

УДК 622.4

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2020

**Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляция в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания****Е.Л. Гришин, А.В. Зайцев, Е.Г. Кузьминых**

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

**Ensuring Safe Workplace Conditions when Working Equipment with Internal Combustion Engines by Ventilation in Underground Mines****Evgeniy L. Grishin, Artem V. Zaitsev, Evgeniy G. Kuzminykh**

Federal State Budgetary Institution of Science Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 03.02.2020. Принята / Accepted: 15.06.2020. Опубликовано / Published: 17.08.2020

**Ключевые слова:**

нормативная документация, рудник, дизельное топливо, компоненты выхлопных газов, двигатель внутреннего сгорания, норма выбросов, концентрация кислорода, требуемое количество воздуха.

Увеличение производственных мощностей и развитие вентиляционных сетей подземных рудников ставят перед горными предприятиями задачи повышения мощности применяемого горного и вентиляционного оборудования. Большинство горного оборудования для погрузки и транспортировки горной породы на рудных месторождениях работает на базе техники с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Недостаточная вентиляция или неправильный подход к расчету необходимого количества воздуха для разбавления основных компонентов выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания, таких как угарный газ и окислы азота, могут привести к отравлению или даже гибели горных рабочих. Однако на большинстве современных предприятий вентиляционное оборудование работает на пределах технической возможности – без вероятности увеличения технического резерва. Этот факт, в свою очередь, напрямую влияет на безопасность ведения горных работ. Представлены методы и зависимости для расчета требуемого количества воздуха для рабочих зон машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, подземных рудников при их проектировании и эксплуатации.

Анализ нормативной литературы показывает, что в настоящее время отсутствует требуемая норма расхода воздуха на единицу мощности двигателя внутреннего сгорания. Поэтому предлагается подход, соответствующий современным требованиям промышленной безопасности, основанный на фактических выбросах вредных компонентов, параметрах работы двигателей внутреннего сгорания и нормах выбросов, гарантируемых производителем путем подтверждения соответствия двигателя экологическому классу. Предлагаемые методы позволяют повысить безопасность на рабочих местах при работе техники с двигателями внутреннего сгорания на подземных рудниках, а также увеличить эффективность проектирования новых блоков, горизонтов и рудников за счет исключения необоснованного резерва при подборе горного и вентиляционного оборудования.

**Keywords:**

regulatory documents, mine, diesel fuel, exhaust gas components, internal combustion engine, emission rate, oxygen concentration, required air amount.

The increase in production capacity and the development of ventilation networks in underground mines pose a challenge for mining enterprises to increase the capacity of the mining and ventilation equipment used. Most mining equipment for loading and transporting rock in ore deposits is based on equipment with diesel internal combustion engines. Insufficient ventilation or inadequate calculation of the air amount required to dilute the main components of exhaust gases from internal combustion engines, such as carbon monoxide and nitrogen oxides, can lead to poisoning or even death of mining workers. However, at most modern enterprises, ventilation equipment operates within the limits of technical capabilities – without the likelihood of increasing the technical reserve. This fact, in turn, directly affects the safety of mining operations. The article presents methods and dependencies for calculating the required amount of air for the working areas of machines equipped with internal combustion engines, underground mines during their design and operation. Analysis of the regulatory literature showed that currently there was no required rate of air consumption per power unit of an internal combustion engine. Therefore, an approach was proposed that meets modern industrial safety requirements, based on actual emissions of harmful components, operating parameters of internal combustion engines and emission standards guaranteed by the manufacturer by confirming the engine's compliance with the environmental class. The proposed methods would improve the safety at workplaces when operating equipment with internal combustion engines in underground mines, as well as increase the efficiency of designing new blocks, horizons and mines by eliminating an unreasonable reserve when selecting mining and ventilation equipment.

**Гришин Евгений Леонидович** – научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, кандидат технических наук (тел.: +007 912 786 53 15, e-mail: [aerovg@mail.ru](mailto:aerovg@mail.ru)).**Зайцев Артем Вячеславович** – научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, доктор технических наук (тел.: +007 982 487 34 12, e-mail: [aerolog.artem@gmail.com](mailto:aerolog.artem@gmail.com)).**Кузьминых Евгений Геннадьевич** – аспирант отдела аэрологии и теплофизики (тел.: +007 982 496 39 27, e-mail: [kuzminykh.evgeniy@gmail.com](mailto:kuzminykh.evgeniy@gmail.com)). Контактное лицо для переписки.**Evgeniy L. Grishin** (Author ID in Scopus: 54895072600) – PhD in Engineering, Researcher at the Department of Aerology and Thermophysics (tel.: +007 912 786 53 15, e-mail: [aerovg@mail.ru](mailto:aerovg@mail.ru)).**Artem V. Zaitsev** (Author ID in Scopus: 57213120380) – Doctor of Engineering, Researcher at the Department of Aerology and Thermophysics (tel.: +007 982 487 34 12, e-mail: [aerolog.artem@gmail.com](mailto:aerolog.artem@gmail.com)).**Evgeniy G. Kuzminykh** – PhD student at the Department of Aerology and Thermophysics (tel.: +007 982 496 39 27, e-mail: [kuzminykh.evgeniy@gmail.com](mailto:kuzminykh.evgeniy@gmail.com)). The contact person for correspondence.

## Введение

Современная горнодобывающая промышленность в настоящее время сталкивается со множеством проблем разработки месторождений полезных ископаемых. Увеличение потребности рынка в минеральных ресурсах, ужесточение нормативного и экологического законодательства, усложнение горнотехнических условий добычи и множество других факторов ставят перед горными предприятиями задачи, от решения которых зависит прибыльность предприятия, а также безопасность рабочего персонала.

Увеличение производственной мощности добычи для удовлетворения спроса на минеральные ресурсы влечет за собой ввод в эксплуатацию новых добычных участков, располагающихся на больших глубинах или значительном удалении от вскрывающих выработок, а также увеличение количества или мощности горного оборудования. В основном горное оборудование для погрузки и транспортировки горной породы на рудных месторождениях работает на базе техники, оснащенной дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Недостаточная вентиляция или неправильный подход к расчету необходимого количества воздуха для разбавления основных компонентов выхлопных газов от ДВС, таких как угарный газ и окислы азота, могут привести к отравлению или даже гибели горных рабочих. Однако на большинстве современных предприятий вентиляционное оборудование работает на пределах технической возможности, без вероятности увеличения технического резерва. Этот факт, в свою очередь, напрямую влияет на безопасность ведения горных работ.

В связи с этим возникает необходимость определения требуемого количества воздуха для разбавления вредных и опасных компонентов выхлопных газов от техники с ДВС до безопасных концентраций.

