

Моделирование в ANSYS CFD процесса проветривания карьеров

С.С. Кобылкин¹✉, А.С. Кобылкин², Сис Мье¹, Альфа Мамаду Барри³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

³ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация

✉ kobylikin.s@misis.ru

Резюме: Безопасность и эффективность ведения открытых горных работ зависят от принятых проектных решений, в том числе по проветриванию. Расчёт вентиляции карьеров должен быть произведен либо по общепринятым методикам, о которых кратко рассказывается в данной статье, либо с применением специальных программ. Наиболее просто и быстро относительно традиционного графического способа расчёты по проветриванию можно сделать в программном комплексе Ansys CFD. На основании проведенной серии численных экспериментов и их верификации в данной работе предложены рекомендации по построению трехмерной модели и по параметрам сетки для моделирования проветривания карьеров. Также даны рекомендации по выбору начальных и граничных условий. В качестве верификации полученных результатов предлагается использовать три базовых подхода. Первый подход заключается в проверке неизменяемости границ прямого и обратного воздушного потока при изменении скорости ветра. Второй подход базируется на наличии в результатах моделирования локальных зон рециркуляции на отдельных уступах подветренного борта. И третий подход реализуется при выполнении контрольного расчёта скорости движения воздуха в произвольной точке в карьере. Проектирование вентиляции карьера является необходимым условием для оценки уровня опасности ведения горных работ. Выполняя расчёты по проветриванию на стадии выбора технологических решений, можно выбрать оптимальные параметры системы разработки.

Ключевые слова: безопасность горных работ, карьер, проветривание, моделирование локальных зон рециркуляции, Ansys CFD

Для цитирования: Кобылкин С.С., Кобылкин А.С., Сис Мье, Альфа Мамаду Барри. Моделирование в ANSYS CFD процесса проветривания карьеров. *Горная промышленность*. 2024;(4):102–106. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-102-106>

Modeling of open pit ventilation in ANSYS CFD

S.S. Kobylikin¹✉, A.S. Kobylikin², Sis Mue¹, Alpha Mamadou Barry³

¹ National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Engineering Academy, Moscow, Russian Federation

✉ kobylikin.s@misis.ru

Abstract: The safety and efficiency of open-pit mining operations depend on the design decisions made, including those for ventilation. Calculation of open-pit ventilation should be carried out either using the generally accepted methods, which are briefly described in this article, or using dedicated software. The simplest and fastest calculations for ventilation as compared with the traditional graphical method can be done in the Ansys CFD software package. Based on a series of numerical experiments and their verification, this paper offers recommendations on designing a three-dimensional model and on the grid parameters for modeling open-pit ventilation. Recommendations on the choice of initial and boundary conditions are also given. Three basic approaches are proposed to verify the results obtained. The first approach is to check the invariability of the forward and reverse air flow boundaries when the wind speed changes. The second approach is based on the presence of local recirculation zones on individual benches of the leeward wall in the simulation results. And the third approach is implemented when performing a control calculation of the air velocity at an arbitrary point in the open-pit. Designing the open-pit ventilation is a prerequisite for assessing the hazard level of mining operations. Performing ventilation calculations at the stage when technological solutions are selected helps to select the optimal parameters of the mining system.

Keywords: Safety of mining operations, open pit mine, ventilation, modeling of local recirculation zones, Ansys CFD

For citation: Kobylikin S.S., Kobylikin A.S., Sis Mue, Alpha Mamadou Barry. Modeling of open pit ventilation in ANSYS CFD. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):102–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-102-106>

