

Влияние геометрических параметров и математического описания CFD-модели на пространственное распределение загрязняющих веществ внутри карьерного пространства, на примере программного комплекса ANSYS Fluent

О.В. Назарчук✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ o.nazarchuk@ksc.ru

Резюме: Актуальность исследований, представленных в статье, обусловлена возросшим интересом специалистов в области аэрологии карьеров к применению современных программных комплексов для расчета аэрологических параметров атмосферы глубоких карьеров. Специалистами поднимаются вопросы, до каких пределов происходит снижение воздушных потоков на дне карьера, как происходит циркуляция атмосферного воздуха внутри карьерного пространства и какие параметры источника загрязнения можно использовать для корректного распределения вредностей в карьерном пространстве. Приведены результаты анализа численных экспериментов по моделированию процесса загрязнения от стационарных источников и циркуляции атмосферного воздуха в зависимости от высоты препятствий, расположенных в верхней части борта карьера. Моделирование проводилось на основе трехмерной CFD-модели (модели вычислительной гидродинамики) атмосферы карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК», разработанной в программном комплексе ANSYS Fluent, с учетом орографии прилегающей к карьере территории. Набор уравнений, используемый для описания аэродинамики атмосферы карьера, является классическим для решения подобного рода задач.

Ключевые слова: CFD-моделирование, карьер, загрязнение атмосферы, аэротермодинамика, температурные инверсии, загрязнение, предельно допустимая концентрация, ANSYS Fluent

Для цитирования

Для цитирования: Назарчук О.В. Влияние геометрических параметров и математического описания CFD-модели на пространственное распределение загрязняющих веществ внутри карьерного пространства, на примере программного комплекса ANSYS Fluent. *Горная промышленность*. 2024;(6):42–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-42-46>

Influence of the CFD model parameters on the spatial distribution of pollutants inside the open pit space, using the example of the ANSYS Fluent software package

O.V. Nazarchuk✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ o.nazarchuk@ksc.ru

Abstract: The relevance of the research is due to the increased interest of specialists in the field of open pit aerology in the use of modern software systems for calculating the aerological parameters of the atmosphere in deep open pits. Experts raise questions about the extent to which the air flows at the bottom of the open pit are reduced, how atmospheric air circulates inside the open pit space, and what parameters of the pollution source can be used to monitor the distribution of harmful substances in the open pit space. The paper presents the results of analyzing numerical experiments on modeling the process of polluting from the stationary pollution sources and the atmospheric air circulation depending on the height of obstacles located on the upper side of the open pit. The modeling was carried out using a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model of the atmosphere at the Zhelezny open pit mine of Kovdorsky GOK JSC developed in the ANSYS Fluent software package with variations in the territory adjacent to the open pit. The set of equations used to describe the aerodynamics of the open pit atmosphere is classical for solving problems of this kind.

Keywords: CFD modeling, open pit, air pollution, aerothermodynamics, temperature inversions, pollution, maximum allowable concentration, ANSYS Fluent

For citation: Nazarchuk O.V. Influence of the CFD model parameters on the spatial distribution of pollutants inside the open pit space, using the example of the ANSYS Fluent software package. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):42–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-42-46>

Введение

В связи с углублением карьеров и повышением производительности карьерного транспорта проблема проветривания карьеров требует постоянного развития подходов к оценке показателей состояния атмосферы объекта. В процессе изучения данной проблемы специалистами в области рудничной аэрологии широко применялись математические системы и модели, описывающие начальное и конечное состояние атмосферы карьерного пространства. За начальное состояние атмосферы карьерного пространства обычно принимают – состояние, которое соответствует нулевому значению времени отчета. Начальное состояние может характеризоваться и как чистый атмосферный воздух – при рассмотрении процессов загрязнения атмосферы, и как загрязненная атмосфера – при оценке времени ее нормализации, а конечное отображает состояние атмосферы через определенное время.