## Нормативные документы

В XX в., особенно в послевоенное время, горная промышленность развивалась быстрыми темпами. Развитие дизельной техники способствовало механизации горных работ. В связи с этим были разработаны нормативные документы, призванные повысить безопасность отрасли.

Ранее «Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом» (шифр ПБ 06-111-95)

регламентировали норму подачи свежего воздуха в выработках, где работают машины с ДВС в количестве, обеспечивающем снижение концентрации вредных продуктов выхлопа в рудничной атмосфере до санитарных норм, но не менее 5 м<sup>3</sup>/мин на 1 л.с. номинальной мощности дизельных двигателей и 6 м<sup>3</sup>/мин номинальной мощности бензиновых двигателей [1]. В 2003 г. «Единые правила безопасности...» [1] утратили нормативную силу и были заменены их новой редакцией. Однако требования нормы подачи свежего воздуха, обеспечивающего снижение концентрации вредных продуктов выхлопных газов в рудничной атмосфере, были исключены.

В настоящее время одним из нормативных документов являются «Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки» (шифр ВНТП 13-2-93), регламентирующие норму подачи свежего воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов 5 м<sup>3</sup>/мин на 1 л.с. мощности двигателя [2]. ВНТП 13-2-93 не являются строго обязательными к исполнению по причине того, что не зарегистрированы в Минюсте России и в соответствии с п. 10 Указа Президента Российской Федерации от 23.05.1996 г. № 763 «О порядке опубликования и вступления в силу актов Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации и нормативных правовых актов Федеральных органов исполнительной власти» носят рекомендательный характер.

Стоит отметить, что отечественная нормативная документация является не единственной, где регламентируется норма подачи свежего воздуха на 1 л.с. мощности двигателя для разбавления компонентов выхлопных газов до предельно допустимых концентраций. В табл. 1 приведено сравнение нормативов некоторых стран с развитой горной промышленностью [3–11].

Таблица 1

Сравнение нормативов подачи свежего воздуха

Страна	Условная норма подачи свежего воздуха, м <sup>3</sup> /мин на 1 л.с.
Австралия	4,2–5
Канада	4,0–7,7
США	5,0
Чили	5,3
Китай	5,5
Южная Африка	5,0
Российская Федерация	5,0

Нормы выбросов CO и NO<sub>x</sub> дизельных двигателей внедорожной техники в соответствии со стандартами токсичности США и ЕС, г/кВт ч

Стандарт США				Стандарт ЕС			
Название	Мощность двигателя	CO	NO <sub>x</sub>	Название	Мощность двигателя	CO	NO <sub>x</sub>
Tier 2	130–560 кВт	3,5	6,4	Stage II	130–560 кВт	3,5	6
Tier 3	130–560 кВт	3,5	4	Stage IIIA	130–560 кВт	3,5	4
				Stage IIIB	130–560 кВт	3,5	2
Tier 4	130–560 кВт	3,5	0,4	Stage IV	130–560 кВт	3,5	0,4

Отечественная норма продолжительное время являлась единственным нормативом для расчета требуемого количества воздуха для рабочих зон машин с ДВС. Однако с развитием технологий и вводом стандартов экологичности для двигателей внутреннего сгорания приведенная норма является морально устаревшей, кроме того, носит рекомендательный характер.

В настоящее время требования по разжижению отработанных выхлопных газов машин с ДВС в горнорудной промышленности определяются п. 154, 335 и 344 Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [12], согласно которым требуемое количество воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов должно рассчитываться по компонентам окиси углерода и окислов азота, а также допустимого содержания кислорода в воздухе не менее 20 %.

Отдельным вопросом является качество современного дизельного топлива и влияние его состава на концентрацию компонентов выхлопных газов.

В настоящее время на территории РФ действуют два ГОСТ на дизельное топливо «ЕВРО», предназначенное для дизельных двигателей:

– ГОСТ Р 52368-2005 (EN 590:2009) «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия» [13] (национальный стандарт);

– ГОСТ 32511-2013 (EN 590:2009) «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия» [14] (межгосударственный стандарт).

Документы регламентируют требования к составу видов дизельных топлив. Нормированию подлежат цетановое число, плотность топлива, содержание серы (мг/кг), полициклических ароматических углеводородов (% по массе) в топливе и другие показатели для летних, зимних и межсезонных видов дизельного топлива.

Однако содержание серы и полициклических ароматических углеводородов не влияет на содержание окиси углерода и окислов азота в выхлопных газах техники с ДВС. Выбросы оксидов углерода и окислов азота выхлопных газов регулируются средствами нейтрализации и

зависят в основном от класса экологичности двигателя [15–20].

Нормы токсичности двигателей внутреннего сгорания для внедорожной техники определяются в соответствии со стандартами:

1. Stage – стандарт сертификации, принятый в странах Евросоюза (ЕС). Впервые введен в действие Директивой ЕС 97/68/ЕС [21] в 1997 г., в дальнейшем уточненной в 2002 г. Директивой 2002/88/ЕС [22], в которых определены нормы выбросов для экологических классов Stage I и Stage II. Директивой ЕС 2004/26/ЕС [23] в 2004 г. введены нормы выбросов для экологических классов Stage IIIA, Stage IIIB и Stage IV.

2. EPA Tier – стандарт сертификации, принятый в США. Впервые введен Сводом федеральных нормативных актов (Code of Federal Regulations) [24] в 1999 г. с определением норм выбросов по классам экологичности Tier 1, Tier 2, Tier 3. В 2012 г. дополнен [25] нормами выбросов по классу экологичности Tier 4.

Данными стандартами предусматривается порог выбросов внедорожной техники по окислам азота и оксиду углерода. Нормы токсичности представлены в табл. 2.

Таким образом, методика определения необходимого количества воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов должна иметь вариативный подход к выполнению расчета в зависимости от конкретных ситуаций, чтобы обеспечить безопасные условия труда.

### Расчет требуемого количества воздуха для рабочих зон машин с двигателями внутреннего сгорания в подземных рудниках

В связи со всем вышесказанным предлагаются следующие подходы к расчету требуемого количества воздуха для рабочих зон машин с ДВС.

1. По параметрам выхлопных отработанных газов. Определить количество вредных веществ, содержащихся в выхлопных отработанных газах, можно на основе прямых измерений в рабочих режимах машин с ДВС. На основании этих данных следует произвести расчет расхода

воздуха, требуемого для разбавления выделяемых вредных газов до предельно допустимых концентраций.

При проектировании горных предприятий данный подход может быть использован при техническом перевооружении или реконструкции рудников, когда планируется задействовать часть техники, эксплуатируемой в настоящее время. Длительный период наблюдения поможет определить уровень выбросов вредных компонентов выхлопных газов, который позволит выявить требуемое количество воздуха в проекте.

