находящихся в зоне воздействия выхлопных газов.

Анализ соотношений показал, что для достижения оптимальных условий проветривания необходимо учитывать не только месторасположение выхлопной трубы, но и другие факторы, такие как скорость движения транспортного средства, характеристики дизельного двигателя и температурные условия в горной выработке. Поэтому для успешной реализации рекомендованных соотношений требуется провести дополнительные исследования, направленные на детальный анализ влияния этих факторов на эффективность проветривания.

Результаты данной работы имеют большое значение для практического применения в горной отрасли, так как оптимизация проветривания может значительно повысить безопасность и уменьшить риск вредного воздействия выхлопных газов на здоровье работников подземных объектов.

### Номенклатура

- $a_1$  – константа (0,31)  
 $\omega$  – удельная диссипация  
 $S$  – скорость деформации  
 $F_2$  – эмпирическая функция

### Список литературы / References

1. 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//jgmt.v11.3\(43\).10](https://doi.org/10.14505//jgmt.v11.3(43).10)
2. Sukhomlinov V., Matveev R., Mustafaev A., Timofeev N. Kinetic theory of low-voltage beam discharge instability in rare gases. *Physics of Plasmas*. 2020;27(6):062106. <https://doi.org/10.1063/5.0001822>
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. Anisimov A., Chernyshkov I. The linearization method to calculate the equilibrium composition of combustion products of diesel engine. In: Guda A. (eds) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 510. Springer, Cham; 2023, pp. 477–483. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_47)
5. Nel A.J., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018;29(3):22–32. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445>
6. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности дизельного двигателя при работе на различных альтернативных топливах. *Двигателестроение*. 2023;(2):54–61.  
Likhmanov V.A., Lopatin O.P. Study of the internal combustion engine toxicity when working on various alternative fuels. *Engines Construction*. 2023;(2):54–61. (In Russ.)
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. Vinogradov E.A., Nikiforov A.V., Kochneva A.A. Computational fluid dynamics study of ventilation flow paths on longwall panel. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1140–1147.
9. 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>
10. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогеомеханических процессов на выемочном участке шахты. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2010;(2):28–35.  
Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. Peculiar features of gas-geomechanical processes at a mine coal extraction section. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry*. 2010;(2):28–35. (In Russ.)
11. Corsini A., Marchegiani A., Rispoli F., Sciulli F., Venturini P. Vegetable oils as fuels in diesel engine. engine performance and emissions. *Energy Procedia*. 2015;81:942–949. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.151>
12. Корнев А. В., Спицын А. А., Займенцева Л. А., Зубко М. В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):180–198. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_180](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_180)  
Kornev A.V., Spitsyn A.A., Zaimentseva L.A., Zubko M.V. Research of the physico-chemical properties of hydrogel as a means of dust-explosion protection and dust reduction in coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):180–198. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_180](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_180)
13. Bestel D., Bayliff S., Marchese A., Olsen D., Windom B., Xu H. Multi-dimensional modeling of the CFR engine for the investigation of SI natural gas combustion and controlled end-gas autoignition. In: *Proceedings of the ASME 2020 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. ASME 2020 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, November 4–6, 2020. V001T06A012. <https://doi.org/10.1115/ICEF2020-2992>
14. 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 (Taiwan)*. 2021;24(1):105–110. [https://doi.org/10.6180/jase.202102\\_24\(1\).0014](https://doi.org/10.6180/jase.202102_24(1).0014)
15. 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>
16. 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>
17. 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-тидравлических локомотивов. *Записки Горного института*. 2021;247:39–47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>  
Korshunov G.I., Eremeeva A.M., Drebendstedt 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;247:39–47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>
18. Жихарев С.Я., Цыганков В.Д., Родионов В.А., Исаевич А.Г. Оптимизация процессов пылеподавления при ведении подземных горных работ на основе данных натурных экспериментов и моделирования в программе Ansys Fluent. *Горный 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>
19. 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>
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. Bickert S., Kampker A., Greger D. Developments of CO<sub>2</sub>-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>
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. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):149–163. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_149](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_149)  
Gridina E.B., Borovikov D.O. Improving the safety of the working personnel of a quarry located in difficult mining and geological conditions of the Far North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):149–163. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_149](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_149)

24. Гендлер С.Г., Братских А.С. Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах. *Горная промышленность*. 2024;(5S):71–77. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>  
Gendler S.G., Bratskikh A.S. Actual problems of coal accumulations ignition in rock dumps. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):71–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>
25. 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;246:623–632. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.4>  
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;246:623–632. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.4>
26. Серёгин А.С., Иконников Д.А., Белехов П.А. К вопросу организации защиты систем аэрогазового контроля шахты от ложных срабатываний при работе дизельного технологического оборудования. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024;(27):77–81. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-27-77-81>  
Seregin A.S., Ikonnikov D.A., Belekhov P.A. On the issue of organizing protection of the mine's aerogas control system from false alarms during the operation of diesel technological equipment. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2024;(27):77–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-27-77-81>
27. Park J., Park S., Lee D.-K. CFD modeling of ventilation ducts for improvement of air quality in closed mines. *Geosystem Engineering*. 2016;19(4):177–187. <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1164090>
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. 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.)
30. 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)
31. 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>
32. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
33. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*. 2003;4(1):625–632.
34. Mohammadi B., Pironneau O. *Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model*. Masson. Saint-Jean-de-Monts, France; 1994. 205 p.
35. Camelli F.E., Byrne G., Löhner R. Modeling subway air flow using CFD. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014;43:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.02.012>

**Информация об авторах**

**Гендлер Семён Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производства, Санкт-Петербургский горный университет 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, заместитель директора ООО «НПИ «НЭДРА», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2897-8604>; e-mail: seregin\_as@pers.spmi.ru

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

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 19.04.2025  
Поступила после рецензирования: 05.06.2025  
Принята к публикации: 27.06.2025

**Information about the authors**

**Semyon G. Gendler** – 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, Deputy Director of NPI NEDRA LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2897-8604>; e-mail: seregin\_as@pers.spmi.ru

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

**Article info**

Received: 19.04.2025  
Revised: 05.06.2025  
Accepted: 27.06.2025