Большой вклад в развитие математических методов моделирования внесли К.З. Ушаков, В.А. Михайлов, В.С. Никитин, Н.З.Битколов, В.В. Пененко, А.Е. Алоян, А.А. Бакланов, П.В. Амосов и др., наиболее полно описавшие математическую модель аэродинамических и атмосферных процессов в карьере [1–3]. Это стало возможным в том числе на основании экспериментальных данных, которые были получены упомянутыми выше исследователями в ходе многолетних наблюдений и замеров. Были выполнены работы по профилированию движения воздушной массы и рассчитаны наиболее неблагоприятные погодные условия, при которых работа в карьере становилась невозможной. Кроме того, В.С. Никитин и Н.З. Битколов не ограничились математическим описанием процессов, они инициировали работы по визуализации потоков воздуха в натуральных и численных исследованиях. Несмотря на скромный по современным меркам потенциал ЭВМ, было выполнено моделирование аэротермодинамических процессов атмосферы карьера [3].

Развитие вычислительной техники и появление программ для моделирования физических процессов широкого профиля (COMSOL, ANSYS Fluent, CFX, FlowVision, PHOENICS и др.) привело к росту интереса ученых и специалистов в области рудничной аэрологии и охраны окружающей среды (в первую очередь атмосферы) к использованию таких программ в научных исследованиях.

Среди авторов известных опубликованных и выложенных в сети Интернет работ есть сотрудники горных вузов Москвы [4–8] и Санкт-Петербурга [9; 10], Тульского государственного университета, НИЯУ МИФИ (Москва), Горного института УрО РАН (Пермь), Горного института КНЦ РАН [11–13], University of Alaska Fairbanks (USA) [14] и др.

В подавляющем большинстве случаев речь идет о создании и применении плоских и объемных компьютерных моделей турбулентных течений воздуха в приближении несжимаемой жидкости как в подземных рудниках, так и при ведении открытых горных работ.

Цель данной работы заключается в исследовании процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников загрязнений, в наиболее неблагоприятных условиях, в условиях сочетания температурной инверсии и штилей на базе численного моделирования в трехмерной постановке.

Методика проведения численного моделирования

Идея данной работы заключается в оценке влияния геометрических параметров и математического описания CFD-модели на распределение вредностей в пределах ка-

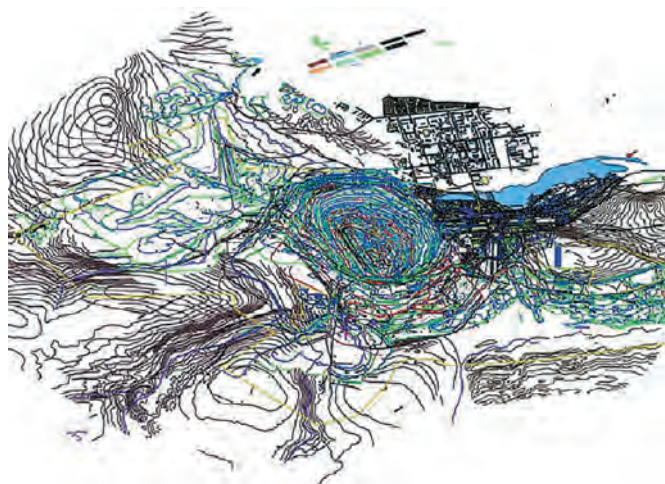


Рис. 1
План горных работ карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК»

Fig. 1
Mining plan of the Zhelezny open pit mine of Kovdor sky GOK JSC

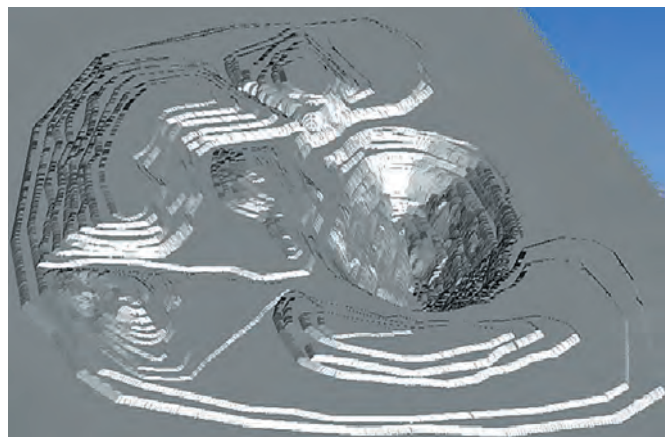


Рис. 2
Геометрия карьера с учетом сложной орографии прилегающей к карьере территории

Fig. 2
Geometry of the open pit with account of the complex orography of the territory adjacent to the open pit

рьерного пространства на примере распределения условного СО в условиях температурной инверсии.