Однако такой подход не лишен недостатков. В процессе эксплуатации машин возможно изменение эксплуатационных характеристик двигателя, при которых выбросы вредных и опасных веществ могут увеличиться. В таком случае подача ранее рассчитанного количества воздуха может оказаться недостаточной для разбавления этих веществ. Исключение вероятности наступления подобной ситуации должно иметь комплексный подход, заключающийся во введении ограничительной нормы выбросов, которая будет выше фактического уровня. Например, норму выбросов можно принять по самой «грязной» исправной машине, находящейся в эксплуатации. Кроме того, в процессе эксплуатации необходимо контролировать количество вредных веществ, содержащихся в выхлопных газах, на основе прямых замеров в соответствии с требованиями п. 343 «Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [12]. В случае превышения установленной нормы выбросов машину с превышением необходимо выводить на техническое обслуживание или ремонт. В этом случае у эксплуатирующей организации появляется стимул производить своевременное техническое обслуживание и обновление парка техники с ДВС.

С другой стороны, произведенные замеры выхлопных газов на новых машинах с ДВС, имеющих идеальное техническое состояние, могут показывать низкий уровень выбросов вредных веществ в выхлопных газах. Кроме того, существует риск подачи недостаточного количества воздуха в случае ошибок при плановых измерениях вредных компонентов в отработавших газах ДВС. В этом случае целесообразно снизить риски за счет пересчета уровня выбросов вредных веществ на условную норму подачи воздуха на единицу мощности техники и ввести ограничительную норму на минимальный расход воздуха.

Примером вышеописанной ситуации может послужить случай на одном из подземных рудников. На основании статистики по замерам параметров выхлопных отработанных газов

рассчитывалась требуемая норма подачи воздуха на 1 л.с. машин с ДВС. В качестве нижней границы принята норма 1,5 м<sup>3</sup>/мин воздуха на 1 л.с. Подавать воздух менее, чем рассчитано по данной норме, запрещено даже на те типы машин с ДВС, на которые расчетным путем на основании уровня выбросов вредных веществ получено значение в интервале 0,8–1 м<sup>3</sup>/мин воздуха на 1 л.с. Также введена дополнительная норма допустимых выбросов, при которой разрешалась эксплуатация машины, в пересчете на требуемый расход воздуха составляющая 3 м<sup>3</sup>/мин воздуха на 1 л.с.

*2. По экологическому классу двигателя.* Для новых проектируемых рудников невозможно определить уровень загрязняющих веществ в отработанных выхлопных газах закупаемых машин непосредственно в рабочих условиях. В таком случае целесообразно использовать максимально возможный уровень выбросов, который гарантирует производитель оборудования путем сертификации двигателя по экологическому классу.

*3. По содержанию кислорода в рабочей зоне машины с ДВС.* Отдельно стоит рассмотреть вопрос нормирования содержания кислорода в рабочих зонах машин с ДВС, так как он слабо связан с выбросами вредных веществ. Расчет требуемого количества воздуха для обеспечения нормативного содержания кислорода производится на основании удельного расхода топлива машин с ДВС.

Таким образом, количество свежего воздуха, подаваемого в выработку рабочих зон, в которых постоянно или периодически используются машины с ДВС ( $Q_{ог}$ ), должно быть не менее необходимого для статического разжижения основных компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксид азота в пересчете на NO<sub>2</sub>) до предельно допустимых концентраций или обеспечения нормативного содержания кислорода и определяется по формуле

$$Q_{ог}, \text{ м}^3/\text{с} = K_{од} \cdot \Sigma Q_{двс}, \quad (1)$$

где  $K_{од}$  – коэффициент одновременности работы машин с ДВС в отдельной выработке,  $K_{од} = 1; 0,9; 0,85$  при одновременной работе одной, двух, трех и более машин соответственно;  $Q_{двс}$  – количество воздуха, необходимое для проветривания каждой машины по вредным факторам ДВС, м<sup>3</sup>/с [26].

Расчет  $Q_{двс}$  производится в отдельности для каждого нормируемого компонента выхлопных газов (оксид углерода, диоксид азота в пересчете на NO<sub>2</sub>) при возможных максимальных оборотах двигателя и для

кислорода. В качестве требуемого количества воздуха принимается наибольший из полученных расходов воздуха.

**Выполнение расчета требуемого количества воздуха для рабочих зон машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания**

Более подробно принцип расчета осуществлен на примерах некоторого горно-шахтного оборудования, используемого на действующих рудниках. При выполнении расчетов приняты данные оборудования, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Технические данные оборудования

Модель	Стандарт токсичности	Объем двигателя, л	Скорость вращения коленчатого вала, об/мин	Мощность, кВт
ST-14	Tier 3B	10,8	2100	224
Cat R1700	Tier 3B	11,1	2100	242
MT-42	Tier 4	15,0	1800	391

**Принципы расчета требуемого расхода воздуха по параметрам выхлопных отработанных газов**

Для расчета требуемого расхода воздуха по фактору независимого выделения вредных компонентов выхлопных газов эксплуатируемых машин с ДВС используется формула расчета требуемого расхода свежего воздуха для разжижения вредных компонентов выхлопных газов до допустимых значений:

$$Q_{\text{ДВС}}, \text{ м}^3/\text{с} = \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}}} \cdot g_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{вых}}$  – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксид азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ ), % по объему;  $C_{\text{доп}}$  – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему для  $\text{CO}$  – 0,0017 %, для  $\text{NO}_x$  – 0,00026 %;  $g_{\text{вых}}$  – количество выхлопных газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Количество выхлопных газов  $g_{\text{вых}}$  определяется по натурным замерам при использовании расходомера на режимах, нормированных п. 344 ФНиП [12]. При отсутствии возможности прямого измерения расхода выхлопных газов  $g_{\text{вых}}$  рассчитывается по данным технического паспорта машин по формуле для четырехтактного двигателя [27]:

$$g_{\text{вых}}, \text{ м}^3/\text{с} = k \frac{Vn}{2}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий давление избытка;  $V$  – суммарный рабочий объем цилиндров,  $\text{м}^3$ ;  $n$  – скорость вращения коленчатого вала, об/с (максимальные обороты из технической характеристики двигателя).

Результаты расчета необходимого количества воздуха вышеприведенным способом представлены в табл. 4. Для расчета были использованы данные отбора проб воздуха горно-шахтного оборудования на одном из действующих рудников.