Введение

Проветривание – базовое мероприятие по обеспечению промышленной безопасности при ведении горных работ. Несмотря на открытый способ добычи полезных ископаемых расчёты по величине выбросов вредных веществ, по количеству необходимого чистого воздуха для разбавления и выноса газов с пылью, а также поступающего за счёт ветра количества воздуха, необходимы. В настоящее время расчёты по вентиляции на карьерах встречаются редко. Обусловлено это не отсутствием методик, а только предположением, что обеспечить проветривание карьера (в тех же объёмах по количеству воздуха, как при естественной вентиляции) техническими решениями невозможно. Однако элементарный расчёт позволяет оценить степень влияния вентиляции карьера на выбранную систему вскрытия и разработки. При ответственном планировании возможно существенно сократить простои на достижение ПДК по газам и пыли, а также повысить безопасность. Встречаются научные работы [1–3], в которых вопросы проветривания рассматриваются для частных случаев, или работы, посвященные разработке новых технологических решений по проветриванию [4–6]. В ФНиП указывается только необходимость соблюдения требований по неперевышению допустимых концентраций газов и пыли. Требования к наличию элементарного расчёта естественного проветривания в документе нет. Хотя, для того чтобы провести расчёты по вентиляции карьера, необходимо иметь минимальное количество информации: параметры климата (направление и скорость ветров, а также температуру) и план горных работ. Также стоит отметить, что расчёт проветривания необходим при выборе тактики ведения аварийно-спасательных работ в случае пожара [7].

Для примера простоты расчетов, а также для демонстрации современных решений по проветриванию был выбран карьер «Северная гряда», расположенный в районе Чуйской долины (рис. 1). Расчёты включают в себя определение схемы проветривания карьера (как правило, графическим способом), а также поиск зон с прямым и обратным течением воздушных потоков (рис. 3, а). Далее выполняются элементарные расчёты поступающего в карьер воздуха за счёт действия ветра. Основные параметры в расчетных формулах находятся из графических построений (см. рис. 1 и 3, а). Так, при прямоугольной схеме проветривания для рассматриваемого примера в карьер поступает воздух в количестве $Q = 0,124 \cdot x_{cp} \cdot v_b \cdot L = 1093 \text{ м}^3/\text{с}$ (расчёт выполнен по методике [8]), где x_{cp} – среднее значение абсцисс границы x для ряда характерных профилей карьера, совпадающих с направлением ветра, м; v_b – средняя скорость ветра, м/с; L – длина карьера в направлении, перпендикулярном направлению ветра, м. На плане горных работ выделены контрольные точки «Точка 1» и «Точка 2». В дальнейшей работе в них будет проводиться сравнение показателей направления и скорости движения воздуха при расчетах, выполненных графическим путем, и при расчетах с применением компьютерного моделирования.

Проведенный расчёт необходимого количества воздуха и поступающего за счёт естественного проветривания показал, что вентиляция справляется с разбавлением всех вредных примесей до ПДК по всем загрязняющим веществам, за исключением пыли.

Наличие только плана ведения горных работ и открытых данных из интернета по метеоусловиям позволяет

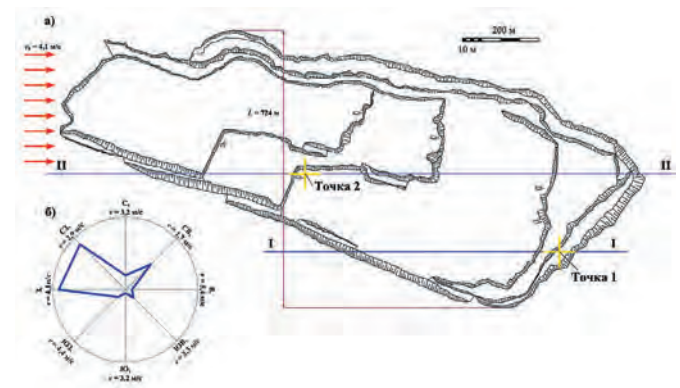


Рис. 1
План ведения горных работ (а), роза ветров (б) и секущие прямые I-I, II-II

Fig. 1
Mining plan (a), wind rose (b) and secant lines I-I, II-II

незначительные сроки сделать расчёт проветривания карьера. Использование программных средств, например [6; 9; 10], позволяет ускорить этот процесс. Еще одно средство проектирования вентиляции базируется на применении программного комплекса Ansys CFD (или его отечественного аналога FlowVision). Однако для его применения необходимо учитывать некоторые особенности, которые рассмотрены далее.

Результаты

Моделирование

По плану горных работ в модуле Design Modeling подготавливается трехмерная модель карьера (рис. 2, а) в масштабе 1:1. Трехмерная модель построена с областью атмосферы над карьером. При этом высота этой области определялась как семь глубин карьера, т.е. $H_{атмосфера} = 7 \cdot H_{карьер}$. Выполнение этого условия позволяет получить распределения воздушных потоков в соответствии с общепринятыми данными [8; 11; 12], без недопустимого искривления воздушного потока [2; 3].

Для корректного задания граничных условий по действию ветра после проведенной серии численных экспериментов было определено оптимальное решение выбора формы атмосферы над карьером в виде параллелепипеда. Он должен быть сориентирован таким образом, чтобы одна из его сторон была перпендикулярна направлению преобладающего ветра. По данной стороне задается условие равномерного движения воздуха со скоростью v_b .

Третьим важным моментом является построение расчётной сетки. Она должна быть сгущена у самой поверхности карьера с учетом скорости воздушного потока, задаваемого как начальное условие. Далее необходимо при генерации расчётной сетки поставить условие равномерного увеличения длины ребер Growth Rate не менее 1,1. Для данной модели количество элементов (тетраэдров) составило более 10 млн с минимальным размером ребра по поверхности карьера 0,5 м (рис. 2, б).

В результате проведенных расчетов были получены сведения по аэродинамическим процессам проветривания в карьере «Северная Гряда». Результаты моделирования позволяют определить зоны рециркуляции сразу по всему карьеру.

При моделировании наиболее сложной работой является построение трехмерной модели карьера. В будущем

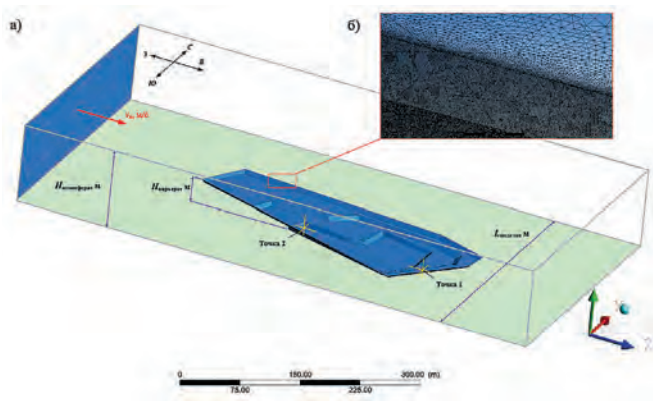


Рис. 2 Вид трехмерной модели карьера (а) и расчетной сетки (б)

Fig. 2 View of the three-dimensional open pit model (a) and the computational grid (b)

этот этап работы будет выполняться с помощью трехмерного сканирования, которое набирает большую популярность на горных предприятиях, что заметно упростит построение трехмерной модели карьера.

Верификация

Верификация проводилась путем визуального и численного сравнения результатов моделирования с традиционным методом, основанным на графическом способе (см. рис. 3, а). Профили с векторами скорости движения воздуха (см. рис. 3, б), полученные в результате моделирования, наглядно показывают локальные рециркуляционные зоны, которые также были определены графическим путем. Проведенное моделирование позволяет выявить зоны рециркуляции сразу по всему карьеру, что более наглядно и просто, чем при графическом способе (рис. 4).

Проведенный численный эксперимент с увеличением скорости ветра также позволил верифицировать способ проведения расчетов, основанный на трехмерном моделировании в ПО Ansys CFD. Известно [8; 11; 12], что скорость ветра не влияет на схему проветривания карьера, а границы обратных течений воздушных потоков не изменяются. Для проверки были проведены расчеты с разной скоростью движения ветра (0,1, 1, 2 и 3 м/с). Далее для каждого случая была построена изоповерхность с нулевой скоростью (выделено на рис. 4 голубым цветом). Как видно (см. рис. 4), во всех случаях расположение изоповерхности совпадает.

На третьем этапе верификации проводилось сравнение расчетных значений скорости воздушного потока в контрольных точках 1 и 2 с модельными значениями. Точки были выбраны для наглядности в двух зонах: на наветренном борту карьера (точка 1) и в зоне рециркуляции (точка 2). С учетом параметрического моделирования были получены графики зависимости скорости воздуха в контрольной точке от скорости ветра (рис. 5). Как видно, они имеют линейную зависимость и полностью совпада-

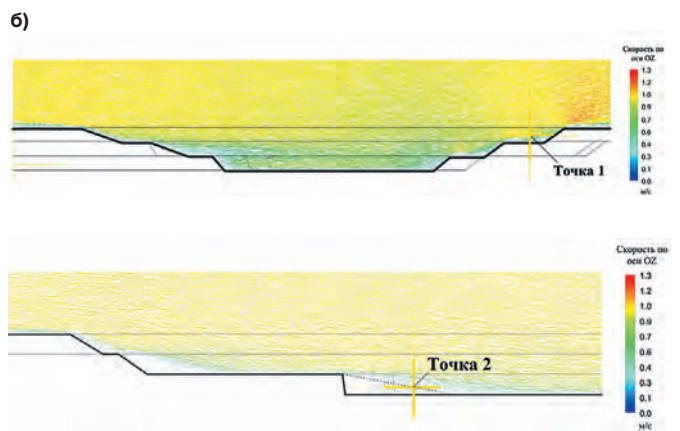
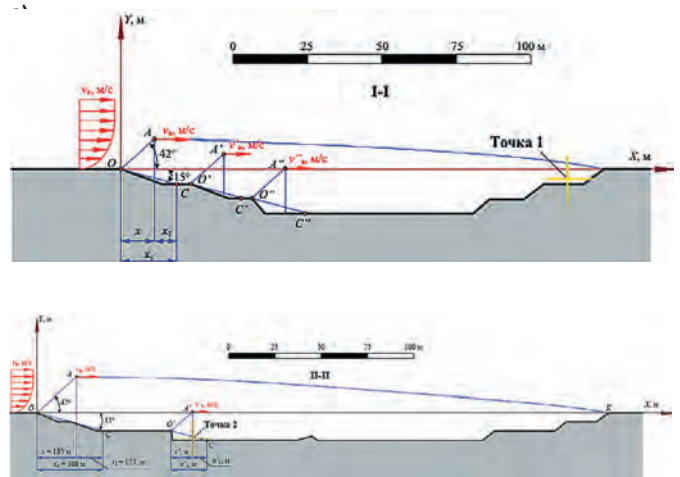


Рис. 3 Схема проветривания карьера по секущей прямой II-II (а) и график ветров скорости движения воздуха по подветренному борту карьера (б)

Fig. 3 A schematic diagram of open pit ventilation along secant line II-II (a) and a graph of wind velocity along the leeward wall of the open pit (b)

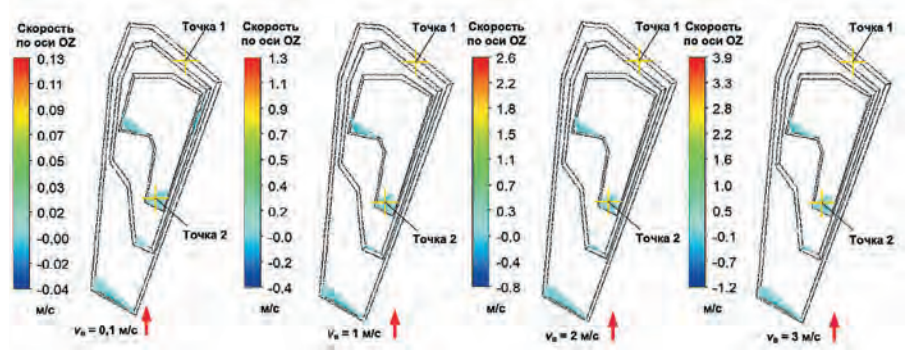


Рис. 4 Изоповерхность с нулевой скоростью движения воздуха при различной скорости ветра

Fig. 4 Isosurface with zero air velocity at different wind speeds

ют с расчетами по формулам из общепринятых методик [8; 11; 12].

Все три этапа верификации позволили подтвердить корректность результатов моделирования в ПО Ansys CFD.

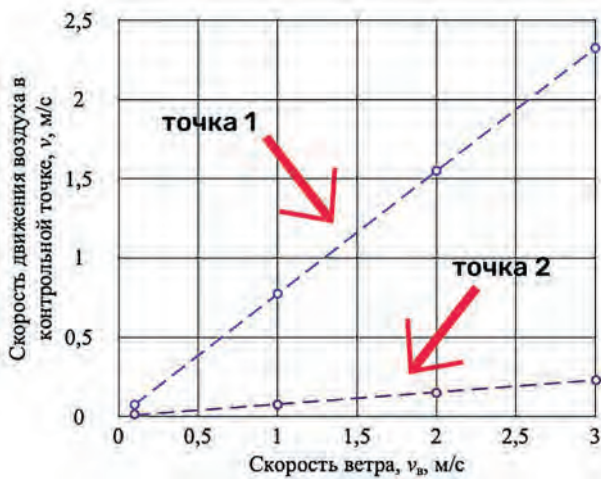


Рис. 5
График зависимости скорости воздуха в точке в карьере при различной скорости ветра на поверхности

Fig. 5
A line plot of air velocity dependence at a point in the open pit at different wind speeds on the ground surface

Данный подход по проверке моделирования в дальнейшем может быть использован как контрольный способ оценки правильности проведенных расчётов.

Трёхмерное моделирование имеет дальнейшее широкое применение в части контроля распределения вредных веществ (пыли и газа). Сегодня такие задачи решаются при обосновании локальных технических решений как в России [1; 4], так и за рубежом [13–15]. При разработке методик применения данных программ для проектирования вентиляции (с четкими требованиями к модели, расчётной сетке, начальным и граничным условиям) существенно повысится безопасность и эффективность открытых горных работ.

Заключение

Проектирование вентиляции карьеров на все этапы существования должно быть обязательным условием при разработке проектной документации. Все контролирующие организации (такие, как Ростехнадзор, ВГСЧ и др.) должны проверять наличие и полноту проведенных расчётов по проветриванию карьеров. Как показано в данной статье, расчет проветривания не является сложным и трудозатратным. При этом возможно использовать специальное программное обеспечение (например, Ansys CFD или FlowVision), которое существенно может упростить процесс проектирования.

Трёхмерное моделирование может быть использовано при расчёте параметров проветривания карьеров как один из способов проектирования вентиляции карьеров. Современные технологии по 3D сканированию карьеров позволяют упростить процесс моделирования – создание трёхмерной модели. Данная часть занимает больше всего времени (до 90%). Остальные этапы применения Ansys CFD позволяют сделать большую часть операций автоматически.

В качестве рекомендаций предлагается выбирать высоту над поверхностью карьера равной не менее чем семи глубинам карьера. Расчётная сетка должна быть сгущена у поверхности карьера и далее ее рост должен быть плавным (коэффициент Growth Rate не менее 1,1).

Моделирование позволяет упростить определение зон рециркуляции по всему карьере. Это достигается путем выполнения только одного расчета сразу для всего пространства карьера. То есть не требуется использовать графический способ для определения зон с прямым и обратным течением воздушных потоков.

Изменяя скорость и направление воздушного потока, можно определить наиболее неблагоприятные условия ведения горных работ. Отталкиваясь от полученных сведений, можно изменить параметры технологии для повышения аэрологической безопасности.

Список литературы / References

- Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров арктической зоны. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(2):218–227.
Gendler S.G., Borisovskiy I.A. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the Arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(2):218–227. (In Russ.)
- Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(4):59–75.
Gendler S.G., Borisovsky I.A. Estimation of peculiarities of temperature inversion formation in open mining in the Arctic conditions. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):59–75. (In Russ.)
- Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка эффективности естественного проветривания карьеров при отработке золоторудных месторождений на основе математического моделирования аэродинамических процессов. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):441–452.
Gendler S.G., Borisovsky I.A. Estimation of the efficiency of natural ventilation of pits during mining the gold deposit based on mathematical modeling of aerodynamic processes. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):441–452. (In Russ.)
- Амосов П.В., Бакланов А.А. Численное моделирование процессов естественного проветривания карьера при вариации его глубины в условиях инверсионного состояния атмосферы. *Горная промышленность*. 2023;(5S):65–71. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>
Amosov P.V., Baklanov A.A. Numerical modeling of natural ventilation processes in an open pit mine at its various depths in inversion atmospheric conditions. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):65–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>

5. Amosov P.V. Numerical modeling of open pit ventilation when varying the location of the dust and gas cloud. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2021;(7):5–15. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-7-5-15>
6. Андреев А.А., Маслобоев А.В. Программный модуль расчета времени естественного проветривания карьера (на примере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК»). В кн.: *Труды международного симпозиума «Надежность и качество», г. Пенза, 24 по 31 мая 2021 г.* Пенза; 2021. Т. 1. С. 273–276.
7. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С., Баловцев С.В., Харисов А.Р. Научно-обоснованные решения по разработке инструкции по составлению плана ликвидации аварий для угольных разрезов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6-1):84–98. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-84-98>
Kobylykin S.S., Kobylykin A.S., Balovtsev S.V., Kharisov A.R. Science-based solutions on the development of instructions for an emergency response plan for open-pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6-1):84–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-84-98>
8. Воронина Л.Д., Багриновский А.Д., Никитин В.С. *Расчёт рудничной вентиляции*. М.: Госгортехиздат; 1962. 487 с.
9. Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine. *ACS Omega*. 2021;6(1):448–455. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>
10. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2021;17(5):10313–10333. https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1031310333
11. Никитин В.С., Битколов Н.З. *Проектирование вентиляции в карьерах*. М.: Недра; 1980. 171 с.
12. Ушаков К.З., Михайлов В.А. *Аэрология карьеров*. М.: Недра; 1975. 248 с.
13. Flores F., Garreaud R., Munoz R.C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. *Computers & Fluids*. 2014;90:72–87. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.012>
14. Chen X.-H. On surface mining process dust pollution and measures. *Building Technology Dev*. 2016;43:158–159.
15. Vaibhav R. *Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures*. Thesis. Fairbanks, Alaska; 2015. 324 p. Available at: <https://www.academia.edu/112151269/> (accessed: 01.06.2024).

Информация об авторах

Кобылкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, кафедра безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2626-208X>; e-mail: kobylykin.s@misis.ru

Кобылкин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1512-890X>

Сис Муе – кандидат технических наук, докторант кафедры безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0009-7838-7149>

Барри Альфа Мамаду – аспирант кафедры недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0003-2260-1421>

Information about the authors

Sergey S. Kobylykin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2626-208X>; e-mail: kobylykin.s@misis.ru

Alexander S. Kobylykin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1512-890X>

Sis Mue – Cand. Sci. (Eng.), Doctoral student, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-7838-7149>

Alpha Mamadou Barry – Postgraduate Student, Department of Subsoil Use and Oil and Gas Engineering, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), Engineering Academy, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0003-2260-1421>

Article info

Received: 04.06.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 11.07.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.06.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 11.07.2024