

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ РАБОТЫ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНОЙ МАШИНЫ FAMBITION FL14

М.О. Пересторонин, Е.В. Накаряков
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты измерений фактических газовыделений от погрузочно-доставочной машины Fambition FL14 (производство – Китай) с дизельным двигателем Volvo TAD1350VE (348 л. с.). Измерения выполнены в шахтных условиях для двух режимов работы двигателя – холостой ход и максимальная нагрузка. На основании результатов измерений выполнена оценка экологичности выхлопных газов при работе погрузчика, рассчитана норма подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя. Оценка выполнена в сравнении со шведским погрузчиком Epiroc Scooptram ST-14, применение которого распространено во многих полиметаллических рудниках России и стран СНГ. Результаты исследования показали, что погрузчик FL14 является менее экологичным, чем его конкурент, погрузчик ST-14. Норма подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя Volvo TAD1350VE составляет 4,5 м³/мин, что является высоким показателем, однако остается приемлемым для использования машины в условиях российских шахт.

Ключевые слова: погрузочно-доставочная машина, двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, экология, норма подачи воздуха.

Введение

До недавнего времени выполнение погрузочно-доставочных операций в одном из крупнейших полиметаллических рудников России выполнялось с использованием шахтных погрузчиков шведских марок Sandvik (модели LH 410, LH 514) и Epiroc (модели Scooptram ST-14 и ST-1030). Однако на сегодняшний день с целью обновления и усовершенствования имеющейся технической базы рудника планируется ввод в эксплуатацию дополнительных погрузочно-доставочных машин (ПДМ). Одним из основных претендентов на эту роль является китайский погрузчик Fambition FL14.

В настоящее время в исследуемом руднике уже используется несколько таких машин с целью практической оценки их технических характеристик в сравнении с имеющимся проверенным временем оборудованием. Одним из показателей оценки является соответствие ПДМ Fambition FL14 стандартам экологичности, предъявляемым к шахтному оборудованию [1, 2]. Причем данный критерий является определяющим в решении о целесообразности масштабного внедрения этого погрузчика на производстве, поскольку от токсичности выхлопных газов зависит качество рудничной атмосферы, влияющее на здоровье горнорабочих и формирующее затраты на вентиляцию [3].

Настоящая статья содержит результаты экспериментальных измерений газовыделений, происходящих при работе ПДМ Fambition FL14 в режиме холостой работы двигателя, а также в режиме повышенной нагрузки, эквивалентной процессу отгрузки горной массы. Исследованию подлежали газы рудничной атмосферы, содержание которых регламентировано п. 151 ФНиП № 505 [4] – углекислый газ CO₂, метан CH₄, диоксид азота NO₂, кислород O₂, угарный газ CO. Измерения выполнены газоанализатором Drager X-am 5600 с возможностью определения концентрации газов в режиме реального времени и верифицированы лабораторным методом при помощи газовой хроматографии отобранных проб воздуха. На основании результатов измерений проведена оценка фактической экологичности погрузчика Fambition FL14 и сделан вывод о целесообразности его масштабного применения в полиметаллических рудниках взамен ПДМ фирм Sandvik и Epiroc.

Описание методики и условий измерений

Измерения газовыделений проводились в двух замерных пунктах сквозной выработки сечением $21,7 \text{ м}^2$ – на свежей струе (до ПДМ) и на исходящей струе воздуха (после ПДМ). Расход воздуха в выработке с машиной в период измерений составлял $34,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Схематичное расположение замерных пунктов [5, 6] при обследовании ПДМ Fambition FL14 в сквозной выработке представлено на рис. 1.

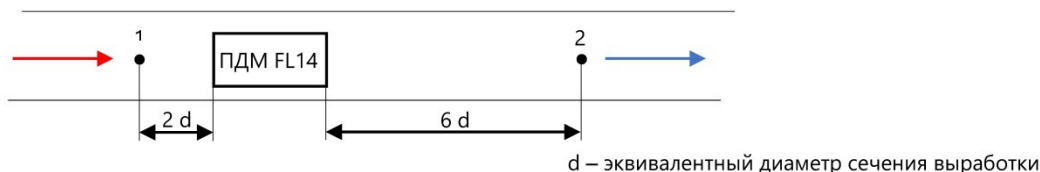


Рис. 1. Схематичное расположение замерных пунктов в сквозной выработке при измерении газовыделений от ПДМ Fambition FL14

Результаты измерений и аналитических расчетов

Результаты измерения газовыделений газоанализатором Drager X-am 5600 приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты измерения газовыделений от работы ПДМ Fambition FL14

| Замерный пункт | Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$ | Концентрация газов | | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| | | O_2 | CO_2 | CH_4 | CO | NO_2 |
| | | % | | | ppm | |
| т. 1 (свежая струя) | 34,7 | 20,9 | 0,05 | 0 | 2 | 0,04 |
| т. 2 (исходящая струя) | | холостой ход | | | | |
| | | 20,9 | 0,06 | 0 | 3 | 0,14 |
| | | максимальная рабочая нагрузка | | | | |
| | | 20,9 | 0,09 | 0 | 2 | 0,88 |
| Допустимые концентрации | | 20,0 | 0,5 | 0,5 | 17,0 | 1,0 |

Верификация измеренных газоанализатором концентраций газов при помощи газовой хроматографии отобранных проб воздуха на примере исходящей струи воздуха при максимальной рабочей нагрузке на двигатель ПДМ представлена в таблице 2.

