

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.3.21

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТРЕБУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ РАЗЖИЖЕНИЯ ОТРАБОТАННЫХ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

Е.Г. Кузьминых, Д.С. Кормщиков
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На современных месторождениях полезных ископаемых для погрузки и транспортировки горной породы применяется оборудование с приводом от двигателей внутреннего сгорания. Выхлопные газы, производимые техникой с дизельными двигателями, содержат в своем составе опасные и ядовитые компоненты, такие как угарный и углекислый газ, углеводороды, окислы азота, сажу и другие компоненты. Поскольку это оборудование используется в добычных выработках, проветриваемых за счет вентиляторов местного проветривания, неправильный подход к расчету необходимого количества воздуха для разбавления основных компонентов выхлопных газов и недостаточная вентиляция может привести к накоплению вредных и ядовитых газов в тупиковых выработках. Кроме того, отдельным вопросом является расчет необходимого количества воздуха на стадии проектирования нового участка или рудника при использовании техники с двигателями внутреннего сгорания. Зачастую у проектных организаций отсутствуют данные о фактических выбросах оборудования, которое планируется использовать в проектной документации. В соответствии с этими особенностями, расчетные методы должны позволять выполнять расчеты необходимого количества воздуха как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. В статье рассмотрены основные методы расчета необходимого количества воздуха для разбавления основных компонентов выхлопных газов при работе техники с двигателями внутреннего сгорания. Определены возможности применения методов для проектных организаций и горных предприятий, а также вопросы, требующие дополнительного исследования. Одним из таких вопросов является влияние конструктивных особенностей двигателей внутреннего сгорания на производимое количество выхлопных газов и способ их замера в условиях эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, расчет, требуемое количество воздуха.

Введение

В настоящее время механизация процесса погрузки и транспортировки горной породы на рудных месторождениях осуществляется с применением самоходного оборудования с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) или от электрического двигателя. Однако в большинстве случаев применение оборудования на электрическом приводе оказывается затруднительным в силу несовершенства аккумуляторов и ограниченности зоны работы техники при использовании проводного подключения к электросети рудника. Наиболее широкое распространение получило оборудование с двигателями внутреннего сгорания.

В процессе работы двигатель внутреннего сгорания производит выхлопные газы, состоящие из водяного пара, азота, несгоревшего кислорода, а также опасных и ядовитых компонентов, таких как углекислый (CO_2) и угарный газ (CO), окислов азота (NO_x), углеводородов и других компонентов.

В условиях подземных рудников выбросы двигателей внутреннего сгорания являются загрязняющими факторами рудничного воздуха. Требования к составу рудничного воздуха регламентируются на законодательном уровне требованиями пункта 154 Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1]. Кроме того, пунктом 335 установлены требования к остаточному кислороду в подземных выработках, где работает оборудование с ДВС.

Таким образом, для исключения накопления опасных и ядовитых компонентов в местах работы оборудования с двигателями внутреннего сгорания должны выполняться расчеты по определению необходимого количества воздуха для разбавления основных компонентов выхлопных газов до предельно-допустимых концентраций, установленных требованиями «Правил безопасности» [1]. Этот расчет требуется проводить как на стадии эксплуатации горного предприятия, так и на стадии проектирования.

В настоящее время можно выделить несколько методов расчета количества свежего воздуха, необходимого для разбавления выхлопных газов в условиях подземных рудников:

- расчет по условной норме подачи;
- расчет по экологическому классу двигателя;
- расчет по компонентам выхлопных газов.

Независимо от метода выполнения расчета по разбавлению основных компонентов выхлопных газов должен выполняться расчет по содержанию остаточного кислорода в горных выработках, где работает техника с двигателями внутреннего сгорания, в соответствии с требованиями пункта 335 «Правил безопасности» [1]. С этой целью авторами [2] был предложен подход к выполнению данного расчета и в данной статье он рассматриваться не будет.

