

*Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ,
проект № 20-45-596017 р_НОЦ_Пермский край*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов О.В. Научно-учебный измерительный комплекс для изучения газоносности горных пород по связанным газам // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 223-225.
2. Инструкция по эксплуатации планетарных шаровых мельниц тип РМ100/РМ200. Retsch GmbH & Co. КГ, Наан, Germany, Doc.Nr. D 98.540/640.9999. –2004. –32 с.
3. Медведев И.И., Полянина Г.Д. Газовыделения на калийных рудниках. – М.: Недра, 1974. – 163 с.
4. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. – Пермь: Тип. Купца Тарасова, 2008. – 412 с.: ил., табл.
5. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений солей // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 601-609. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1.
6. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, № 1. – P. 77-82. DOI: 10.28927/SR.421077.
7. Litvinovskaya N.A., Andreiko S.S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in under- mined salt rock mass // Eurasian mining. – 2015. – № 2 (24). – P. 15-17.
8. Береснев С.П., Сенюк В.В., Гончар В.И., Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Исследование меха- низма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
9. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В., Литвиновская Н.А., Нестеров Е.А., Бобров Д.А., Поляков А.Л., Лутович Е.А. Параметры профилактической дегазации пород почвы горных выработок при слоевой отработке третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазо- вое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 280-290. – DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.9.
10. Андрейко С.С., Бобров Д.А., Нестеров Е.А., Лукьянец Е.В. Оценка газоносности и газодинамиче- ских характеристик пород соляных и глинисто-карбонатных пачек на шахтном поле рудника второ- го рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 270-279. – DOI:10.15593/2712-8008/2020.3.7.
11. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distri- bution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – V. 39, № 4. – P. 354-363.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.17

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ТЕХНИКИ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

Е.Г. Кузьминых, Л.Ю. Левин, С.В. Мальцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В данной статье рассмотрен состав рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания. Приведены результаты исследования распространения ядовитых продуктов выхлопных газов в вентиляционной сети рудника в условия проветривания разрабатываемых горизонтов, а также преобразования монооксида азота до диоксида в рудничных условиях по тракту движения воздуха.

Ключевые слова: рудник, система вентиляции, техника с ДВС, выхлопные газы, оксиды азота, разрабатываемое месторождение.

Введение

Отработка месторождений полезных ископаемых сопровождается различными техно- логическими процессами, обеспечивающими извлечение полезного ископаемого из

недр на поверхность. Одним из процессов является транспортирование горной массы непосредственно от мест ее отбойки до мест загрузки для дальнейшей доставки на дневную поверхность. На многих рудниках, ведущих отработку рудных месторождений, для этих целей применяется самоходное оборудование с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Использование техники ДВС в вентиляционной сети формирует свои особенности рудничной атмосферы, а также напрямую влияет на безопасность ведения горных работ.

Основная часть

В настоящее время требования к концентрациям ядовитых компонентов выхлопных газов, содержащихся в рудничной атмосфере, регламентируются Федеральными нормами и правилами [1]. В соответствии с требованиями п. 151 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» концентрация кислорода в горных выработках должна составлять не менее 20%, а концентрации ядовитых газов (паров) не должны превышать значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1

Предельно-допустимые концентрации ядовитых газов

Наименование	Формула	Предельно-допустимая концентрация газа в действующих шахтах	
		% по объему	мг/м ³
Оксид углерода (оксид углерода)	CO	0,0017	20
Оксиды азота (оксиды азота) в пересчете на NO ₂	NO ₂	0,00026	5
Сернистый газ	SO ₂	0,00038	10

Кроме того, требования к контролю концентраций выхлопных газов регламентированы следующими пунктами [1]:

372. Количество свежего воздуха, подаваемого в выработки, где работают машины с ДВС, должно обеспечить содержание кислорода в воздухе не менее 20% (по объему). Концентрация вредных продуктов, с учетом выхлопа машин в рудничной зоне, не должна превышать величин, указанных в Правилах.