Таблица 2
Верификация результатов измерений

| Метод измерения | Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$ | Концентрация газов | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|-------------|---------------|--------------|
| | | O_2 | N_2 | CO_2 | CH_4 | CO | NO_2 | H_2 |
| | | % | | | | ppm | | |
| Экспресс-метод (газоанализатор) | 34,7 | 20,9 | – | 0,09 | 0 | 2 | 0,88 | – |
| Лабораторный метод (хроматограф) | | 20,828 | 77,849 | 0,091 | 0,0002 | 1,14 | – | 0,068 |
| Допустимые концентрации | | 20,0 | – | 0,5 | 0,5 | 17,0 | 1,0 | – |

На основании результатов сравнительного анализа можно сделать вывод о достаточной сходимости методов лабораторного анализа и экспресс-анализа состава рудничного воздуха с учетом измеренных значений концентраций. В связи с этим дальнейшие расчеты будут производиться на основании результатов экспериментальных измерений газоанализатором, представленных в таблице 1.

В целом можно заключить, что, согласно полученным результатам (таблицы 1 и 2), при работе ПДМ Fambition FL14 превышения предельно допустимых концентраций ядовитых и горючих газов не зафиксированы.

В рассматриваемом руднике аналогичное исследование газовыделений от работы погрузочно-доставочных машин выполнялось в 2021 году в рамках работы по *определению и обоснованию минимально допустимых норм подачи воздуха в подземные рабочие зоны машин с ДВС* (обследован весь технологический транспорт рудника) и в 2022 году в рамках *газовой съемки рудника* (обследованы погрузочно-доставочные машины марки Epiroc). Материалы данных исследований, представленные в работах [7, 8], свидетельствуют о том, что на сегодняшний день из всех погрузочно-доставочных машин, применяемых в руднике, наименее экологичными являются ПДМ Epiroc Scooptram ST-14. С учетом этого оценку токсичности китайского погрузчика Fambition FL14 целесообразно выполнять в сравнении с данной моделью ПДМ.

Для определения экологичности ПДМ Fambition FL14 в сравнении с используемыми на руднике ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 выполнен пересчет измеренных концентраций окислов углерода и азота в выхлопных газах на оксид углерода CO (%) по формуле [9, 10]:

$$C_{CO}(\text{с учетом } NO_x) = C_{CO} + 6,5 \cdot (1,53 C_{NO_x} + C_{NO_2}), \quad (1)$$

где C_{CO} – концентрация оксида углерода (CO), измеренная газоанализатором, %; C_{NO_2} – концентрация диоксида азота (NO₂), измеренная газоанализатором, %; C_{NO_x} – концентрация иных оксидов азота (NO_x), измеренная газоанализатором, %.

С учетом приведения концентраций оксидов азота к концентрации оксида углерода по вышеуказанной формуле абсолютное газовыделение от ПДМ (м³/ч) рассчитывается по формуле [11]:

$$I_{CO} = \frac{60 \cdot g_{\text{вых}} \cdot C_{CO}}{100}. \quad (2)$$

В представленной формуле количество выхлопных газов $g_{\text{вых}}$ (м³/мин) определяется по данным технического паспорта машины по формуле для четырехтактного двигателя [11]:

$$g_{\text{вых}} = \frac{V \cdot n}{2}, \quad (3)$$

где V – суммарный рабочий объем цилиндров, м³; n – скорость вращения коленчатого вала, об/с (замеренная при отборе проб, или возможные максимальные обороты из технической характеристики двигателя).