Использование приведенной формулы является обоснованным, поскольку она учитывает технический запас, связанный с тем, что двигатель работает на полных оборотах не постоянно, и средний объем выделяемых выхлопных газов меньше максимального, рассчитанного по формуле. Данная формула применима как для атмосферных двигателей, так и для двигателей с турбонаддувом, что подтверждается нормативной документацией [28, 29] и научной литературой [30–39].

Измеряемая объемная концентрация отработавших газов не требует пересчета при изменении температуры потока отработавших газов согласно определению объемной концентрации компонента газа:

$$C_i, \text{ м}^3/\text{м}^3 = \frac{V_i(P, T)}{V(P, T)}, \quad (4)$$

где  $V_i(P, T)$  – объем, занимаемый  $i$ -м компонентом газа;  $P$  – давление газа, Па;  $T$  – температура, К;  $V(P, T)$  – суммарный объем газа, равный сумме объемов всех компонентов, составляющих газ.

Таблица 4

Результаты расчета количества воздуха по компонентам выхлопных газов

Модель	Отборы проб воздуха, % по объему		Требуемое количество воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	
	CO	$\text{NO}_x$	CO	$\text{NO}_x$
ST-14	0,0106	0,0052	1,2	3,8
ST-14	0,0132	0,0104	1,5	7,6
Cat R1700	0,0061	0,0052	0,7	3,9
Cat R1700	0,0106	0,0026	1,2	1,9
MT-42	0,01	0,0002	1,3	0,2
MT-42	0,01	0,01	1,3	8,7

При изменении внешних условий (давление и температура) параметры всех компонентов газа меняются одинаково. Следовательно, объем, занимаемый отдельным компонентом газа, изменяется пропорционально суммарному объему газа. В таком случае объемная концентрация при изменении внешних условий не изменяется.

При отсутствии необходимых исходных данных по измеренным концентрациям вредных веществ к расчету принимаются паспортные характеристики двигателя по вредным выбросам. Формула расчета (2) в этом случае имеет вид:

$$Q_{\text{двс}}, \text{ м}^3/\text{мин} = k \cdot \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}} \cdot \rho} \cdot N, \quad (5)$$

где  $k$  – переводной коэффициент из часов в минуты и из процентов в доли от единицы;  $C_{\text{вых}}$  – удельное количество выбросов по соответствующему компоненту, кг/кВт·ч;  $C_{\text{доп}}$  – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему;  $\rho$  – плотность соответствующего газа, кг/м<sup>3</sup>; для CO принимается равной 1,15 кг/м<sup>3</sup>, для NO<sub>x</sub> – 2,1 кг/м<sup>3</sup>;  $N$  – мощность двигателя, кВт.

### Расчет воздуха по экологическому классу двигателя

При проектировании новых рудников, участков или горизонтов рассматриваются вопросы закупки новой техники с ДВС. В этом случае отсутствует возможность выполнить расчет требуемого количества воздуха на основе фактических выбросов вредных компонентов выхлопных газов. Однако закупаемая техника для ведения горных работ подлежит обязательной сертификации по нормам токсичности двигателей, и производитель подтверждает соответствие двигателя определенному экологическому классу.

Когда проектом предусматривается закупка новых машин с ДВС, расход воздуха по компонентам выхлопных газов рассчитывается в зависимости от экологического класса двигателя в зависимости от нормы выбросов, представленных в табл. 2.

В соответствии с формулой (5) расход воздуха для машин с ДВС определяется:

$$Q_{\text{двс}}, \text{ м}^3/\text{с} = \frac{NY}{60}, \quad (6)$$

где  $N$  – мощность двигателя, л.с;  $Y$  – удельная величина расхода воздуха на 1 л.с. мощности двигателя в соответствии со стандартами

токсичности дизельных двигателей, определяется по табл. 5, 6.

Таблица 5

### Удельный расход воздуха на единицу мощности двигателей внутреннего сгорания по стандартам токсичности

Стандарт	Мощность двигателя, л.с.	Y, м <sup>3</sup> /мин на 1 л.с.	
		CO	NO <sub>x</sub>
Tier 2/Stage II	177-760	2,24	13,74
Tier 3/Stage IIIA	177-760	2,24	9,16
Stage IIIB	177-760	2,24	4,58
Tier 4/Stage IV	177-760	2,24	0,92

Таблица 6

### Результаты расчета количества воздуха по стандартам токсичности

Модель	Стандарт	Мощность двигателя, л.с.	Требуемое количество воздуха, м <sup>3</sup> /с	
			CO	NO <sub>x</sub>
ST-14	Stage IIIB	304,5	11,4	23,2
Cat R1700	Stage IIIB	329,0	12,3	25,1
MT-42	Tier 4	531,6	19,8	8,2

### Расчет воздуха по содержанию кислорода

Согласно п. 335 ФНиП [12] количество воздуха, подаваемого в рабочие зоны при работе машин с ДВС, должно обеспечивать содержание кислорода в воздухе рабочих зон машин с ДВС не менее 20 % по объему.

Таким образом, при вычислении необходимо также выполнять расчет количества воздуха по фактору содержания кислорода в рабочих зонах таких машин.

Расчет по содержанию кислорода основывается на использовании зависимости, описывающей химическую реакцию окисления углеводородного топлива: согласно этой зависимости, для каждого вида топлива существует стехиометрическое количество кислорода, то есть такое, которое необходимо для полного сгорания топлива ( $L_0$ ).

В топливе содержится C/100 кг углерода, H/100 кг водорода, S/100 кг летучей серы, O/100 кг кислорода. Следовательно, стехиометрическое количество кислорода ( $L_0$ ) определяется из условий полного сгорания всего топлива по стехиометрическим уравнениям [17–20, 40]:

$$L_0, \text{ кг} = \frac{2,67C + 8H + S + O}{100}. \quad (7)$$

Таким образом, стехиометрическое количество кислорода определяется для каждого вида топлива в отдельности и зависит от его химического состава. Элементный состав

товарных марок дизельного топлива представлен в табл. 7 [17–20, 41].

На основании данных элементного состава товарных марок дизельного топлива содержание отдельных компонентов в топливах колеблется в малых пределах, и его следует считать относительно постоянным. Тогда стехиометрическое количество кислорода также можно считать постоянным числом. Принимается среднее значение массовой доли кислорода в воздухе, составляющее 0,232. Количество воздуха, необходимое для сгорания килограмма топлива, называют стехиометрическим количеством воздуха  $L_0$ . Согласно [17–20, 42], для марки дизельного топлива «Летнее» стехиометрическое количество воздуха  $L_0$  составляет 14,42 кг.