Расчет по условной норме подачи

Способ расчета по условной норме подачи свежего воздуха появился одним из первых. Его суть заключается в определении необходимого количества воздуха умножением установленной нормы подачи на общую мощность двигателя. Во многих странах величина нормы подачи свежего воздуха на единицу мощности двигателя регламентируется требованиями нормативных документов. Ниже представлены нормативы подачи свежего воздуха в м³/мин на 1 л.с. мощности двигателя некоторых стран [3-5]:

- | | |
|----------------|--------------|
| - Австралия | от 4,2 до 5; |
| - Канада | от 4 до 7,7; |
| - Китай | 5,5; |
| - Россия | 5; |
| - США | 5; |
| - Чили | 5,3; |
| - Южная Африка | 5. |

Большинство стран имеет схожий уровень нормы подачи свежего воздуха на единицу мощности двигателя в количестве 5 м³/мин на 1 л.с. Диапазон нормы подачи свежего воздуха в Австралии и Канаде объясняется учетом оборудования разного экологического класса.

В Российской Федерации норма была принята во второй половине XX века и фигурировала в требованиях «Единых правил безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом» (шифр ПБ 06-111-95). Правила действовали до 2003 года и в следующей редакции требования к норме подачи свежего воздуха были исключены.

В настоящее время в Российской Федерации требования по норме подачи можно встретить в «Нормах технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки» [6]. Однако указанный документ носит рекомендательный характер по причине отсутствия регистрации в Минюсте России и в соответствии с пунктом 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».

На практике горные предприятия выполняют научно-исследовательские работы и устанавливают норму подачи свежего воздуха. В результате норма подачи свежего воздуха оказывается на уровне 1,5 – 2 м³/мин на 1 л.с.

Кроме того, некоторые производители горно-шахтного оборудования в документации к оборудованию приводят необходимый уровень вентиляции для разбавления выхлопных газов в соответствии с требованиями Управления по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых (The Mine Safety and Health Administration – MSHA). Необходимый уровень вентиляции для каждого типа оборудования определяется на основании серии испытаний оборудования, выполненных совместно с MSHA. Например, производитель горно-шахтного оборудования Epiroc [7] приводит данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Техническая информация горно-шахтного оборудования

| Оборудование | Мощность двигателя | Класс токсичности двигателя | Требуемое количество воздуха, в соответствии с MSHA part 7 | Условная норма подачи воздуха на 1 л.с. |
|------------------|--------------------|------------------------------------|--|---|
| Minetruck MT42 | 535 л.с. | EPA Tier 3 / EU Stage IIIA | 509,7 м ³ /мин | 1,0 м ³ /мин |
| | 535 л.с. | EPA Tier 4 final /EU Stage V | 396,4 м ³ /мин | 0,7 м ³ /мин |
| Scooptram ST1030 | 250 л.с. | EPA Tier 3/ EU Stage IIIA | 255 м ³ /мин | 1,0 м ³ /мин |
| | 265 л.с. | EPA Tier 4 interim / EU Stage IIIB | 340 м ³ /мин | 1,3 м ³ /мин |
| Scooptram ST14 | 335 л.с. | EPA Tier 3/EU Stage IIIA | 538 м ³ /мин | 1,6 м ³ /мин |
| Scooptram ST18 | 450 л.с. | EPA Tier 3/EU Stage IIIA | 495 м ³ /мин | 1,1 м ³ /мин |
| | 472 л.с. | EPA Tier 4 final/EU Stage IV | 481 м ³ /мин | 1,0 м ³ /мин |

Рассчитанная условная норма подачи в соответствии с требованиями, установленными MSHA, находится в пределах от 0,7 до 1,6 м³/мин, что значительно меньше значения, приведенного в нормативных документах.

Использование нормы подачи свежего воздуха на единицу мощности двигателя в количестве 5 м³/мин на 1 л.с приводит к завышению количества воздуха, необходимого для проветривания рабочих зон, и к увеличению энергозатрат на проветривание рудника. Снижение объема подачи воздуха на действующих горных предприятиях может быть обосновано при выполнении научно-исследовательских работ по определению нормы подачи для действующего парка техники. При проектировании горных предприятий обеспечить энергоэффективное проветривание можно, только если производитель оборудования выполнил испытания и определил условную норму подачи свежего воздуха для дизельной техники.

Расчет по экологическому классу двигателей

Второй способ расчета основывается на том, что двигатели внутреннего сгорания сертифицируются в соответствии с требованиями норм токсичности. Нормы токсичности двигателей внутреннего сгорания для внедорожной техники определяются в соответствии со стандартами:

1. Stage – стандарт сертификации, принятый в странах Евросоюза (ЕС).
2. EPA Tier – стандарт сертификации, принятый в США.