Кроме того, в рамках исследования газовыделений от ПДМ Fambition FL14 и Epiroc Scooptram ST-14 выполнен расчет требуемой нормы подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя по формуле [3]:

$$q_{\text{лс}} = \frac{60 \cdot Q_{\text{треб}}}{N}, \quad (4)$$

где N – номинальная мощность двигателя машины, л. с.; $Q_{\text{треб}}$ – требуемое количество воздуха для проветривания машины (м³/с), определяемое как максимальное значение по факторам газовыделения оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и сгорания кислорода (O₂) [11]:

$$Q_{\text{треб}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{CO} \cdot Q}{CO_{\text{ПДК}}} \\ \frac{C_{NO_x} \cdot Q}{NO_{x\text{ПДК}}} \\ \frac{21 \cdot L_0 \cdot N \cdot q}{3600 \cdot \rho \cdot (C_{O_2} - 20)} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода (O_2), измеренная газоанализатором, %; Q – расход воздуха в выработке, $\text{м}^3/\text{с}$; $CO_{\text{ПДК}}$ – ПДК для оксида углерода (CO), ppm; $NO_{x\text{ПДК}}$ – ПДК для оксидов азота (NO_x), ppm; L_0 – количество воздуха, необходимое для сгорания килограмма топлива (14,42 кг); q – удельный расход топлива при номинальной мощности (0,3 кг/кВт·ч); ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчета эквивалентных газовыделений от погрузочно-доставочных машин и норм подачи воздуха на 1 л.с. двигателя сведены в таблицу 3. В расчете абсолютных газовыделений от работы ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 использованы результаты экспериментальных измерений газовыделений от машины с наиболее загрязняющим атмосферу двигателем [7, 8].

Таблица 3

Сравнительная таблица

| | | | |
|--|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Машина | | Fambition FL14 | Epiroc Scooptram ST-14 |
| Страна производитель | | Китай | Швеция |
| Год производства | | 2023 | 2015 |
| Двигатель | | Volvo TAD1350VE | Cummins QSM11 |
| Мощность | | 348 л.с. 256 кВт | 335 л.с. 250 кВт |
| Класс токсичности | стандарт США | Tier 3 | Tier 3 |
| | стандарт стран ЕС | Euro Stage IIIA | Euro Stage IIIA |
| Абсолютные газовыделения CO и NO_x в пересчете на CO | холостой ход | 0,00166 $\text{м}^3/\text{ч}$ | 0,00273 $\text{м}^3/\text{ч}$ |
| | рабочая нагрузка | 0,01806 $\text{м}^3/\text{ч}$ | 0,01436 $\text{м}^3/\text{ч}$ |
| Норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя машины | холостой ход | 1,1 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с. | 1,8 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с. |
| | рабочая нагрузка | 4,5 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с. | 3,6 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с. |

Заключение

В результате оценки токсичности фактических газовыделений, происходящих при работе китайского погрузчика Fambition FL14, в сравнении с газовыделениями от работы шведской ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 получены следующие выводы:

- газовыделения от ПДМ Fambition FL14 в режиме **холостого хода ниже** газовыделений от ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 (наиболее «грязной» машины в исследуемом руднике по состоянию на 2021 г.) **на 39%**;
- газовыделения от ПДМ Fambition FL14 в режиме **рабочей нагрузки выше** газовыделений от ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 26%**;
- норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Fambition FL14 в режиме **холостого хода ниже** нормы подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 41%**;
- норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Fambition FL14 в режиме **рабочей нагрузки выше** нормы подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 24%**.

На основании полученных результатов и с учетом того, что экологичность машины необходимо определять по газовыделениям в режиме рабочей нагрузки [5], можно сделать вывод, что исследованный китайский погрузчик Fambition FL14 является менее экологичным по сравнению с ПДМ шведских марок Sandvik (модели LH 410, LH 514) и Epiroc (модели Scooptram ST-14 и ST-1030).

Отмечается, что объем выполненных экспериментальных исследований является недостаточным для использования их результатов в практических расчетах и несет лишь оценочный характер. Для окончательного вывода об экологичности ПДМ Fambition FL14 и целесообразности ее масштабного использования в полиметаллических рудниках России требуется проведение дополнительных измерений с увеличением числа исследуемых машин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Control of emissions from new and in-use nonroad compression-ignition engines: Code of Federal Regulations. Title 40, part 1039. – Текст электронный // <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-U/part-1039> (Дата обращения: 25.03.2024).
2. 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.
3. 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 // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 280-290. – DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
5. Руководство по контролю вредных веществ в рудничном воздухе. – Екатеринбург, 2002. – 250 с.
6. Проведение воздушно-депресссионных и газовых съемок, определение устойчивости проветривания горных выработок и проявления низкотемпературной эманации на объектах ведения горных работ / МЧС России. – М., 2014. – 280 с.
7. Колесов Е.В. CFD-моделирование аэрогазодинамических процессов в тупиковой проходческой выработке при работе в ней дизельной техники // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 106-113. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.17.
8. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 113-118. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.22.
9. Кобылкин А. С. Исследование распределения вредных газов в горных выработках с использованием компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 202-207.
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. (доп. и перераб.) / ОАО «НИИ Атмосфера». – СПб., 2012. – 224 с.
11. Кузьминых Е.Г., Кормициков Д.С. Анализ методов расчета требуемого количества воздуха для разжижения отработанных выхлопных газов // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 107-115. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.21.