Для реализации данной идеи была разработана трехмерная CFD-модель карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК», соответствующая плану горных работ начала 2019 г. (рис. 1), в трех вариациях прилегающей территории. Первая модель представлена с плоской прилегающей территорией, вторая – с учетом отвалов, расположенных с западной и юго-западной стороны, третья модель – с учетом сложного техногенного рельефа прилегающей к карьере территории (рис. 2).

Для описания аэродинамических процессов в программе ANSYS Fluent используется система уравнений, включающая в себя уравнение неразрывности и уравнения Навье–Стокса, усредненных по Рейнольдсу, уравнение турбулентного переноса тепла и Realizable ($k - \epsilon$) – модель турбулентности. Учет теплового фактора осуществлен с помощью модели «несжимаемого идеального газа», которая предоставляет функциональную зависимость плотности воздуха только от температуры:

$$\rho = \frac{p_0 p}{R M_w T}$$

Для изучения процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства были рассмотрены варианты поступления в атмосферу карьера загрязняющих веществ. В рамках данной работы загрязняющие вещества поступали от стационарных источников загрязнений. Выбор данного подхода неслучаен. За основу был взят близкий подход, представленный в работе K.V. Raj (рис. 3, а) [14] и статье О.В. Кондракова [15]. K.V. Raj представил источник загрязнения в виде куба со стороной ребра 6 м. При этом поступление газовой компоненты осуществляется через верхнюю границу куба. О.В. Кондраков с соавторами предложили разместить область газовыделения на высоте, на которой находится конец выпускной системы отработанных газов (модель «факела»).

Так как область газовыделения велика и использование подхода K.V. Raj приведёт, как будет показано ниже, к формированию избыточной области газового загрязнения, нами был предложен переход от площадного источника загрязнения (см. рис. 3, а) к точечному. Размеры области газовыделения сопоставимы с диаметром выхлопного тракта дизельного оборудования 250 мм (рис. 3, б).

Источники газовыделения были расположены по 4 зонам, по 5 единиц на каждой (рис. 4), при этом основывались на возможных вариантах расположения дизельного оборудования в карьерном пространстве.

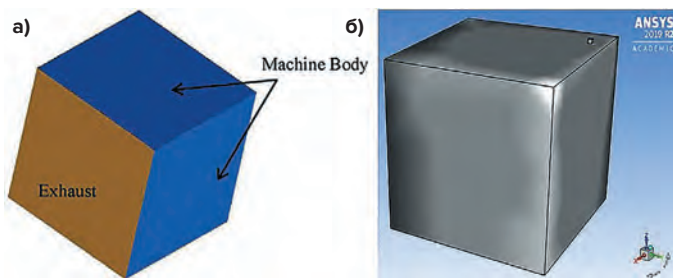


Рис. 3
Геометрия стационарного источника загрязнения:
а – площадной;
б – точечный

Fig. 3
Geometry of a stationary source of pollution:
а – areal;
б – point

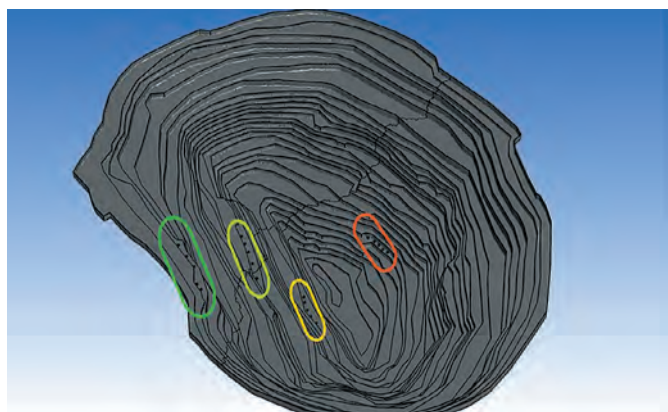


Рис. 4
Расположение рабочих зон оборудования по различным высотным отметкам: зеленый +165 м; салатовый –65 м; желтый и оранжевый –175 м

Fig. 4
Location of the equipment working areas at various elevations: green +165 m; light green –65 m; yellow and orange –175 m

Результаты и их обсуждение

Для оценки влияния термического фактора был проведен ряд численных экспериментов с варьированием скорости ветрового потока от 1 до 4 м/с по направлению моделирования с запада на восток и температурным градиентом +0,01 К/м. На рис. 5 представлен график распределения Y-компоненты скорости ветрового потока вдоль вертикальной оси для модели, использующей приближение «несжимаемой жидкости» (рис. 5, а), и аналогичной модели, но с использованием приближения «несжимаемого идеального газа» (скорость 2 м/с) (рис. 5, б).