Данными стандартами предусматривается порог выбросов внедорожной техники по окислам азота и оксиду углерода в зависимости от диапазона мощности двигателя. Большинство основного оборудования, используемого на горных предприятиях, соответствует диапазону мощности от 130 до 560 кВт. Нормы токсичности для двигателей мощностью от 130 до 560 кВт представлены в таблице 3 [8–11].

Таблица 2

Нормы выбросов CO и NO_x дизельных двигателей внедорожной техники в соответствии со стандартами токсичности США и ЕС

| Стандарт США | | | Стандарт ЕС | | |
|--------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|
| Название | CO | NO _x | Название | CO | NO _x |
| Tier 2 | 3,5 г/кВт ч | 6,4 г/кВт ч | Stage II | 3,5 г/кВт ч | 6 г/кВт ч |
| Tier 3 | 3,5 г/кВт ч | 4 г/кВт ч | Stage IIIA | 3,5 г/кВт ч | 4 г/кВт ч |
| | | | Stage IIIB | 3,5 г/кВт ч | 2 г/кВт ч |
| Tier 4 | 3,5 г/кВт ч | 0,4 г/кВт ч | Stage IV | 3,5 г/кВт ч | 0,4 г/кВт ч |

В России количество выбросов внедорожной техникой регламентируется требованиями ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН N 96) [12]. Требования ГОСТа к выбросам вредных веществ соответствуют уровню Европейского стандарта Stage II.

Из требований к величине выбросов CO и NO_x может быть рассчитана величина нормы подачи свежего воздуха на единицу мощности двигателя для приведенного диапазона от 130 до 560 кВт.

Таблица 3

Удельный расход воздуха на единицу мощности двигателей ДВС по стандартам токсичности

| Стандарт | Удельный расход воздуха на единицу мощности двигателя, м ³ /мин на 1 л.с. | |
|-------------------|--|-------------------------------|
| | По компоненту CO | По компоненту NO _x |
| Tier 2/Stage II | 2,24 | 13,74 |
| Tier 3/Stage IIIA | 2,24 | 9,16 |
| Stage IIIB | 2,24 | 4,58 |
| Tier 4/Stage IV | 2,24 | 0,92 |

Норма токсичности дизельных двигателей, рассчитанная на основании требований стандартов экологичности, отличается от фактической нормы, определенной производителем по требованиям MSHA. Стандарты токсичности ограничивают максимальное количество выбросов для определенного стандарта, при этом производитель может выпустить в рамках данного стандарта двигатель внутреннего сгорания с меньшими фактическими выбросами.

Этот метод расчета применим как в эксплуатации, так и при проектировании горного предприятия. При этом рассчитанное таким способом количество воздуха, необходимое для разбавления выхлопных газов, будет необоснованно завышено.

Расчет по компонентам выхлопных газов

Третий метод позволяет выполнять расчет на основании выбросов техники с двигателями внутреннего сгорания до предельно-допустимой концентрации по соответствующему компоненту. При этом расчет может выполняться на основании замеров фактического количества выхлопных газов и содержащихся в них концентрациях газов, либо удельного значения количества выбросов, полученных из паспортных характеристик двигателя.

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ДОП}}} \cdot g_{\text{ВЫХ}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где $C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2), % по объему; $C_{\text{ДОП}}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему; $g_{\text{ВЫХ}}$ – количество выхлопных газов, $\text{м}^3/\text{с}$.

При отсутствии технической возможности выполнить замеры выбрасываемого количества выхлопных газов они могут быть рассчитаны по формуле:

$$g_{\text{ВЫХ}} = \frac{V \cdot n}{2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где V – суммарный рабочий объем цилиндров, м^3 ; n – скорость вращения коленчатого вала, об/с.

При отсутствии данных замеров концентраций компонентов выхлопных газов требуемое количество воздуха для разжижения компонентов выхлопных газов может быть определено на основе паспортных данных двигателя, установленного на оборудовании:

$$Q_{\text{ДВС}} = k \cdot \frac{q_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ДОП}} \cdot \rho} \cdot N, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3)$$

где k – переводной коэффициент из часов в секунды и из процентов в доли от единицы; $q_{\text{ВЫХ}}$ – удельное количество выбросов по соответствующему компоненту, $\text{кг}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$; $C_{\text{ДОП}}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему; ρ – плотность соответствующего газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; N – мощность двигателя, кВт.