375. Содержание окиси углерода и окислов азота в отработавших газах двигателей машин проверяется перед спуском в шахту, а также в процессе эксплуатации в подземных условиях в сроки, предусмотренные настоящими Правилами.

380. В период эксплуатации состав неразбавленных отработавших газов двигателя проверяется после газоочистки на режимах холостого хода не реже одного раза в месяц на окись углерода и окислы азота.

Запрещается эксплуатация машин в горных выработках объема воздуха, в которых недостаточно для разбавления выхлопных газов до предельно допустимых концентраций, установленных в таблице. Анализ состава выхлопных газов должен быть произведен перед началом эксплуатации машины в подземных условиях, после каждого ремонта, регулировки двигателя или продолжительного (более двух недель) перерыва в работе и при заправке топливом новой марки.

381. При работе машин с двигателями внутреннего сгорания объем подаваемого в выработки воздуха должен обеспечить снижение вредных примесей в исходящей струе ниже предельно допустимых концентраций. Состав рудничной атмосферы в местах рабо-

ты машин должен определяться на окись углерода и окислы азота (у кабины машиниста) не реже одного раза в неделю, а в шахтах, опасных по газу, в соответствии со специальными мероприятиями по ведению горных работ в условиях «газового режима».

В соответствии с данными требованиями в условиях одного медно-колчеданного рудника проведено исследование распространения продуктов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети. Объектом исследования является рудник с подземным способом добычи полезного ископаемого, находящийся в процессе одновременного строительства и отработки участка нового месторождения. Разрабатываемое месторождение вскрыто двумя наклонными съездами, пройденными с действующего рудника. Запасы действующего рудника в настоящее время отработаны, работы на данном участке не ведутся. На участке действующего рудника находятся клетевой, скиповой и вентиляционный стволы, а также штольня в борту отработанного карьера. На нижних горизонтах разрабатываемого месторождения ведутся горно-капитальные работы.

Свежий воздух поступает на участок разрабатываемого месторождения за счет работы подземной главной вентиляторной установки, расположенной на вентиляционном наклонном съезде. По вентиляционному наклонному съезду осуществляется движение воздуха до рабочих горизонтов разрабатываемого месторождения. Выдача исходящей струи воздуха осуществляется по транспортному наклонному съезду на поверхность через вентиляционный и скиповой ствол, расположенные на участке действующего рудника. Данный этап развития вентиляционной сети соответствует промежуточной стадии реализации проектной схемы вентиляции до момента проведения сбойки со строящимся стволом. Упрощенная схема проветривания объекта исследования представлена на рисунке 1.