Условия, описанные выше, приводятся для идеального случая. Однако в реальных условиях смешение топлива и воздуха в рабочем цилиндре двигателя отличается. Зачастую двигатель работает с избытком или недостатком воздуха. По этой причине при расчете необходимой подачи воздуха в двигатель используется величина  $\alpha$ , называемая коэффициентом избытка воздуха и показывающая отношение реального количества воздуха, подаваемого в двигатель, к теоретически необходимому. Величина  $\alpha$  всегда составляет больше единицы и для дизельных двигателей колеблется в пределах 1,3–2,2 в зависимости от конструктивных особенностей [15–19, 43–45]. Стоит отметить, что при этом в процессе горения топлива используется то же количество кислорода, а не используемый в процессе кислород выбрасывается в составе выхлопных газов в атмосферу. Зависимость для расчета количества остаточного кислорода:

$$I_{\text{кисл}}, \text{ кг} = 0,21(\alpha - 1) \cdot L_0. \quad (8)$$

Таким образом, для машины с ДВС расход воздуха ( $Q_0$ ), необходимый для обеспечения работы двигателя, вычисляется следующим образом:

$$Q_0, \text{ м}^3/\text{с} = \frac{21 \cdot L_0 \cdot N \cdot q}{3600 \cdot \rho \cdot K_0}, \quad (9)$$

где  $N$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $q$  – удельный расход топлива при номинальной мощности, кг/кВт·ч;  $\rho$  – плотность воздуха (принимается равной 1,23 кг/м<sup>3</sup>);  $K_0$  – содержание кислорода в воздухе, % по объему.

Расход воздуха  $Q_0$  – это количество воздуха, при котором весь кислород,

Таблица 7

Элементарный состав дизельного топлива

Химический элемент	Содержание компонента, % по массе
Углерод	85,5–87,0
Водород	12,8–14,0
Летучая сера	0,2–1,0
Кислород	0

Таблица 8

Результаты расчета количества воздуха по содержанию кислорода

Модель	Требуемое количество воздуха, м <sup>3</sup> /с
ST-14	4,1
Cat R1700	4,4
MT-42	7,8

содержащийся в воздухе, используется для процесса окисления топлива. Тогда расход воздуха, требуемый для обеспечения процесса сгорания топлива, при котором конечное содержание кислорода в воздухе после сгорания топлива составит не менее 20 % по объему, определяется как:

$$Q_{\text{ДВС}}, \text{ м}^3/\text{с} = \frac{21 \cdot L_0 \cdot N \cdot q}{3600 \cdot \rho \cdot (K_0 - 20)}, \quad (10)$$

где  $N$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $L_0$  – количество воздуха, необходимое для сгорания килограмма топлива, составляет 14,42 кг;  $q$  – удельный расход топлива при номинальной мощности, кг/кВт·ч;  $\rho$  – плотность воздуха, принимается равной 1,23 кг/м<sup>3</sup>;  $K_0$  – содержание кислорода в воздухе, поступающем на проветривание, % по объему. Принимается равным содержанию кислорода в атмосферном воздухе, так как на рудниках применяется обособленное проветривание рабочих зон (табл. 8).

Выполнение расчетов по описанной выше методике позволяет определить необходимое количество воздуха для разбавления компонентов выхлопных газов. Сравнение компонентов расчета представлено в табл. 9.

К итоговому расчету следует принимать наибольший из рассчитанных компонентов. Предлагаемая методика расчета требуемого количества воздуха имеет вариативность подхода. В зависимости от конкретных ситуаций и наличия необходимых исходных данных расчет количества воздуха по разжижению оксида углерода и окислов азота выхлопных газов может быть осуществлен на основании актуальных отборов проб, технического паспорта существующей машины или нормам токсичности двигателя. В рассматриваемом случае были выполнены отборы проб выхлопных газов действующих машин, а расчет по нормам

Таблица 9

## Результаты расчета количества воздуха по стандартам токсичности

Модель	Требуемое количество воздуха, м <sup>3</sup> /с						
	отборы проб		норма токсичности		O <sub>2</sub>	max	У, м <sup>3</sup> /мин на 1 л.с
	CO	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub>			
ST-14	1,2	3,8	11,4	23,2	4,1	4,1	0,8
ST-14	1,5	7,6	11,4	23,2	4,1	7,6	1,5
Cat R1700	0,7	3,9	12,3	25,1	4,4	4,4	0,8
Cat R1700	1,2	1,9	12,3	25,1	4,4	4,4	0,8
MT-42	1,3	0,2	19,8	8,2	7,8	7,8	0,9
MT-42	1,3	8,7	19,8	8,2	7,8	8,7	1

токсичности двигателя осуществлен для примера. В итоговом сравнении не стоит учитывать результаты расчета, выполненные по нормам токсичности дизельных двигателей, по причине наличия данных экспериментальных замеров компонентов выхлопных газов нескольких однотипных машин. Расчет по нормам токсичности двигателя следует выполнять на стадии проектирования новых участков, горизонтов или рудников в случае закупки новых машин, когда отсутствуют данные актуальных отборов проб выхлопных газов или паспортных характеристик двигателей.

### Заключение

На примере выполненного расчета можно сделать выводы, что фактическая норма подачи свежего воздуха на основании данных отборов проб выхлопных газов исправных машин на практике оказывается ниже требуемых по нормам токсичности. Отчасти это может быть связано с технологическим процессом работы горного оборудования, цикл работы которого отличается от цикла сертификации двигателя по нормам EPA Tier и Stage.

Современная техника с исправными устройствами нейтрализации выхлопных газов обеспечивает снижение концентраций компонентов выхлопных газов до значений, регламентируемых стандартами Stage и EPA Tier, используемых в зарубежных странах. Однако фактический режим работы горного оборудования воздействует на фактические выбросы опасных и ядовитых компонентов выхлопных газов, что в свою очередь влияет на расчет требуемого количества воздуха для их разжижения. Как показывает практика, многие горные предприятия обосновывают норму подачи свежего воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов от 1,5 до 3,0 м<sup>3</sup>/мин на 1 л.с. мощности двигателя в Ростехнадзоре России.

Использование приведенных способов расчета требуемого количества воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов поможет горным

предприятиям определить фактическую потребность подачи свежего воздуха при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания, и выявить для проектных организаций наиболее подходящее оборудование в зависимости от конкретных условий каждого месторождения, что в свою очередь даст возможность повысить эффективность использования ресурсов вентиляционного оборудования.