Стоит отметить, что расчет по удельному количеству выбросов может использоваться проектными организациями даже при отсутствии паспортных данных двигателя. В этом случае в расчете необходимо использовать предельные значения выбросов, соответствующие экологическим нормам стандартов Ера Tier или Stage.

Метод расчета, основанный на компонентах выхлопных газов, позволяет эксплуатирующим и проектным организациям определять более точные значения количества воздуха, необходимого для разбавления выхлопных газов для каждой отдельной машины. В настоящее время отдельным вопросом приведенного метода является точность определения количества выхлопных газов, производимых двигателями внутреннего сгорания.

Определение количества выхлопных газов

Зависимость (2) для определения количества выхлопных газов встречается во многих литературных источниках [13–16]. При этом она не учитывает некоторые конструктивные особенности двигателей внутреннего сгорания.

Двигатели внутреннего сгорания, устанавливаемые на внедорожную и строительную технику в большинстве случаев являются четырехтактными дизельными двигателями.

Работа цилиндра двигателя осуществляется последовательными тактами: впуска воздуха, сжатия воздуха, рабочий такт, выпуск отработанных газов.

Свежий воздух, поступающий в цилиндры двигателя, не успевает заполнить весь объем цилиндра за отведенное время впуска. Отношение реального объема цилиндра к объему воздуха, заполняющего цилиндр за такт впуска воздуха, называют коэффициентом наполнения, который для дизельных двигателей составляет от 0,8 до 0,95 [13–15].

Современные двигатели внутреннего сгорания оборудуются системами принудительного нагнетания воздуха в цилиндры двигателя, называемыми системами наддува. Существуют различные системы наддува воздуха, однако наибольшее распространение на дизельных двигателях получили системы газотурбинного наддува. Такая система использует кинетическую энергию выхлопных газов для вращения нагнетателя воздуха, соединенного с впускной системой двигателя. В результате работы наддува создается избыточное давление во впускной системе, что позволяет повысить плотность и массу воздуха, подаваемого в двигатель. Таким образом возрастает коэффициент наполнения цилиндра [13–17].

В теории работы двигателей внутреннего сгорания существует зависимость для определения массового расхода свежего воздуха, поступающего в двигатель в течение часа работы [13]:

$$G_B = \left(\frac{120}{\tau}\right) V \cdot n \cdot \rho_B \cdot \eta_H, \text{ кг/ч}, \quad (4)$$

где τ – число тактов двигателя; V – суммарный объем цилиндров двигателя, м^3 ; n – скорость вращения коленчатого вала, об/мин ; ρ_B – плотность воздуха, кг/м^3 ; η_H – коэффициент наполнения цилиндров двигателя.

Если сравнить потребление воздуха двигателями одного объема, оборудованных системой нагнетания воздуха и без него, массовое потребление свежего воздуха будет больше у двигателей с системой наддува воздуха в силу большей плотности воздуха и коэффициента наполнения цилиндров двигателя. В связи с этим количество производимых выхлопных газов также может различаться.

ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН N 96) [12] устанавливает правила на методику проведения стендовых испытаний дизельных двигателей. В методике приводятся требования к нагрузочным испытаниям двигателей, измеряемым параметрам, а также способам расчета количества выхлопных газов и содержащихся в них концентрациях. При стендовых испытаниях фиксируется потребляемое количество воздуха и топлива двигателем в зависимости от нагрузочных режимов.

В соответствии с ГОСТом [12] массовый и объемный расход «влажных» отработанных газов может быть рассчитан из измеренного значения поступающего влажного воздуха и количества расходуемого топлива:

$$G_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{С.В.}} + G_T, \text{ кг/ч}, \quad (5)$$

где $G_{\text{С.В.}}$ – массовый расход влажного воздуха для сгорания, кг/ч ; G_T – массовый расход топлива, кг/ч .

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_{\text{С.В.}} + 0,746 \cdot G_T, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (6)$$

где $V_{с.в.}$ – объемный расход «влажного» воздуха, поступающего для сгорания, м³/ч; G_T – массовый расход топлива, кг/ч.

На примере дизельного двигателя объемом 2 литра был выполнен сравнительный расчет параметров потребления свежего воздуха по зависимости (4), количества выхлопных газов по формулам (2) и (6), а также фактических замеров количества выхлопных газов. Замеры расхода выхлопных газов проводились на двигателе без нагрузки в трубе диаметром 100 мм, подсоединенной к выхлопной системе. Результаты расчета представлены на рисунке 1.