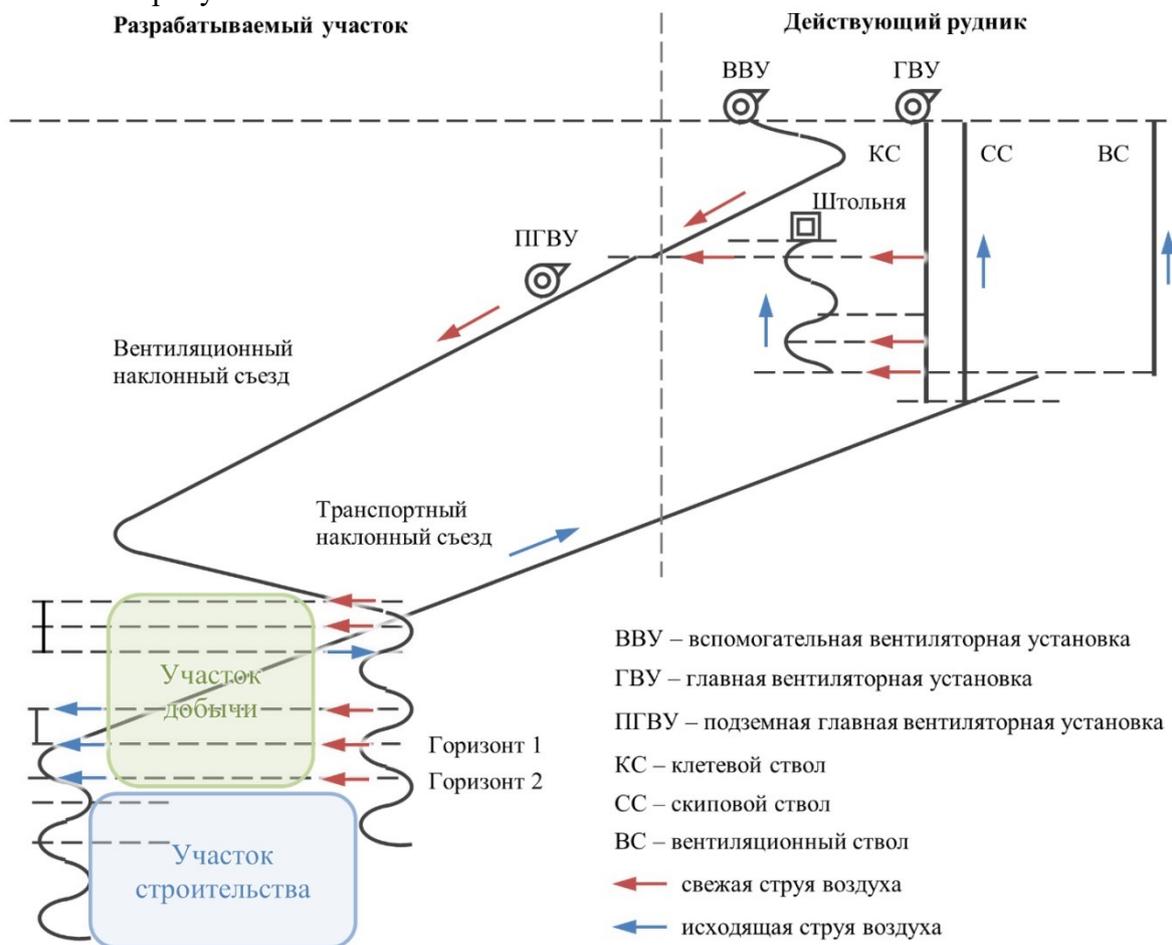


Рис. 1. Схема проветривания разрабатываемого месторождения

Загрузка породы и полезного ископаемого в шахтные самосвалы осуществляется погрузочно-доставочными машинами (ПДМ) с дизельными двигателями на участках ведения горных работ. Далее самосвалами производится транспортировка по двум трактам:

- 1) полезное ископаемое от очистных камер доставляется к комплексу загрузки скипов действующего рудника по транспортному наклонному съезду;
- 2) пустая порода доставляется на поверхность по вентиляционному наклонному съезду через штольню в борту отработанного карьера.

Основные типы техники с ДВС, занятой на подземных горных работах, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Применяемая самоходная техника
с двигателями внутреннего сгорания

Марка техники	Тип техники	Мощность двигателя	Экологический стандарт токсичности двигателя
CAT AD-45	Самосвал	596 л.с.	U.S. EPA Tier 3
ТН-545	Самосвал	612 л.с.	U.S. EPA Tier 2
ЛН-514	Погрузочно-доставочная машина	348 л.с.	U.S. EPA Tier 2
ЛН-517	Погрузочно-доставочная машина	421 л.с.	U.S. EPA Tier 2

Экологический класс применяемой техники соответствует уровню Tier 2/Tier 3. В соответствии с данными стандартами токсичности производители устанавливают предельные нормы по выбросам ядовитых компонентов. Требования к норме выбросов для данных экологических классов двигателей приведены в таблице 3 [2].