### Библиографический список

1. ПБ 06-111-95 Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: утв. постановлением Госгортехнадзором России от 23.01.1995 № 4. – М., 1995.
2. ВНТП 13-2-93 Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки: утв. Комитетом Российской Федерации по металлургии (протокол от 27.01.1993 № 1) по согласованию с Госгортехнадзором РФ (протокол от 13.12.1992 № 4). – М., 1993.
3. Stinnette J. D., De Souza E. Establishing total airflow requirements for underground metal/non metal mines with tier IV diesel equipment // 23rd World Mining Congress and Expo. – 2013.
4. Chang P., Xu G. Review of Diesel Particulate Matter Control Methods in Underground Mines // Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress. – Springer, Singapore, 2019. – P. 461–470. DOI: 10.1007/978-981-13-1420-9\_39
5. McGinn S. Controlling diesel emissions in underground mining within an evolving regulatory structure in Canada and the United States of America. – 2016.
6. Zhang H. A framework to develop a hybrid methodology for modeling of diesel particulate matter concentration in underground mine ventilation systems: dis. – Laurentian University of Sudbury, 2019.
7. Coal miners exposed to diesel exhaust emissions / R. Reger [et al.] // Inhaled Particles V. – Pergamon, 1982. – P. 799–815. DOI: 10.1093/annhyg/26.8.799
8. The main components of vehicle exhaust gases and their effective catalytic neutralization / L.R. Sasykova [et al.] // Oriental Journal of Chemistry. – 2019. – Vol. 35, № 1. – P. 110–127. DOI: 10.13005/ojc/350112
9. Mischler S.E., Colinet J.F. Controlling and monitoring diesel emissions in underground mines in the United States. – 2009.
10. 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. – P. 1–7.
11. Villa T.F. Development of an unmanned aerial vehicle (UAV) system for in-situ characterization of combustion source emissions. – Queensland University of Technology, 2017. DOI: 10.5204/thesis.eprints.114062

12. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности / утв. приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599 (с изменениями на 21 ноября 2018 года). – М., 2018.
13. ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. – М., 2005.
14. ГОСТ 32511-2013 (ЕН 590:2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. – М., 2013.
15. ГОСТ 305-2013 Топливо дизельное. Технические условия (Переиздание). – М., 2013.
16. Ходяков А.А., Хлопков С.В., Бернацкий В.В. Физико-химические свойства дизельного топлива стандарта «Евро» // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 1. – С. 40–43.
17. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. – Кн. 1: Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 479 с.
18. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 289 с.
19. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
20. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. для вузов по спец. «Строительные и дорожные машины и оборудование» / А.С. Хачиян, К.А. Морозов, В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 311 с.
21. Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery (Директива 97/68/ЕС Европейского Парламента и Совета от 16 декабря 1997 г. о сближении законов государств-членов, касающихся принятия мер против выбросов газообразных загрязнителей и твердых частиц из двигателей с внутренним сгоранием двигателей для установки на внедорожной мобильной технике) // Official Journal of the European Communities. – 1998. – L59/1. – С. 1–86.
22. Directive 2002/88/EC of the European Parliament and of the Council of 9 December 2002 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery (Директива 2002/88/ЕС Европейского Парламента и Совета от 9 декабря 2002 г. об изменении Директивы 97/68/ЕС о сближении законов государств-членов, касающихся принятия мер против выбросов газообразных загрязнителей и твердых частиц из двигателей с внутренним сгоранием двигателей для установки на внедорожной мобильной технике) // Official Journal of the European Communities. – 2003. – L35. – С. 1–54.
23. Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery (Директива 2004/26/ЕС Европейского Парламента и Совета от 21 апреля 2004 г. об изменении Директивы 97/68/ЕС о сближении законов государств-членов, касающихся принятия мер против выбросов газообразных загрязнителей и твердых частиц из двигателей с внутренним сгоранием двигателей для установки на внедорожной мобильной технике) // Official Journal of the European Communities. – 2004. – L146. – С. 1–107.
24. Code of Federal Regulations, 40. Part 89. 1999. CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES. (Свод Федеральных нормативных актов, том 40, часть 89. Контроль выбросов новых и используемых внедорожных машин с двигателями внутреннего сгорания) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-89> (дата обращения: 10.02.2020).
25. Code of Federal Regulations, 40. Part 1039. 2012. CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES. (Свод Федеральных нормативных актов, том 40, часть 1039. Контроль выбросов новых и используемых внедорожных машин с двигателями внутреннего сгорания) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.govregs.com/regulations/40/1039> (дата обращения: 10.02.2020).
26. Временная инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт. – М., 1983.
27. Рудничная вентиляция: справочник / под ред. проф. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1988.
28. ГОСТ 17.2.2.01-84. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений. – М., 1984.
29. ГОСТ 31967-2012 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения (с Изменением № 1). – М., 2012.
30. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – М.: Изд-во РУДН, 1998. – 214 с.
31. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности отработавших газов дизеля с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе // Строительные и дорожные машины. – 2016. – № 9. – С. 30–34.
32. Голохваст К.С., Чернышев В.В., Угай С.М. Выбросы автотранспорта и экология человека (обзор литературы) // Экология человека. – 2016. – № 1.
33. Ковалевский В.В., Фролов А.В. Оценка экологической безопасности автомобильных дизелей термодинамически-резистивным методом // Экологические системы и приборы. – 2007. – № 1. – С. 1–6.
34. Экологические показатели дизельных двигателей с разными условиями смесеобразования при работе на биодизельном топливе / В.Ф. Шапко [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2011. – № 13. – С. 150–153.
35. Исследование качественного состава твердых частиц выхлопов ДВС автомобилей без пробега / В.В. Чернышев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S4–11. – С. 160–167.
36. Камалдинов В.Г., Марков В.А., Драгунов Г.Д. Оценка показателей рабочего цикла НССД-двигателя с наддувом при различных частотах вращения коленчатого вала и нагрузках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 6 (651). – С. 25–34.
37. Кулешов В.К., Бразовский В.В., Баранов В.А. Контроль параметров продуктов сгорания в фильтрационных установках // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 29–34.
38. Лукшо В.А., Тюфяков А.С., Григорьев Л.Ю. Технические аспекты обеспечения экологической безопасности АТС с газовыми двигателями // Труды НАМИ. – 2009. – № 242. – С. 133–147.
39. Исследование экотоксичности присадок и их влияние на показатели качества дизельного топлива / К.Ю. Осинская [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 11–3. – С. 117–122.
40. Лариков Н.Н. Теплотехника: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
41. Терентьев Г.А., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. – М.: Химия, 1989. – 272 с.
42. Теплотехника: учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.
43. Heilig L., Voß S. A scientometric analysis of public transport research // Journal of public transportation. – 2015. – Vol. 18, № 2. – P. 8. DOI: 10.5038/2375-0901.18.2.8
44. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground

mines / J.C. Kurnia [et al.] // Science of the Total Environment. – 2014. – Vol. 481. – P. 317–334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058

45. Оценка масштабов турбулентности в пламени при диффузионном горении дизельного топлива / Е.Л. Лобода [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2016. – № 4 (42). DOI: 10.17223/19988621/42/9

## References

1. PB 06-111-95 Edinye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh podzemnym sposobom: utv. Postanovleniem Gosgortekhnadzorom Rossii ot 23.01.1995 № 4 [PB 06-111-95 Unified safety rules for the development of ore, nonmetallic and placer deposits of minerals by the underground method: approved. Resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia dated January 23, 1995 No. 4]. Moscow, 1995.

