

2. Аэросеть – Решение проблем рудничной вентиляции. [официальный сайт]. – Текст электронный. – URL: <http://aeroset.net>. – (дата обращения: 10.10.2021)
3. Проведение воздушно-депресссионной съемки и оценка фактического воздухораспределения в пределах действующей вентиляционной сети рудника «Объединенный» ООО «Дарасунский рудник»: Отчет о НИР по договору №141/2020 от 20 октября 2020 года.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2021.4.22

## НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ РАБОТЕ ТЕХНИКИ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Е.В. Накаряков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе представлены результаты натуральных исследований рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания. Разработана методика проведения натуральных измерений концентраций вредных компонентов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания двумя методами: отбор проб из выхлопной трубы и экспресс-метод с использованием портативных газоанализаторов. Показано, что количество диоксида азота при экспресс-методе измерения концентраций выше, чем при измерении способом отбора проб, что предположительно связано с доокислением оксида азота до диоксида азота по пути движения облака выхлопных газов от трубы до места замера. Показано непропорциональное поведение графиков изменения концентраций оксида азота и диоксида азота на расстоянии от выхлопа машин.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, ядовитые газы, отбор проб, расход воздуха, расчет количества воздуха.

### Введение

Ранее действовавшие нормативные документы в области промышленной безопасности опасных производственных объектов устанавливали норму подачи свежего воздуха в рабочие зоны машин с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). В настоящее время указанные нормы не действуют, правилами безопасности предписывается обеспечение в рабочих зонах машин с ДВС требуемого состава воздуха в части предельно допустимых концентраций отдельных продуктов отработанных выхлопных газов. Однако в силу искусственного характера вентиляции подземных рудников и невозможности его оперативного управления необходимо заранее рассчитывать требуемое количество воздуха для проветривания рабочих зон. Утвержденные методики расчета воздуха для рабочих зон машин с ДВС, как и нормы подачи воздуха в нормативной документации отсутствуют.

Согласно пунктам 375, 380, 381 Федеральных Норм и Правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1] контроль за компонентным составом выхлопных газов техники с ДВС и компонентным составом рудничной атмосферы рабочих зон при работе техники с ДВС осуществляется по содержанию оксида углерода и оксида азота. Таким образом, при эксплуатации на подземных горных работах техники с ДВС основными контролируемыми вредными компонентами выхлопных газов, согласно ФНиП [1], являются оксид углерода и оксиды азота, которые приняты в качестве основных исследуемых газов в настоящей работе.

Исследованиями состава рудничной атмосферы при работе техники с ДВС занимались многие исследователи, в том числе имеются диссертационные работы [2, 3]. Проведены собственные исследования, касающиеся работы техники с ДВС в тупиковых

выработках [4, 5]. Однако исследования количественной оценки минимально допустимой нормы подачи воздуха по фактору разжижения основываются на паспортных характеристиках двигателей [6, 7].

В связи с этим необходимы натурные исследования качественного состава рудничной атмосферы тупиковых рабочих зон при работе в них техники с ДВС с целью определения минимально допустимой нормы подачи воздуха в рабочие зоны по фактору разжижения ядовитых газов.

### **Методика проведения измерений в сквозных выработках**

Измерения производятся на прогретый двигатель в выработке длиной не менее 50 м, что обусловлено длиной машины и минимального расстояния от выхлопной трубы до места проведения замера. Измерения производятся двумя способами: отбором пробы выхлопных газов и экспресс-методом измерения концентраций газов при помощи газоанализаторов.

В процессе измерений горные машины поочередно заезжают в выработку со сквозным проветриванием. Осуществляются измерения концентраций газов из выхлопной трубы отбором проб и экспресс-методом на расстоянии 30 м от выхлопа машины по направлению движения воздуха в выработке.

Минимальное расстояние для проведения измерений обусловлено «Методикой измерений расхода воздуха...» [8]: при наличии складированных материалов расстояние до места замера расхода воздуха должно быть не менее 5-ти кратной ширины выработки, т.е. в случае измерения концентраций газов экспресс-методом машина будет являться препятствием и необходимо выдержать 5-ти кратный запас по ширине выработки, т.е. при максимальной ширине выработок 6 м необходимое расстояние до точки замера не менее 30 м. А также согласно «Методике...» [8]: при наличии вагонов в сечении выработки замер производят на расстоянии, равном не менее 3-х кратной длины вагона, что можно интерпретировать как 3-х кратный запас по длине ПДМ, т.е. при длине ПДМ 10 м необходимое расстояние до точки замера не менее 30 м. Полное смешивание потоков свежего и загазованного воздуха происходит за счет развитого турбулентного режима движения воздуха и в сечении выработки, удаленном от забоя на 5 значений ширины выработки, скорость и состав воздуха будут приблизительно равномерными по сечению.