Таблица 3

Предельные выбросы загрязняющих веществ
в соответствии с экологическим классом

Название	Мощность двигателя	СО	NO _x
Tier 2	101–175 л.с.	5,0 г/кВт ч	6,6 г/кВт ч
	176–750 л.с.	3,5 г/кВт ч	
Tier 3	101–175 л.с.	5,0 г/кВт ч	4,0 г/кВт ч
	176–750 л.с.	3,5 г/кВт ч	

Исходя из данных экологического класса применяемой техники с ДВС, преобладающим компонентом выхлопных газов являются оксиды азота в шахтной сети.

В период исследования газового состава скиповой ствол находился в ремонте, в связи с чем движение шахтных самосвалов осуществлялось на поверхность по вентиляционному наклонному съезду. В шахтной вентиляционной сети в работе находилось порядка 24 единиц техники, из которых 7 ПДМ находились в работе на добычных и гор-

но-капитальных работах и 14 единиц самосвалов осуществляли транспортировку горной породы на поверхность.

Результаты исследования

Исследования газового состава рудничного воздуха на предмет распространения ядовитых компонентов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети проводились переносными газоанализаторами Drager. В качестве контролируемых газов приняты оксид углерода (CO) и окислы азота (NO и NO₂) в соответствии с требованиями Правил безопасности [1].

Ввиду особенности текущего состояния вентиляционной сети выхлопные газы от техники с ДВС проходили через весь участок разрабатываемого месторождения. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

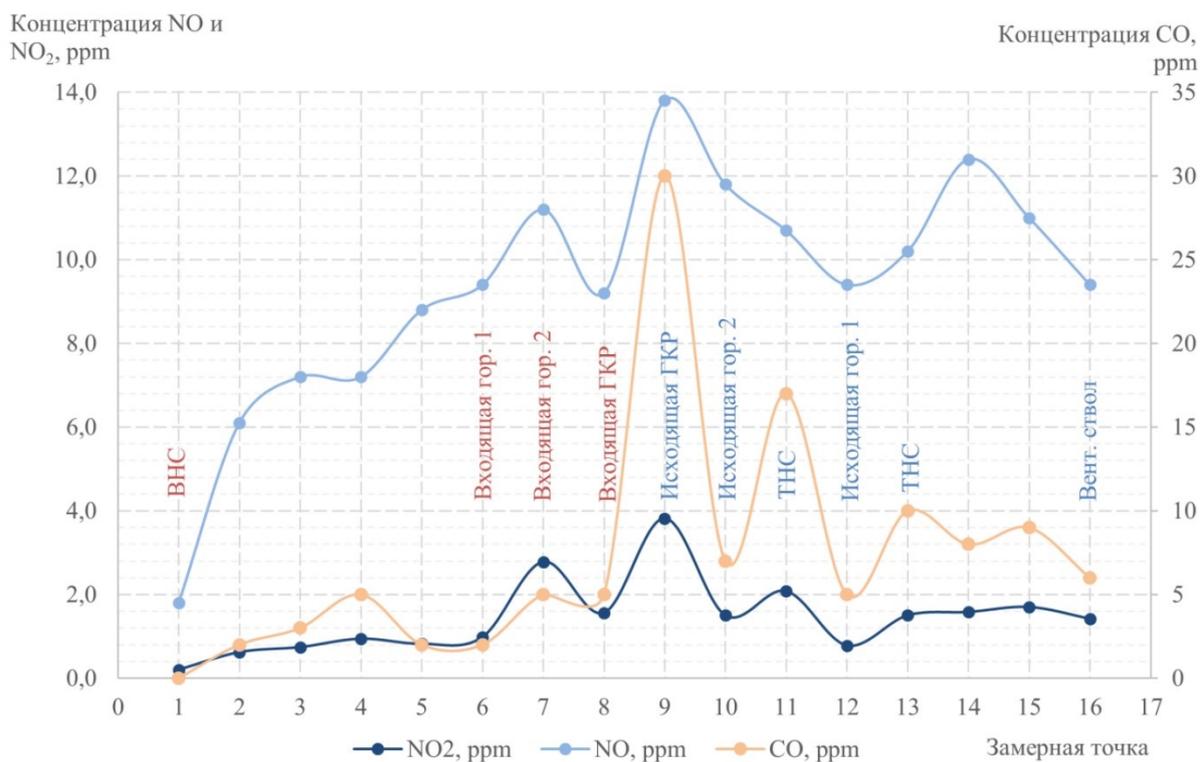


Рис. 2. Результаты измерений распределения концентраций выхлопных газов

Анализ данных, представленных на рисунке 2, показал, что можно выделить динамику накопления продуктов выхлопных газов в вентиляционной сети по тракту движения воздуха. На рисунке 2 можно выделить участок с повышенной концентрацией оксида углерода и окислов азота в точке 9 относительно начальной концентрации в точке 8, которая поступает на проветривание горно-капитальных работ. Прирост концентраций на данном участке вызван недостаточным уровнем проветривания горных работ, в связи с чем процесс выноса ядовитых продуктов взрывных работ и работы техники с ДВС значительно увеличивается во времени, что приводит к накоплению ядовитых газов на данном участке.

Далее по тракту движения исходящей струи воздуха происходит уменьшение концентраций ядовитых газов за счет разбавления утечками воздуха с вентиляционного наклонного съезда, а также исходящими струями воздуха с горизонтов. В целом можно отметить, что оксиды азота в шахтной вентиляционной сети имеют схожий характер изменений по тракту движения вентиляционной струи.

Монооксид азота при взаимодействии с кислородом в атмосферных условиях вступает в реакцию окисления, в результате чего происходит его окисление до диоксида азота. [3] Проведенные экспериментальные измерения показывают, что в рудничной атмосфере исследуемого рудника данное преобразование не наблюдается в значительной мере.

Тракт движения воздуха по участку обрабатываемого месторождения составляет порядка 10 км, из которых 4 км приходится на движение исходящей струи по транспортному наклонному съезду до вентиляционного ствола. При поступлении выхлопных газов в вентиляционную сеть на вентиляционном наклонном съезде время нахождения ядовитых продуктов составляет более 2 часов по наиболее удаленному тракту. На рисунке 3 приведено процентное соотношение компонентов монооксида азота и диоксида азота по результатам измерений. В данном случае за единицу принималась сумма монооксида и диоксида азота без учета переводных коэффициентов.