2. VNTP 13-2-93 Normy tekhnologicheskogo proektirovaniia gornodobyvaiushchikh predpriatii metallurgii s podzemnym sposobom razrabotki: utv. Komitetom Rossiiskoi Federatsii po metallurgii (protokol ot 27.01.1993, no. 1) po soglasovaniiu s Gosgortekhnadzorom RF (protokol ot 13.12. 1992, no. 4) [VNTP 13-2-93 Standards for technological design of mining metallurgy enterprises with underground mining method: approved. The Committee of the Russian Federation for Metallurgy (protocol of January 27, 1993, no. 1) in agreement with the Gosgortekhnadzor of the Russian Federation (protocol of December 13, 1992, no. 4)]. Moscow, 1993.

3. Stinnette J. D., De Souza E. Establishing total airflow requirements for underground metal/non metal mines with tier IV diesel equipment. *23rd World Mining Congress and Expo*, 2013.

4. Chang P., Xu G. Review of Diesel Particulate Matter Control Methods in Underground Mines. *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. Springer, Singapore, 2019, pp. 461-470. DOI: 10.1007/978-981-13-1420-9\_39

5. McGinn S. Controlling diesel emissions in underground mining within an evolving regulatory structure in Canada and the United States of America, 2016.

6. Zhang H. A framework to develop a hybrid methodology for modeling of diesel particulate matter concentration in underground mine ventilation systems: dis. thesis. Laurentian University of Sudbury, 2019.

7. Reger R. et al. Coal miners exposed to diesel exhaust emissions. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1982, vol. 26, iss. 8, pp. 799–815. DOI: 10.1093/annhyg/26.8.799

8. Sassykova L.R. et al. The main components of vehicle exhaust gases and their effective catalytic neutralization. *Oriental Journal of Chemistry*, 2019, vol. 35, no. 1, pp. 110-127. DOI: 10.13005/ojc/350112

9. Mischler S.E., Colinet J.F. Controlling and monitoring diesel emissions in underground mines in the United States, 2009.

10. 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.

11. Villa T.F. Development of an unmanned aerial vehicle (UAV) system for in-situ characterization of combustion source emissions. Queensland University of Technology, 2017. DOI: 10.5204/thesis.eprints.114062

12. Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh: Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti, utv. prikazom Rostekhnadzora ot 11.12.2013, no. 599 (s izmeneniami na 21 noiabria 2018 goda) [Safety rules for mining and processing of solid minerals: Federal norms and rules in the field of industrial safety, approved by order of Rostekhnadzor dated December 11, 2013, no. 599 (as amended on November 21, 2018)]. Moscow, 2018.

13. GOST R 52368-2005 (EN 590:2009) Topливо dizel'noe EVRO. Tekhnicheskie usloviia [GOST R 52368-2005 (EN 590: 2009) Diesel fuel EURO. Specification]. Moscow, 2005.

14. GOST 32511-2013 (EN 590:2009) Topливо dizel'noe EVRO. Tekhnicheskie usloviia [GOST 32511-2013 (EN 590: 2009) Diesel fuel EURO. Specifications]. Moscow, 2013.

15. GOST 305-2013 Topливо dizel'noe. Tekhnicheskie usloviia (Pereizdanie) [GOST 305-2013 Diesel fuel. Specifications (Reissue)]. Moscow, 2013.

16. Khodiakov A.A., Khlopkov S.V., Bernatskii V.V. Fiziko-khimicheskie svoistva dizel'nogo topliva standarta "Evro" [Physical and chemical properties of diesel fuel standard of Euro]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2017, no. 1, pp. 40-43.

17. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiian A.S. et al. Dvigateli vnutrennego sgoraniia. Kniga 1. Teoriia rabochikh protsessov [Internal combustion engines. Book 1. Workflow Theory]. Ed. V.N. Lukanina. 2nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2005, book 1, 479 p.

18. Orlin A.S. Dvigateli vnutrennego sgoraniia. Ustroistvo i rabota porshnevnykh i kombinirovannykh dvigatelei [Internal combustion engines. Design and operation of piston and combined engines]. Eds. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. 4nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 289 p.

19. Kruglov M.G., Mednov A.A. Gazovaia dinamika kombinirovannykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Gas dynamics of combined combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 360 p.

20. Khachiian A.S., Morozov K.A., Lukanin V.N. et al. Dvigateli vnutrennego sgoraniia [Internal combustion engines]. Ed. V.N. Lukanin, 2nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 1985, 311 p.

21. Direktiva 97/68/ES Evropeiskogo Parlamenta i Soveta ot 16 dekabria 1997 g. o sblizhenii zakonov gosudarstv-chlenov, kasaiushchikhsia priniatiia mer protiv vybrosov gazoobraznykh zagriaznitatelei i tverdykh chastits iz dvigatelei s vnutrennim sgoraniem dvigatelei dlia ustanovki na vnedorozhnoi mobil'noi tekhnike [Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery], available at: <https://www.ecolex.org/details/legislation/directive-97-68ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council-on-the-approximation-of-the-laws-of-the-member-states-re-lating-to-measures-against-the-emission-of-gaseous-and-particulate-pollutants-from-internal-combustion-engines-to-be-installed-in-non-road-mobile-machinery-lex-faoc-038124/> (accessed 10 December 2019).

22. Direktiva 2002/88/ES Evropeiskogo Parlamenta i Soveta ot 9 dekabria 2002 g. ob izmenenii Direktivy 97/68/ES o sblizhenii zakonov gosudarstv-chlenov, kasaiushchikhsia priniatiia mer protiv vybrosov gazoobraznykh zagriaznitatelei i tverdykh chastits iz dvigatelei s vnutrennim sgoraniem dvigatelei dlia ustanovki na vnedorozhnoi mobil'noi tekhnike [Directive 2002/88/EC of the European Parliament and of the Council of 9 December 2002 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery], available at: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/directive-2002-88-ec> (accessed 10 December 2019).