Измерения производятся путем отбора проб выхлопных газов в полипропиленовые одноразовые шприцы объемом 160 мл. Производится отбор трех шприцев с одной машины. Отобранные пробы поднимаются на поверхность, где естественным путем охлаждаются до температуры атмосферы и принимают давление окружающей среды. На поверхности каждая из проб разбавляется свежим воздухом. Разбавление пробы воздуха производится так как предел измеряемой концентрации вредного вещества для применяемых индикаторных трубок значительно меньше фактического значения концентрации данного компонента в выхлопных газах ДВС. Разбавление пробы воздуха производится в соотношении 1:9 (100 мл – проба, 900 мл – свежий воздух). Разбавление проб осуществляется в герметичных металлических шприцах объемом 1,1 л. Разбавленная проба из металлического шприца прогоняется через индикаторную трубку, рассчитанную на объем 1 л.

После снятия полученного значения со шкалы индикаторной трубки производится обратный пересчет на фактическую концентрацию исходя из соотношения разбавления для всех трех замеренных концентраций.

Замеры концентраций кислорода и ядовитых компонентов выхлопных газов (окись углерода, углекислый газ, монооксид азота, диоксид азота) экспресс-методом производятся с помощью портативного газоанализатора Drager X-am 5600 в воздухе выше и

ниже по тракту движения воздушной струи (рис. 1) после смешения с выхлопными газами (на расстоянии не менее 30 м от машины).

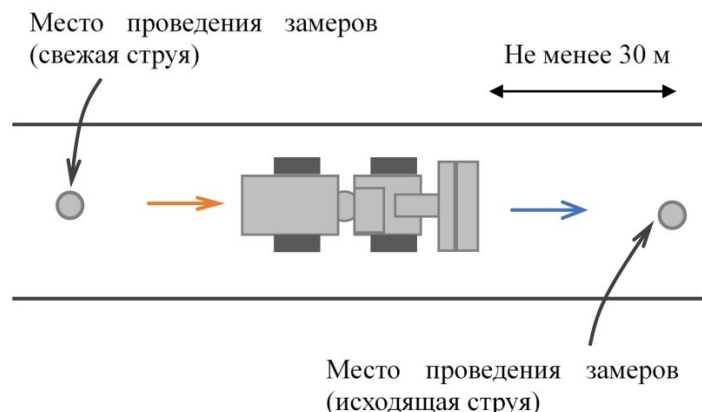


Рис. 1. Схема выполнения замеров в сквозной выработке

Полученные результаты экспериментальных исследований обработаны в соответствии с теорией статистической обработки данных, описанной ниже. Обработка осуществляется по формулам (1)-(7) [9].

Итоговая концентрация компонентов выхлопных газов определяется средним значением трех проб. Среднее значение измеряемой величины  $x$  (концентрация газа) определяется по формуле:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (1)$$

где  $n$  – количество проведенных измерений,  $k$  – порядковый номер измерения,  $x_k$  – результат  $k$ -го измерения.

Среднее квадратичное отклонение определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \langle x \rangle)^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (2)$$

Величина случайной ошибки измерений определяется по формуле:

$$\Delta x_{\text{случ}} = t_p(n, p) \cdot \sigma, \quad (3)$$

где  $t_p(n, p)$  – коэффициент Стьюдента,  $p = 0.95$ .

Суммарная погрешность вследствие случайных ошибок и абсолютной приборной погрешности  $\Delta x_{\text{приб}}$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{случ}}^2 + \Delta x_{\text{приб}}^2}, \quad (4)$$

Абсолютная погрешность прибора может быть вычислена через его допускаемую относительную погрешность  $\delta$  по формуле:

$$\Delta x_{\text{приб}} = \langle x \rangle \cdot \delta. \quad (5)$$

Результат измерений величины  $x$  записывается в виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x. \quad (6)$$

Для учета максимальной возможной ошибки измерений величины  $x$  записывается в виде:

$$x = \langle x \rangle + \Delta x. \quad (7)$$

### Результаты натуральных исследований параметров выхлопных газов техники с ДВС

Натурные измерения проведены с использованием трех газоанализаторов для экспресс-метода оценки концентраций. При обработке отобранных проб выхлопных газов использовались не менее трех индикаторных трубок. Результаты замеров представлены в табл. 1. Так как концентрации непосредственно из выхлопной трубы получены при расходе выхлопных газов, а концентрации экспресс-методом на исходящей струе получены при расходе в сквозной выработке, результаты замеров сопоставлены по количеству выделяемых газов в соответствующих точках измерений.