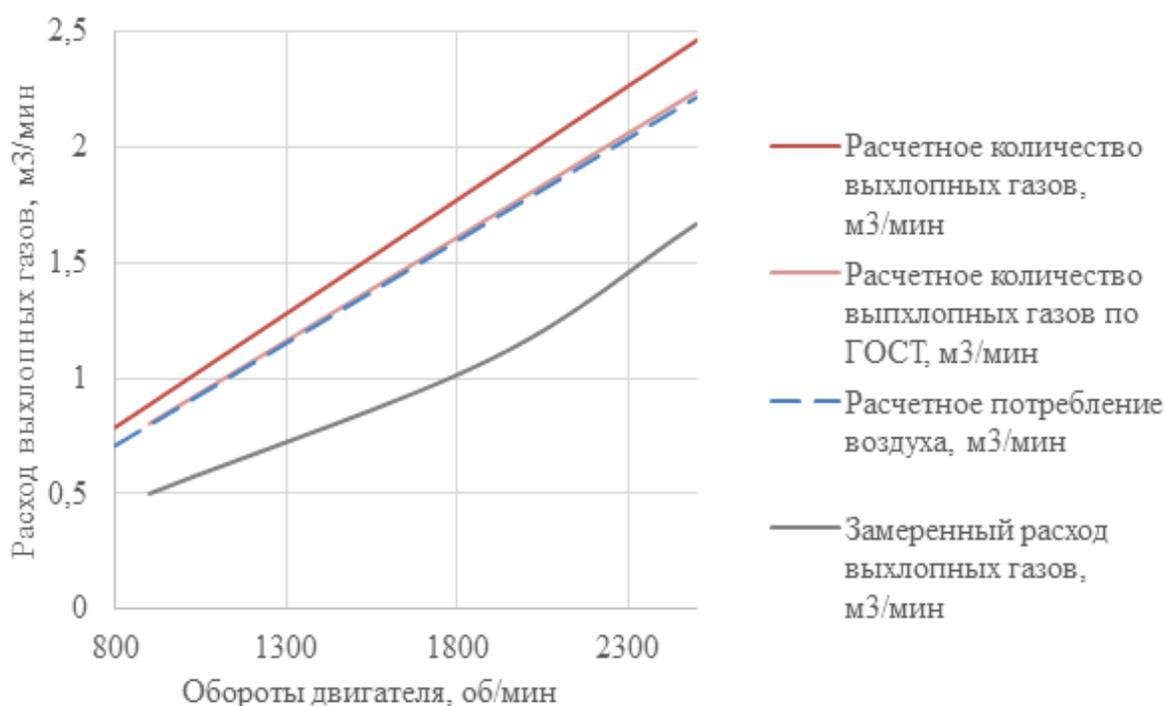


Рис. 1. Сравнение расчетных и измеренных значений количества выхлопных газов

Таким образом, количество выхлопных газов, рассчитанное из условия потребления воздуха двигателем, в соответствии с ГОСТ Р 41.96-2011 и зависимостью (2) имеют расхождения в результатах расчета в пределах 10% при использовании в качестве расхода топлива показания бортового компьютера.

Результаты расчетов имеют сильное расхождение с результатами фактических замеров анемометром. В связи с этим необходимо провести дополнительные исследования влияния места и способа замера выхлопных газов в зависимости от нагрузки двигателя на точность замера, а также влияние систем наддува на расчетное количество выхлопных газов.

Выводы

Рассмотренные методы позволяют проектным и эксплуатирующим организациям решать задачи по определению необходимого количества воздуха для разжижения основных компонентов CO и NO_x, содержащихся в выхлопных газах. При выполнении расчетов наиболее рационально использовать несколько методов с целью снижения вероятности выполнить неверный расчет по заниженным данным.

Для проектных организаций подход к выполнению расчетов основывается на технических данных оборудования, которое может быть запрошено у производителя, или величинах нормируемых компонентов выхлопных газов. Результаты

расчета будут получены с учетом запаса, связанного с различием максимальной величины нормируемых компонентов выхлопных газов и фактических параметров работы оборудования.

В условиях эксплуатации горного предприятия могут применяться совместно несколько методов по расчету необходимого количества воздуха. Основным методом может служить расчет по компонентам выхлопных газов для конкретных машин, а также выполняться проверка по норме подачи воздуха, установленной в ходе научно-исследовательских работ, для действующего парка оборудования. Комбинирование методов позволит выявлять машины, на которые необходимо подавать больше свежего воздуха, а также служить индикатором необходимости выполнения ремонтных работ или технического обслуживания конкретной машины.