23. Direktiva 2004/26/ES Evropeiskogo Parlamenta i Soveta ot 21 apreliia 2004 g. ob izmenenii Direktivy 97/68/ES o sblizhenii zakonov gosudarstv-chlenov, kasaiushchikhsia priniatiia mer protiv vybrosov gazoobraznykh zagriaznitatelei i tverdykh chastits iz dvigatelei s vnutrennim sgoraniem dvigatelei dlia ustanovki na vnedorozhnoi mobil'noi tekhnike [Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery], available at: <https://www.icqc.eu/userfiles/File/directive%202004%2022%20EC%20measuring%20instruments.pdf> (accessed 10 December 2020).

24. Svod Federal'nykh normativnykh aktov, tom 40, chast' 89. Kontrol' vybrosov novykh i ispol'zuemykh vnedorozhnykh mashin s dvigateliama vnutrennego sgoraniia [Code of Federal Regulations, 40. Part 89. 1999. CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES], available at: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-89> (accessed 10 December 2020).

25. Svod Federal'nykh normativnykh aktov, tom 40, chast' 1039. Kontrol' vybrosov novykh i ispol'zuemykh vnedorozhnykh mashin s dvigateliami vnutrennego sgoraniia [Code of Federal Regulations, 40. Part 1039. 2012. CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES], available at: <https://www.govregs.com/regulations/40/1039> (accessed 10 December 2020).

26. Vremennaia instruksiia po raschetu kolichestva vozdukh, neobkhodimogo dlia provetrivaniia rudnykh shakht. Moscow, 1983.

27. Rudnichnaia ventilatsiia: spravochnik [Mine ventilation: a handbook]. Ed. professor K.Z. Ushakov. Moscow: Nedra, 1988.

28. GOST 17.2.2.01-84. Dizeli avtomobil'nye. Dymnost' otrabotavshikh gazov. Normy i metody izmerenii [GOST 17.2.2.01-84. Diesels are automobile. Smoke in exhaust gases. Measurement standards and methods]. Moscow, 1984.

29. GOST 31967-2012 Dvigateli vnutrennego sgoraniia porshnevye. Vybrosty vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami. Normy i metody opredeleniia (s Izmeneniiem № 1) [GOST 31967-2012 Reciprocating internal combustion engines. Emissions of harmful substances with exhaust gases. Norms and methods of determination (with Amendment No. 1)]. Moscow, 2012.

30. Gorbunov V.V., Patrakh'al'tsev N.N. Toksichnost' dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Study of the toxicity of exhaust gases of a diesel engine with intermediate cooling of charging air when operating on natural gas]. Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 1998, 214 p.

31. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Issledovanie toksichnosti otrabotavshikh gazov dizelia s promezhutochnym okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukh pri rabote na prirodnom gaze [Study of the toxicity of exhaust gases of a diesel engine with intermediate cooling of charging air when operating on natural gas]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2016, no. 9, pp. 30-34.

32. Golokhvast K.S., Chernyshev V.V., Ugai S.M. Vybrosty avtotransporta i ekologiia cheloveka (obzor literatury) [Emissions from vehicles and human ecology (literature review)]. *Ekologiia cheloveka*, 2016, no. 1.

33. Kovalevskii V.V., Frolov A.V. Otsenka ekologicheskoi bezopasnosti avtomobil'nykh dizelei termokhimicheski-rezistivnym metodom [The estimation of motor diesel engine ecological safety by thermochemical-photoconductive method]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2007, no. 1, pp. 1-6.

34. Shapko V.F. et al. Ekologicheskie pokazateli dizel'nykh dvigatelei s raznymi usloviiami smeseobrazovaniia pri rabote na biodizel'nom toplive [Environmental performance of diesel engines with different mixing conditions when operating on biodiesel fuel]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 13, pp. 150-153.

35. Chernyshev V.V. et al. Issledovanie kachestvennogo sostava tverdykh chastits vykhlopov DVS avtomobilei bez probega [A qualitative study composition of particulate matter emissions engine vehicles without mileage]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2014, no. S4-11, pp. 160-167.

36. Kamaldinov V.G., Markov V.A., Dragunov G.D. Otsenka pokazatelei rabocheho tsikla HCCI-dvigatel'ia s nadduvom pri razlichnykh chastotakh vrashcheniia kolenchatogo vala i nagruzkakh [Evaluation of duty cycle parameters of an HCCI-supercharged engine at various loads and rotational speeds of the crankshaft]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2014, no. 6 (651), pp. 25-34.

37. Kuleshov V.K., Brazovskii V.V., Baranov V.A. Kontrol' parametrov produktov sgoraniia v fil'tratsionnykh ustanovkakh [Control of combustion product parameters in filtration devices]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 29-34.

38. Luksho V.A., Tiufiakov A.S., Grigor'ev L.Iu. Tekhnicheskie aspekty obespecheniia ekologicheskoi bezopasnosti ATS s gazovymi dvigateliami [Technical aspects of ensuring the environmental safety of vehicles with gas engines]. *Trudy NAMI*, 2009, no. 242, pp. 133-147.

39. Osinskaia K.Iu. et al. Issledovanie ekotoksichnosti prisadok i ikh vliianie na pokazateli kachestva dizel'nogo topliva [Research of ecotoxicity of additives and its effect on quality scores of diesel fuel]. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 11-3, pp. 117-122.

40. Larikov N.N. Teplotekhnika [Heat engineering]. 3rd ed. Moscow: Stroiizdat, 1985, 432 p.

41. Terent'ev G.A., Tiukov V.M., Smal' F.V. Motornye topliva iz al'ternativnykh syr'evykh resursov [Motor fuels from alternative raw materials]. Moscow: Khimiia, 1989, 272 p.

42. Lukanin V.N., Shatrov M.G., Kamfer G.M. et al. Teplotekhnika [Heat engineering]. Ed. V.N. Lukanin. 2nd ed. Moscow: Vysshiaia shkola, 2000, 671 p.

43. Heilig L., Voß S. A scientometric analysis of public transport research. *Journal of public transportation*, 2015, vol. 18, no. 2, 8 p. DOI: 10.5038/2375-0901.18.2.8

44. Kurnia J.C. et al. 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

45. Loboda E.L. et al. Otsenka masshtabov turbulentnosti v plameni pri diffuzionnom gorenii dizel'nogo topliva [Evaluation of the turbulence scale in a flame at the diffusion combustion of diesel fuel]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2016, no. 4(42). DOI: 10.17223/19988621/42/9

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляция в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недрапользование. – 2020. – Т.20, №3. – С.280–290. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8

Please cite this article in English as:

Grishin E.L., Zaitsev A.V., Kuzminykh E.G. Ensuring Safe Workplace Conditions when Working Equipment with Internal Combustion Engines by Ventilation in Underground Mines. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol.20, no.3, pp.280-290. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8