

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.

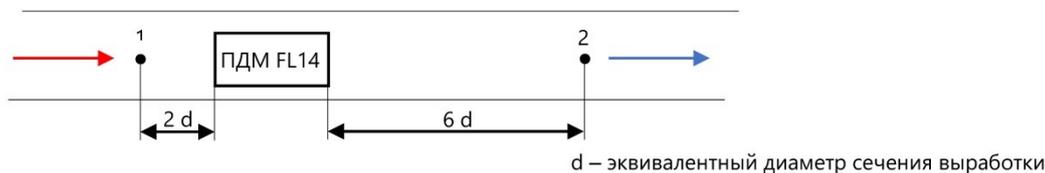


Рис. 1. Схематичное расположение замерных пунктов в сквозной выработке при измерении газовыделений от ПДМ Fambition FL14

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.