Таблица 1

Результаты натуральных исследований параметров выхлопных газов техники с ДВС

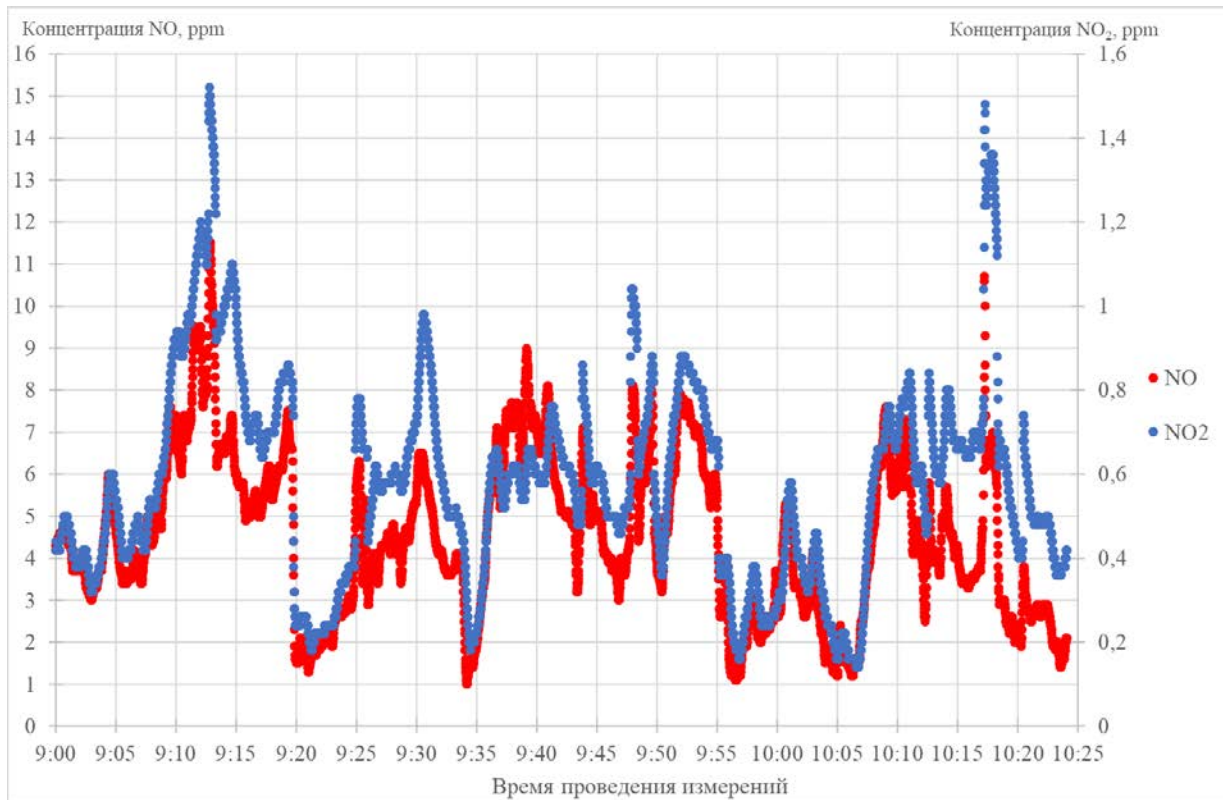
№	Тип техники	Количество CO, м <sup>3</sup> /с		Количество NO <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /с		Норма расхода воздуха*, м <sup>3</sup> /мин на л.с.
		отбором проб	экспресс-методом	отбором проб	экспресс-методом	
1	Caterpillar R1300G	0,000058	0,000060	0,000008	0,000010	3,3
2	Caterpillar R1600G	0,000117	0,000120	0,000016	0,000017	3,7
3	Elphinestone R1600	0,000054	0,000060	0,000006	0,000007	1,6
4	Elphinestone R1600	0,000117	0,000120	0,000013	0,000014	3,3
5	Caterpillar R1700G	0,000058	0,000060	0,000007	0,000007	1,7
6	Elphinestone R1700	0,000097	0,000100	0,000008	0,000010	1,8
7	Elphinestone R1700	0,000039	0,000040	0,000005	0,000008	1,4
8	Sandvik LH514	0,000101	0,000100	0,000013	0,000016	3,0
9	Sandvik LH514	0,000101	0,000100	0,000010	0,000012	3,0

\* Норма расхода воздуха рассчитана на основании наибольшего количества воздуха по разжижению каждого из газов.