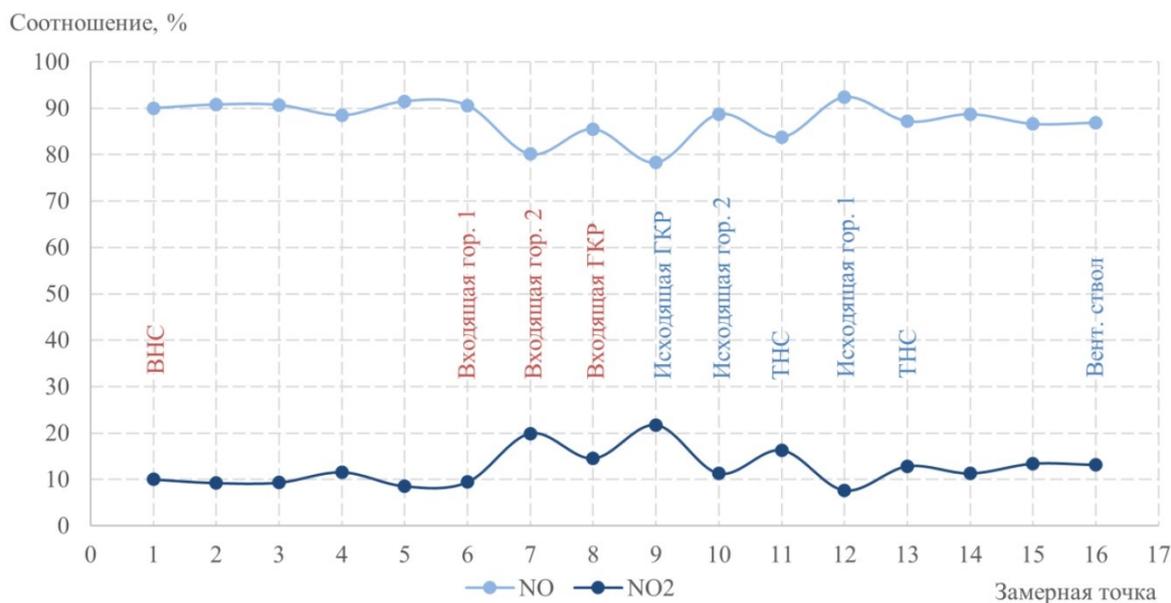


Рис. 3. Результаты измерений распределения концентраций выхлопных газов

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что изменение соотношения монооксида азота и диоксида азота от выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети находятся в пределах 14%. При этом наибольшие изменения происходят непосредственно на рабочих горизонтах рудника, где присутствует разветвленная сеть выработок, приводящая к изменению газового состава от различных источников, а также меньшие объемы воздуха. На протяженных участках выработок в виде наклонных съездов данное соотношение составляет порядка 8%. В связи с этим можно сделать предположение о том, что в условиях исследуемого рудника окисление монооксида азота в диоксид не превышает 14%. Таким образом, преобразование монооксида азота в диоксид в рудничных условиях занимает достаточно продолжительный период времени, который превышает время нахождения газовой смеси в шахтной сети [4, 5].

В Санитарных правилах и нормах [6] отсутствуют требования к ПДК воздуха рабочих зон по компоненту NO, однако присутствует ПДК диоксида азота NO_2 ($2 \text{ мг/м}^3 = 1,0 \text{ ppm}$) и суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 ($5 \text{ мг/м}^3 = 2,6 \text{ ppm}$). В связи с этим

возникает вопрос о подходе к определению суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 при проведении измерений отдельных компонентов.

В настоящее время зависимость определения суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 приведена в Методическом пособии по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [7]:

$$M_{\text{NO}_x}(\text{в пересчете на } \text{NO}_2) = M_{\text{NO}_2} + 1,53 \cdot M_{\text{NO}},$$

где M_{NO_2} – мощность выброса компонента диоксида азота; M_{NO} – мощность выброса компонента монооксида азота; $M_{\text{NO}_x}(\text{в пересчете на } \text{NO}_2)$ – мощность выброса суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 .

В данной зависимости учитывается полный пересчет NO в NO_2 . С учетом выполненных исследований выполнен расчет суммы оксидов азота с учетом частичной трансформации NO в NO_2 пределах 14%. Сравнение рассчитанных концентраций суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 с учетом полного и частичного перехода представлены на рисунке 4.

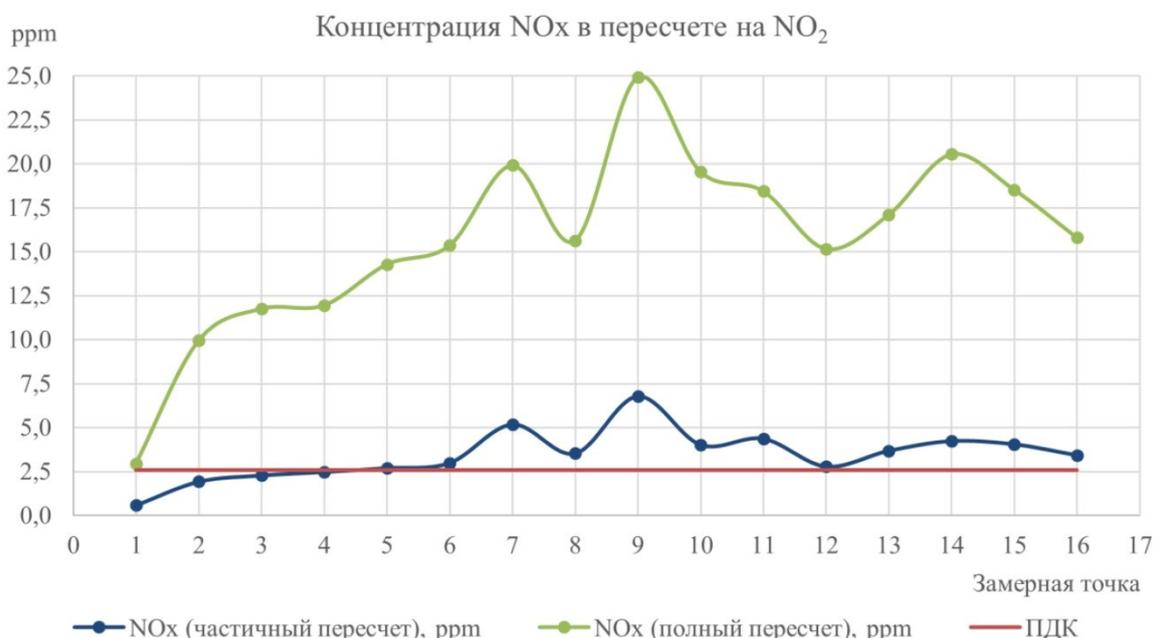


Рис. 4. Результаты расчета суммы оксидов азота в пересчете на NO_2

При расчете суммы оксидов азота в пересчете на NO_2 при полном превращения NO в NO_2 значения оказываются выше в среднем в 4,7 раза по сравнению с результатами частичного перехода. В результате рассчитанные значения при полном учете NO оказываются выше ПДК на всех замерных точках, включая свежую струю воздуха.

В связи с этим необходимо определить условия преобразования монооксида азота в диоксид в шахтных условиях и разработать подход к пересчету суммы окислов азота в на NO_2 , как отмечают авторы статей [8-10].

Выводы

Проведенные исследования распространения компонентов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети позволяют сделать следующие выводы.

1. При работе техники с ДВС экологических классов Tier 2/ Tier 3, либо аналогичных Stage 2/ Stage 3, в шахтную вентиляционную сеть поступают преимущественно оксиды азота. Монооксид азота в выхлопных газах составляет более 85%.
2. Монооксид азота в рудничных условиях исследуемого объекта окисляется до диоксида азота в пределах 14% за время нахождения в вентиляционной сети. Дальнейший процесс окисления происходит в атмосфере.
3. Полный пересчет монооксида азота до диоксида для условий рудника в соответствии с требованиями правил безопасности [1] приведет к завышенным значениям измеряемых концентраций. Кроме того, отсутствие ПДК для монооксида азота в санитарных правилах и нормах приводит к отсутствию возможности отдельного контроля данных параметров для воздуха рабочих зон.
4. Необходимо разработать способы определения суммы оксидов азота в пересчете на NO₂, позволяющие учитывать скорость окисления монооксида азота до диоксида в зависимости от конкретных условий объекта.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.
(рег. номер 122012000396-6).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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).
2. Code of Federal Regulations, 40. Part 1039. 2012. – CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES. – Текст электронный. – URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?mc=true&node=pt40.36.1039&rgn=div5>. (Дата обращения 23.05.2023).
3. Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Общая и неорганическая химия. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1992. – 588 с.: ил.
4. 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.
5. Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 41-47. – DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47.
6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. гл. сан. врачом РФ 28.01.2021; зарегистрированы в Минюсте РФ 29.01.2021, № 62296. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. (с изменениями на 30 декабря 2022 года).
7. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. (доп. и перераб.) / ОАО «НИИ Атмосфера». – СПб., 2012. – 224 с.
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. Гришин Е.Л. Газовый режим в современной концепции рудничной вентиляции // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 101-104. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.20.
10. Серегин А. С., Фазылов И.Р., Прохорова Е.А. Обоснование безопасных условий работы горнотранспортных машин с двигателями внутреннего сгорания по фактору выделения загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11. – С. 37-51. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_37.