Однако необходимо выполнить дополнительные исследования, связанные с определением количества выхлопных газов. Следует установить влияние способа и места замера, а также внешней нагрузки двигателя на измеряемое количество выхлопных газов, и определить степень влияния конструктивных особенностей двигателя на результаты расчета количества выхлопных газов.

Исследование выполнено в рамках Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0145-C-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 11.12.2013, № 32935. (с изм. на 21.11.2018 г. Редакция, действующая с 17.03.2019 г.) – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/499066482> (Дата обращения: 31.07.2020).
2. Левин Л. Ю., Зайцев А.В., Гришин Е.Л., Семин М.А. Расчет количества воздуха по содержанию кислорода для проветривания рабочих зон при применении машин с двигателями внутреннего сгорания // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – №. 8. – С. 43-46.
3. Halim A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines – Are we using the correct values? // Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. – Colorado, 2017. – P. 1-7.
4. Stinnette J.D. Establishing total airflow requirements for underground metal/non metal mines based on the diesel equipment fleet: thesis. – Kingston, Ontario, Canada, 2013. – 269 p.
5. 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. – С. 461-470.
6. ВНТП 13-2-93. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки: утв. 27.01.93 Дата введения 01.04.1993 г. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200087796>. (Дата обращения 31.07.2020)
7. Epiroc: сайт. [Производитель горно-шахтного оборудования]. – URL: <https://www.epiroc.com/ru-ru/products/loaders-and-trucks>. (Дата обращения: 31.07.2020). – Текст электронный.
8. 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 // Official Journal of the European Communities – 1998 – L59/1 – P. 1-86.
9. 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 // Official Journal of the European Communities – 2003 – L35 – P. 1-54.
10. 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 // Official Journal of the European Communities – 2004 – L146 – P. 1-107.

11. CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES: Code of Federal Regulations. Title 40, part 1039. – Текст электронный // Electronic Code of Federal Regulations. – URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?mc=true&node=pt40.36.1039&rgn=div5> (Дата обращения: 08.07.2020).
12. ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН №96) Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094453>. (Дата обращения 8.07.2020).
13. Хачиян А.С., Морозов К.А., Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Учеб. для вузов / Под ред. Луканина В.Н. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 311 с.
14. Алексеев В.П., Воронин В.Ф., Грехов Л.В. 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. – 283 с.: ил.
15. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
16. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учеб. Пособие для вузов. – М.: Изд-во РУДН, 1998. – 214 с.
17. Гаврилов А.А. Агрегаты наддува: курс лекций для студентов ВлГУ. – Владимир, 2016. – 133 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.3.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ПРОИЗОШЕДШЕГО ГРУППОВОГО НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ НА ОДНОМ ИЗ РУДНИКОВ РФ

Л.Ю. Левин, Д.С. Кормициков, Е.Л. Гришин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты натуральных и теоретических исследований рудничной атмосферы и происходящих в ней аэрологических процессов на одном из рудников РФ в месте происшествя группового несчастного случая, связанного с окислением сульфидных руд. Произведены натурные измерения фактического качественного состава воздуха после происшествия, его микроклиматических параметров. Отобраны и обработаны пробы воздуха для определения качественного состава и анализа жизнедеятельности бактерий. Произведено трехмерное моделирование процесса проветривания горной выработки – места несчастного случая.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, окисление сульфидных руд, тупиковые выработки, математическое моделирование, ядовитые газы.

Введение

В октябре 2019 года на одном из рудников РФ произошел групповой несчастный случай со смертельным исходом: в результате удушения произошла гибель троих работников предприятия. Несчастный случай произошел в транспортном заезде в камеру. В результате закладки очистного пространства камеры после окончания ее отработки образовалась непроветриваемая тупиковая выработка, имеющая уклон и большую протяженность ($\gg 10$ м). Большая часть выработки пройдена во вмещающих породах, тупиковая часть выработки располагается непосредственно в рудном теле, контакт с породным массивом представлен сульфидными рудами, почва выработки покрыта рудным штыбом.

Специалисты ГИ УрО РАН приняли участие в расследовании причин произошедшего в качестве экспертов. Исследования разбиты на две стадии: