

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2022.2.17

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУПИКОВОЙ ПРОХОДЧЕСКОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ РАБОТЕ В НЕЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Е.В. Колесов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты CFD-моделирования проветривания тупиковой проходческой выработки при работе в ней погрузочно-доставочной машины с двигателем внутреннего сгорания. Выявлены зоны с повышенными концентрациями ядовитых компонентов выхлопных газов. Для получения исходных данных модели и ее валидации проведены натурные замеры в шахтных условиях.

Ключевые слова: CFD-моделирование, проветривание тупиковой выработки, выхлопные газы, двигатель внутреннего сгорания.

Введение

Количество свежего воздуха, подаваемого в подземные горные выработки, где работает техника с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), должно обеспечить содержание кислорода в воздухе не менее 20% по объему, а также разбавление вредных примесей отработавших выхлопных газов в исходящей струе ниже предельно допустимых концентраций.

Наибольшую опасность с точки зрения возможности образования зон скопления ядовитых газов (СО и NO_x) с концентрацией выше предельно допустимой (ПДК), представляют тупиковые горные выработки. Проветривание тупиковых выработок, в которых применяются машины с ДВС (погрузочно-доставочная, кровлеоборочная техника и др.), согласно действующим правилам безопасности [1], должно осуществляться непрерывно вентиляторами местного проветривания с вентиляционными трубопроводами. Ранее действовавшие нормативные документы в области промышленной безопасности опасных производственных объектов устанавливали норму подачи свежего воздуха в рабочие зоны машин с ДВС. В настоящее время эти нормы не действуют, при этом в силу искусственного характера вентиляции подземных рудников и невозможности оперативно ей управлять необходимо заранее рассчитывать требуемое количество воздуха для проветривания рабочих зон. Утвержденные методики расчета количества воздуха для рабочих зон машин с ДВС, как и нормы подачи воздуха, в российской нормативной документации отсутствуют.

Как правило, на рудниках, где применяется техника с ДВС, используются формулы расчета количества воздуха для рабочих зон машин с ДВС по компонентам неразбавленных выхлопных газов для эксплуатируемых машин, а в случае отсутствия результатов отборов проб выхлопных газов (например, при закупке новой техники) – по международным нормам токсичности ДВС [2, 3].

Требуемый расход воздуха по компонентам выхлопных газов рассчитывается по следующей формуле:

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

где $C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксида углерода, оксидов азота в пересчете на NO₂), % по объему; $C_{\text{ДОП}}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему для СО 0,0017%, для NO_x 0,00026%; $g_{\text{ВЫХ}}$ – количество выхлопных газов после очистки, м³/с.

Замеры концентрации отработавших газов производятся на выходе из выхлопного отверстия.

Количество выхлопных газов $g_{\text{вых}}$ определяется по данным технического паспорта машин по формуле для четырехтактного двигателя:

$$g_{\text{вых}} = \frac{V \cdot n}{2}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – суммарный рабочий объем цилиндров, м^3 ; n – скорость вращения коленчатого вала, об/с (замеренная при отборе проб, или возможные максимальные обороты из технической характеристики двигателя).

В работе [4] предложена альтернативная методика измерений компонентов выхлопных газов в сквозной горной выработке с помощью портативных газоанализаторов.

Расчет $Q_{\text{ДВС}}$ производится в отдельности для каждого нормируемого компонента выхлопных газов (CO и NO_x) при возможных максимальных оборотах двигателя и для кислорода [5, 6]. В качестве требуемого количества воздуха принимается наибольшее из полученных значений.

Однако данный расчет не учитывает сложную аэрогазодинамику в пределах тупиковой выработки, обусловленную движением техники с ДВС, а также формированием турбулентных вихрей в призабойной части. Для оценки опасности образования зон накапливания отработавших выхлопных газов с концентрациями ядовитых веществ, превышающих ПДК, в настоящей работе разработана трехмерная численная модель аэрогазодинамических процессов в тупиковой проходческой горной выработке, а для получения исходных данных для моделирования, а также для валидации модели, проведены натурные эксперименты по методике, представленной в работе [4].

Разработка CFD-модели

Существенный прогресс в области вычислительных технологий в последние десятилетия привел к тому, что для задач рудничной вентиляции все большее применение получают методы вычислительной гидрогазодинамики, или CFD-методы (computational fluid dynamics). CFD-моделирование чаще всего применяют, когда всесторонний анализ гидрогазодинамических явлений с использованием натуральных экспериментов невозможен вследствие дороговизны оборудования, большого количества времени и сложности в организации экспериментов в шахтных условиях [7-10].

CFD-моделирование основано на применении численных методов и алгоритмов для решения и анализа задач, связанных с вычислением характеристик потоков газов и жидкостей, тепломассопереносом, многофазными средами, химическими реакциями и т.д. Существенным преимуществом CFD-моделирования является возможность прогнозировать, что произойдет с исследуемым потоком жидкостей или газов при изменении начальных и/или граничных условий, геометрии расчетной области, физических параметров жидкости и газа.

В [11] исследовалось качество вентиляции при различных расстояниях между забоем тупиковой выработки и концом вентиляционного трубопровода, а также при различных скоростях воздуха на выходе из трубопровода, при этом валидация модели достигалась сравнением с экспериментальными данными, полученными в шахтных условиях. В [12] CFD-моделирование применялось для анализа аэрогазодинамических процессов в проветриваемой проходческой тупиковой выработке после проведения взрывных работ, а в работе [13] при помощи CFD моделировался процесс изменения состава рудничного воздуха в непроветриваемой наклонной тупиковой горной выработке. В [14] CFD-моделирование применялось для анализа закономерностей накопления и вы-

носа выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в очистных тупиковых камерах.

Первым этапом применения CFD-моделирования является разработка геометрической модели исследуемой области. Параметры модели получены в ходе проведения натурных исследований в шахтных условиях и представлены на рис. 1. Сечение тупиковой выработки – арочное, площадь сечения – 17 м^2 , длина выработки – 70 м ; воздуховод находится вблизи стенки у кровли выработки, диаметр воздуховода – 1 м , расстояние между забоем выработки и концом воздуховода – 10 м .

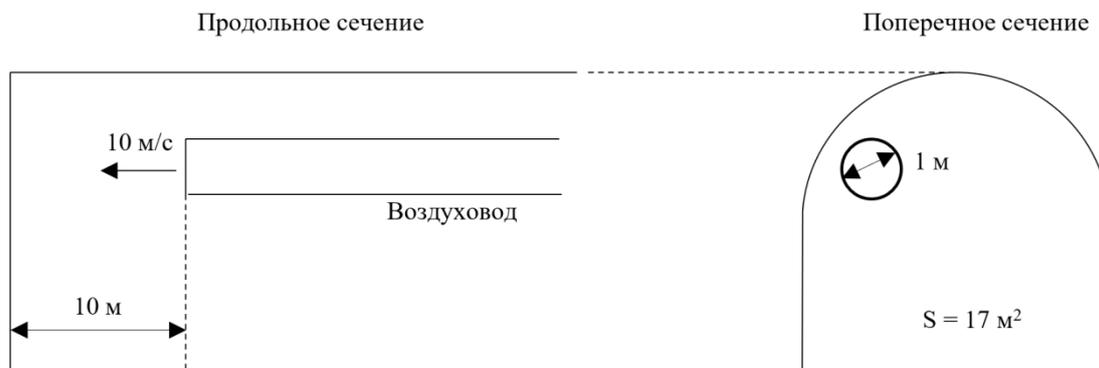


Рис. 1. Схема призабойной части проветриваемой тупиковой выработки

Далее в модуле SpaceClaim CFD-комплекса ANSYS Fluent построена упрощенная трехмерная модель тупиковой выработки (рис. 2).

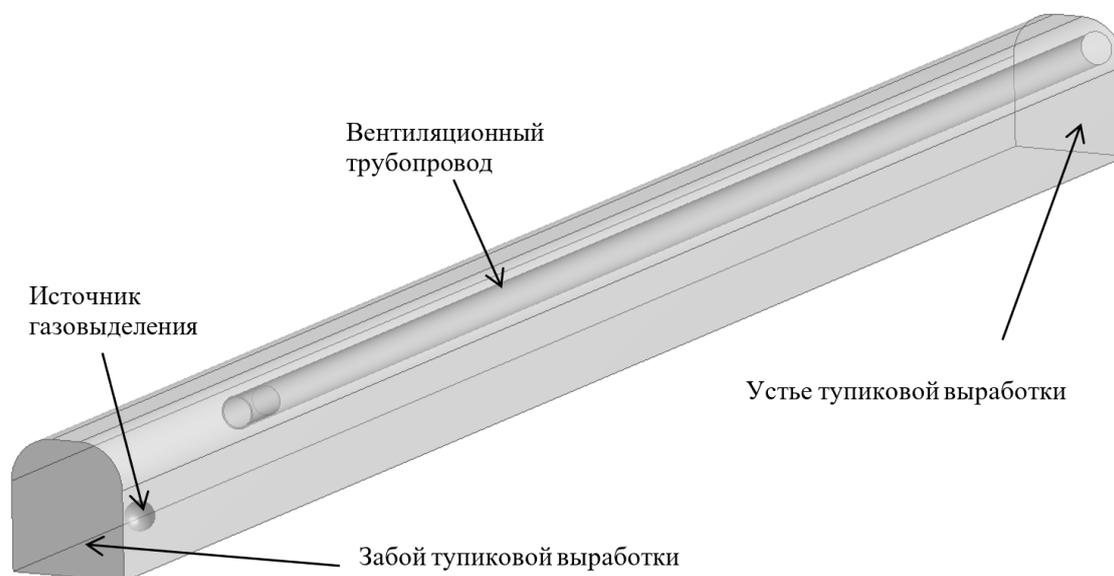


Рис. 2. Трехмерная модель тупиковой выработки

Вторым этапом CFD-моделирования является разбиение исследуемой расчетной области на конечные объемы. Неизвестными параметрами задачи в данном случае становятся значения скоростей воздуха в узлах конечных объемов и значения давлений воздуха и объемных долей газовых примесей (CO , NO , NO_2) в центрах конечных объемов.

На рис. 3 представлена нерегулярная тетраэдрическая конечно-объемная сетка с измельчениями в окрестности источника газовыделения и вентиляционного става с призматическим пограничным слоем на границах с твердыми стенками (поверхностью горной выработки, вентиляционным трубопроводом).

В процессе моделирования построено несколько конечно-объемных сеток с различным размером конечных объемов для анализа сеточной сходимости. Анализ производился на основе сравнения перепадов полного давления, получаемых в результате расчета воздухораспределения в тупиковой выработке для разных сеток, при фиксированной заданной скорости воздуха на входе в расчетную область.

В результате анализа выбрана конечно-объемная сетка со следующими свойствами: количество узлов – 395 063; количество объемов – 1 076 743.

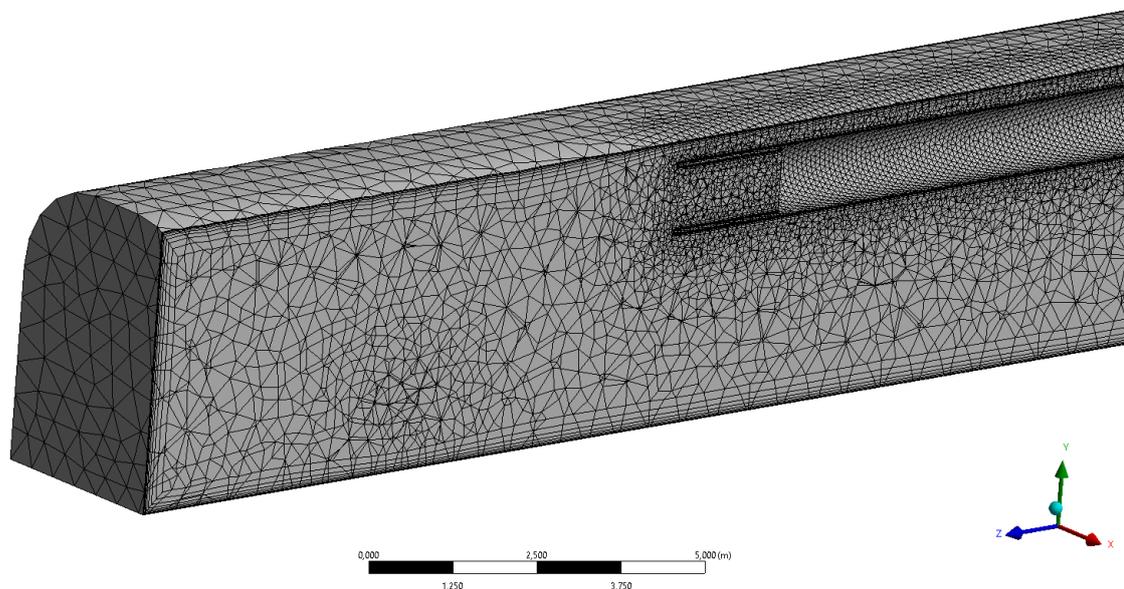


Рис. 3. Срединный продольный разрез расчетной области, разбитой на конечные элементы

Третьим этапом CFD-моделирования является задание начальных и граничных условий, а также физических параметров исследуемой области.

В настоящей работе моделирование динамики ядовитых газов (CO , NO , NO_2) в газоз-воздушном пространстве тупиковой горной выработки осуществлялось в рамках модели многофазной Эйлеровой среды: воздух является несущей фазой, а ядовитые газы — дисперсными фазами. Для определения поля скорости воздуха применялись осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, а также модель турбулентности $k-\varepsilon$ [7, 15–17]. В модели задавался постоянный источник газовой выделения, соответствующий наихудшему варианту работы оборудования с максимальным выделением выхлопных газов согласно проведенным натурным исследованиям параметров выхлопных газов ДВС на рудниках. Суммарный расход выхлопных газов, задаваемый в модели, составляет $g = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, при этом концентрация CO в выхлопных газах составляет 0,01% по объему, NO – 0,045%, NO_2 – 0,005%. Данные параметры были получены для ПДМ Caterpillar R1300G с двигателем мощностью 165 л.с. и объемом 10,5 л при максимальной нагрузке 2200 об/мин.

Для проветривания тупиковой горной выработки воздушный поток поступает в расчетную область через выход из вентиляционного става. На этой поверхности задается средняя скорость воздуха по сечению 10 м/с и нулевые концентрации газовых примесей. Воздушный поток, омывая источник газовой выделения (машина с ДВС) и тупиковый забой, покидает расчетную область через устье тупиковой выработки, где задается нулевое статическое давление (рис. 2). На стенках горных выработок задается нулевая скорость потока. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок.

Результаты моделирования

В результате моделирования получено, что в течение 4-5 минут после начала работы источника газовыделений значения концентраций ядовитых газов в устье тупиковой выработки выходят на асимптотические значения, при этом средняя концентрация ни одного из газов не достигает своего предельно допустимого значения (рис. 4), а в пространстве тупиковой выработки устанавливается квазистационарное газораспределение. На рис. 5 представлены распределения концентраций ядовитых газов в равноудаленных на 10 м поперечных сечениях тупиковой выработки. В призабойной части выработки и в области между трубопроводом, стенкой и кровлей выработки имеется превышение концентрации ядовитых газов относительно среднего значения в данном сечении. Последнее связано с малой скоростью газовой смеси в данных областях вследствие трения о твердые поверхности выработки и трубопровода.

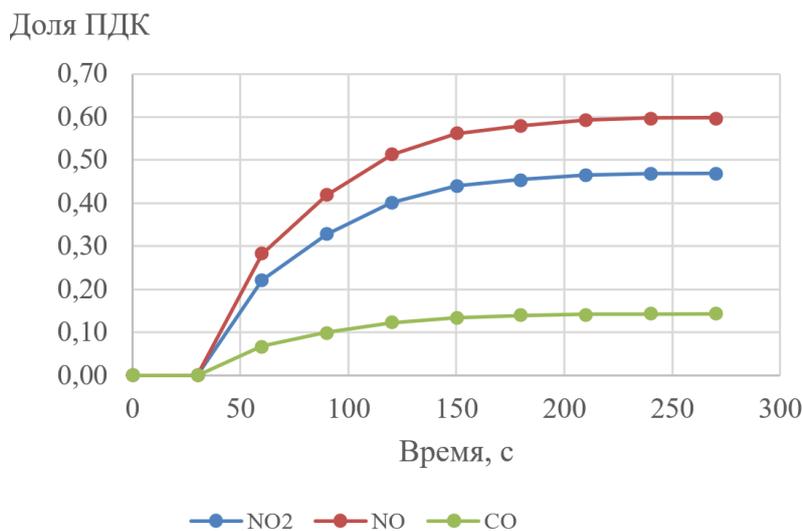


Рис. 4. Динамика средней концентрации ядовитых газов в устье тупиковой выработки

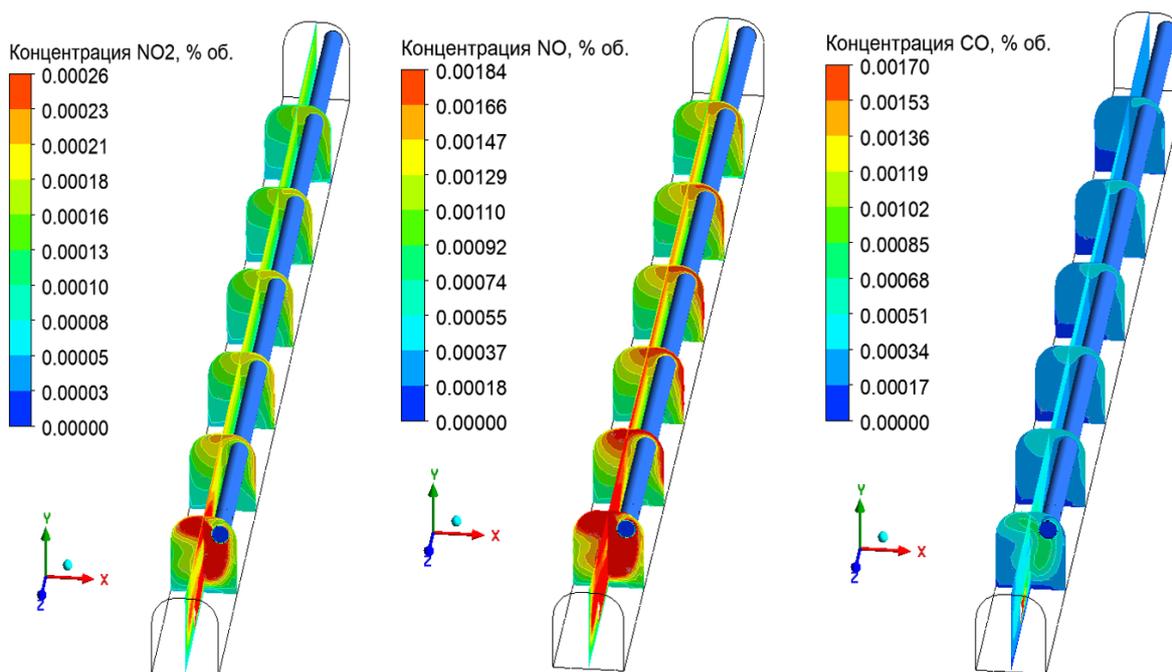


Рис. 5. Концентрация ядовитых газов в тупиковой выработке

Проведение натуральных экспериментов и валидация CFD-модели

В рамках валидации результатов математического моделирования аэрогазодинамических процессов в тупиковой проходческой выработке на р. Таймырский ПАО «ГМК «Норильский никель» проведены дополнительные замеры концентраций ядовитых газов в устье тупиковой выработки с работающей в ней погрузочно-доставочной машиной с ДВС по следующей программе.

Предварительно проведены отборы проб выхлопных газов ПДМ, работающей в тупиковой выработке по методике [4].

Исследованы 3 полных цикла работы ПДМ (цикл включает: въезд в тупиковую выработку, погрузка руды, выезд из выработки). Фиксировались время въезда и выезда ПДМ в тупиковую выработку; замерялись геометрические параметры тупиковой выработки: длина, сечение, угол наклона.

На исходящей струе (в устье тупиковой выработки) фиксировались скорость воздушной струи с помощью анемометра АПР-2 и концентрации CO, NO, NO₂ равномерно по сечению с помощью газоанализатора Draeger Ham 5600, совершающего ежесекундные замеры газов.

В сквозной выработке, в месте установки ВМП, фиксировались скорость воздуха и содержание в нем CO, NO, NO₂.

Замеры проводились в тупиковой горной выработке при работе в ней ПДМ Еріос ST-14. Длина выработки на момент проведения исследований составляла 50 м. Расход воздуха, подаваемого по вентиляционному ставу с помощью ВМП, в выработке составил 9,0 м³/с, что соответствует подаче 1,61 м³/мин на 1 л.с. для данной ПДМ. Расход в сквозной выработке, в которой располагался ВМП, составлял 77 м³/с; фоновые концентрации ядовитых газов в подаваемом воздухе составляли: C_{NO} = 1,0 ppm (0,0001% об.); C_{NO₂} = 0,0 ppm (0% об.); C_{CO} = 3 ppm (0,0003% об.).

За время замеров ПДМ выполнила 3 цикла (местное время г. Норильск):

Цикл 1: время въезда в тупиковую выработку 12:02; время выезда 12:05

Цикл 2: время въезда в тупиковую выработку 12:05; время выезда 12:07

Цикл 3: время въезда в тупиковую выработку 12:07; время выезда 12:11

Динамика концентрации ядовитых газов в устье тупиковой выработки представлена на рис. 6. Согласно полученным данным, отсутствует превышение ПДК ядовитых газов в устье тупиковой выработки.

На рис. 6 также отложены модельные кривые, полученные в результате CFD-моделирования с учетом исходных данных, полученных в ходе шахтного эксперимента. Результаты замеров достаточно хорошо согласуются с результатами проведенного CFD-моделирования аэрогазодинамических процессов в тупиковой горной выработке при работе в ней техники с ДВС, поэтому модель в дальнейшем можно использовать с целью разработки мероприятий для улучшения качества вентиляции тупиковых проходческих выработок.

Выводы

В статье представлены результаты разработки и валидации CFD-модели вентиляции тупиковой проходческой выработки при работе в ней техники с ДВС. На основе разработанной модели показано, что повышенные концентрации ядовитых примесей выхлопных газов могут образовываться в призабойной части выработки во время нахождения в ней работающей техники, а также в области между стенкой, кровлей и вентиляционным трубопроводом вследствие малой скорости газоздушного потока.

В дальнейшем полученная CFD-модель может быть использована для анализа «что если», т.е. для прогнозирования аэрогазодинамической обстановки в тупиковой горной выработке при изменении параметров источника газовой выделенности, подаваемо-

го количества свежего воздуха, расположения вентиляционного трубопровода и т.п. Полученные результаты будут полезны для горного производства с точки зрения улучшения качества проветривания тупиковых горных выработок при работе в них техники с ДВС.

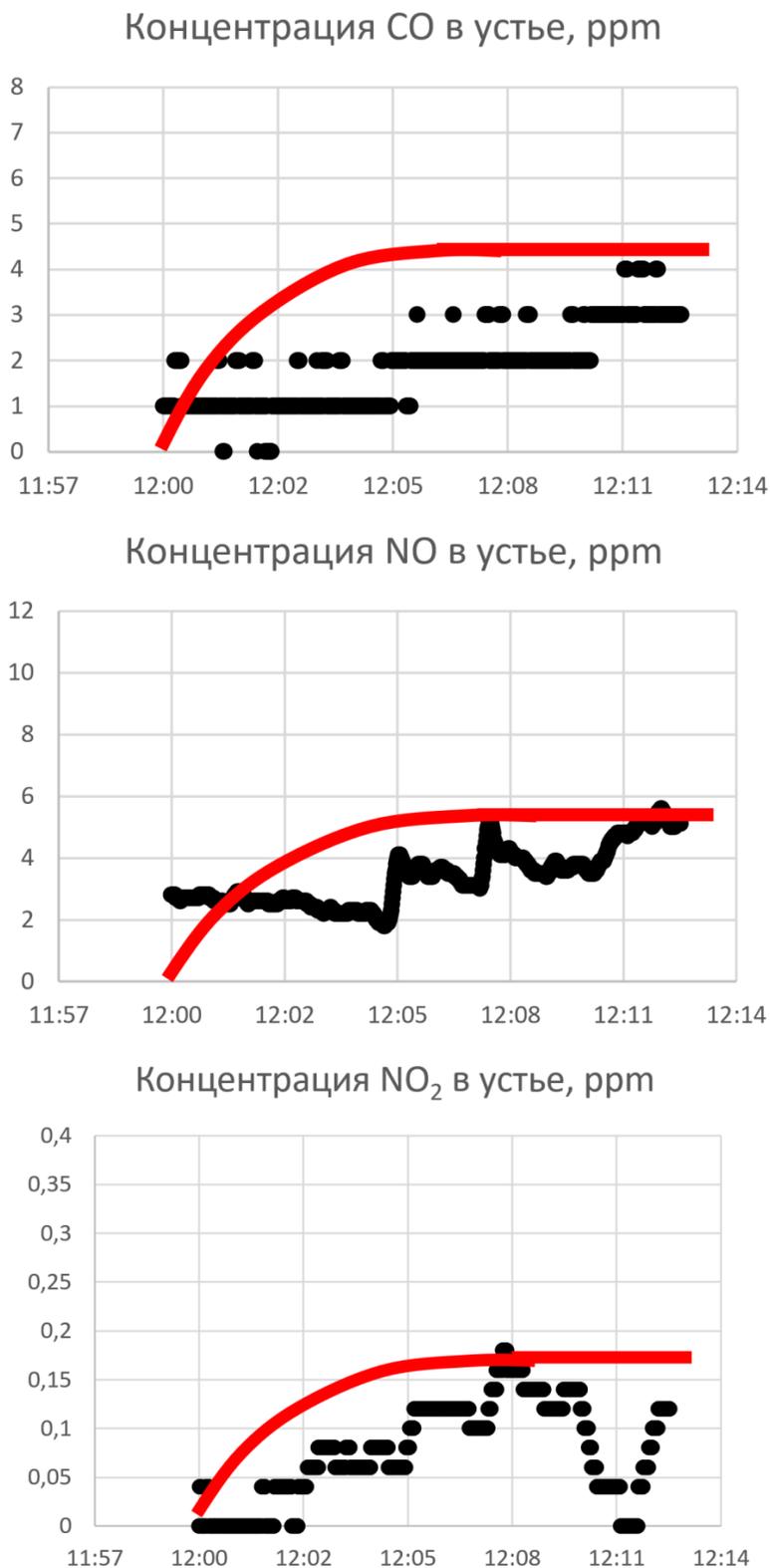


Рис. 6. Концентрация ядовитых газов в тупиковой выработке. Черным цветом обозначены данные замеров в устье тупиковой выработки, красным – результаты CFD моделирования

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 122030100425-6).

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 «НТИЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5-33. – DOI 10.25018/0236 1493 2021 6 0 5.
8. Kaledina N.O., Kobylkin S.S., Kobylkin A.S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines // Eurasian Mining. – 2016. – № 1. – P. 41-44. – DOI: 10.17580/em.2016.01.07.
9. Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: Problems and solutions // Eurasian Mining. – 2015. – № 2. – P. 26-30. – DOI: 10.17580/em.2015.02.07.
10. Каледина Н.О. Кобылкин С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газобильных угольных шахт // Горн. журн. – 2014. – № 12. – С. 99-104.
11. Park J., Jo Y., Park G. Flow characteristics of fresh air discharged from a ventilation duct for mine ventilation // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2018. – V. 32, – № 3. – P. 1187-1194. – DOI: 10.1007/s12206-018-0222-9.
12. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
13. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Кузьминых Е.Г. Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 79-84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.
14. 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.
15. Kurnia J.C., Sasmito A.P., Wong W.Y., Mujumdar A.S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 481, № 1. – P. 317-334. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058.
16. Wang W., Zhang C., Yang W., Xu H., Li S., Li C., Ma H., Qi G. In situ measurements and CFD numerical simulations of thermal environment in blind headings of underground mines // Processes. – 2019. – V. 7, № 5. – номер статьи 313.
17. Kolesov E.V., Nakaryakov E.V. Selection of turbulence model in ventilation modeling for blind stopes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 773, № 1. – Номер статьи 012071. – DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012071.