Как видно из таблицы, оба способа измерений дают сопоставимые результаты по количеству CO. Количество NO<sub>2</sub> при экспресс-методе выше, что может быть связано с

доокислением NO до NO<sub>2</sub> по пути движения облака выхлопных газов от трубы до места замера.

При проведении измерений экспресс-методом по описанной выше методике газоанализатор осуществлял посекундную запись показаний концентраций NO и NO<sub>2</sub>. На рис. 2 представлены графики временного изменения концентраций NO и NO<sub>2</sub> при проведении замеров экспресс-методом.



**Рис. 2.** Графики измеренных концентраций NO (красным цветом) и NO<sub>2</sub> (синим цветом). На графике концентрации представлены в ppm (1% по объему = 10 000 ppm)

Во время испытаний измерения концентраций вредных компонентов выхлопных газов производились для девяти единиц техники, поочередно заезжающих в сквозную выработку. Циклы въезда и выезда техники из выработки представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

Циклы въезда техники в сквозную выработку и выезда из нее

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время въезда/выезда	9:03-9:06	9:09-9:12	9:14-9:17	9:23-9:26	9:31-9:34	9:39-9:41	9:51-9:54	10:01-10:03	10:10-10:15

Из рис. 2 видно, что характер поведения кривых нельзя назвать пропорциональным. Более того, доля NO переходящая в NO<sub>2</sub> не равна 1,53, как представлено в ФНиП. Среднее соотношение концентрации NO к концентрации NO<sub>2</sub> по результатам анализа полученных 5085 значений составила 0,132 (максимальное – 0,300; минимальное – 0,067). Т.е. можно предположить, что доля NO переходящая в NO<sub>2</sub> при данных темпе-

ратуре, давлении и скорости воздуха на расстоянии 30 м от выхлопной трубы техники составляет в среднем 13,2%, что более чем на порядок ниже регламентируемых ФНиП. В связи с этим необходимы детальные исследования доли NO, доокисляемой до NO<sub>2</sub> в шахтных условиях с учетом микроклиматических и аэродинамических параметров рудничного воздуха.

### Выводы

Разработана методика проведения натуральных измерений концентраций вредных компонентов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания двумя методами: отбор проб из выхлопной трубы и экспресс-метод с использованием портативных газоанализаторов. Результаты измерений обоими способами сопоставимы.

Показано, что количество NO<sub>2</sub> при экспресс-методе измерения концентраций выше, что предположительно связано с доокислением NO до NO<sub>2</sub> по пути движения облака выхлопных газов от трубы до места замера. Показано непропорциональное поведение графиков изменения концентраций NO и NO<sub>2</sub> на расстоянии от выхлопа машин. Данный факт свидетельствует о необходимости проведения детальных исследований величины концентрации NO доокисляемой до NO<sub>2</sub>.

Результаты работы могут быть использованы при разработке методик организации и расчета количества воздуха тупиковых рабочих зон по фактору разжижения вредных компонентов выхлопных газов для проектируемых участков.

### 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. Пьянников В.П. Повышение эффективности проветривания тупиковых горных выработок при работе погрузочно-доставочных (транспортных) машин с двигателями внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Пьянников Валерий Павлович. – Екатеринбург, 2005. – 198 с.
3. Росляков А.С. Оптимизация проветривания тупиковой выработки при работе в ней машин с двигателями внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Росляков Александр Станиславович. – Екатеринбург, 2012. – 172 с.: ил.
4. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 120-123. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.23.
5. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Исследование условий проветривания протяженных тупиковых очистных камер при работе в них погрузочно-доставочных машин с двигателем внутреннего сгорания // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 105-111.
6. Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляции 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.
7. Кузьминых Е.Г., Кормщиков 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.
8. Методика измерений расхода воздуха в подземных горных выработках при проведении воздушно-депресссионных съемок / ООО «НИПИ Горного дела». – Пермь, 2020 – 22 с.
9. Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных: Метод. указания к лаб. работам. – М.: Изд-во МФТИ, 2011 – 45 с.