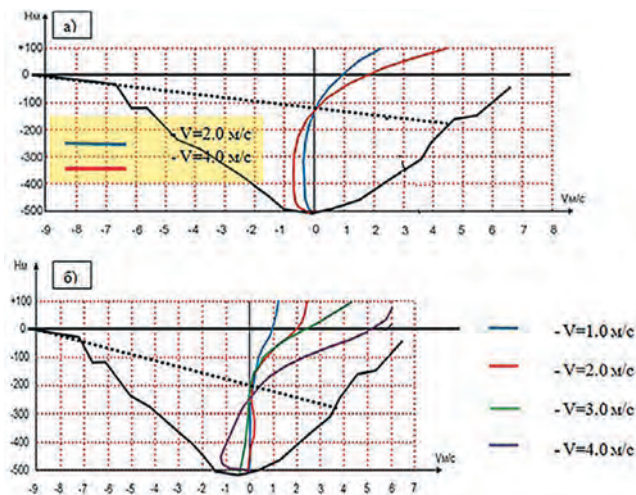


Рис. 5
Распределение Y-компоненты скорости ветрового потока вдоль вертикальной оси, восстановленной к центру подошвы карьера:
а – приближение «несжимаемой жидкости»;
б – приближение «несжимаемого идеального газа»

Fig. 5
Distribution of the Y-component of velocity along the vertical axis, restored to the center of the open pit bottom:
а – the “incompressible fluid” approach;
б – the “incompressible ideal gas” approach

Как видно из представленного графика, использование приближения «несжимаемого идеального газа» в условиях инверсионного состояния атмосферы приводит к изменению структуры потоков воздуха и формированию зон обратных потоков внутри карьера, вплоть до их исчезновения при малых значениях скорости ветра на борту карьера (менее 2 м/с), что ухудшает условия проветривания за счет уменьшения размера рециркуляционной зоны.

Также было проведено сравнение подходов по поступлению загрязняющих веществ в атмосферу карьерного пространства от стационарных источников загрязнения с разной площадью области газовыделения. Сравнивались подходы K.V. Raj и предложенный автором данной работы – точечного стационарного источника.

Распределение загрязнения было рассмотрено на примере распределения газовой компоненты CO. Газовыделение было масштабировано в зависимости от площади поверхности, через которую осуществляется внесение газовой компоненты в атмосферу карьерного пространства, и равнялось $1,26 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²с) для площадного и $4,53 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²с) для точечного.

Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7, красная зона на шкале равняется значению в 1 ПДК для CO, 20 мг/м³ (значения ПДК нормируются постановлением ГН 2.1.6.3492-17).

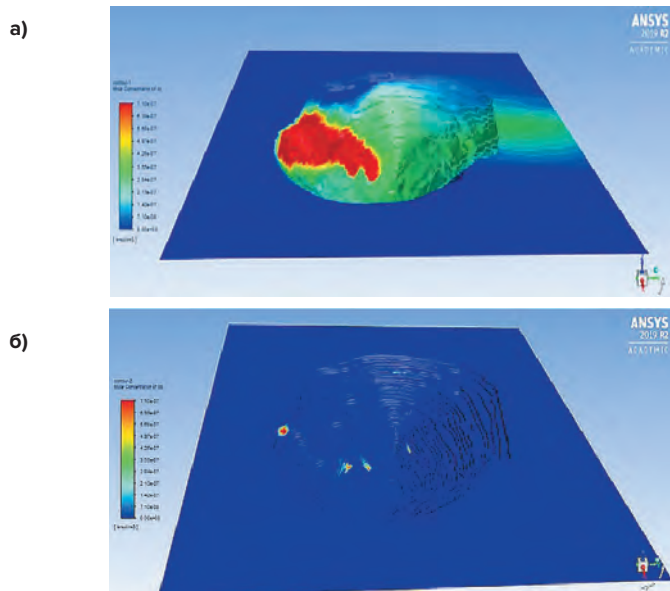


Рис. 6
Распределение газовой компоненты CO вблизи поверхности карьера: а – площадной источник; б – точечный источник

Fig. 6
Distribution of the CO gas component near the open pit surface: a – area source; б – point source

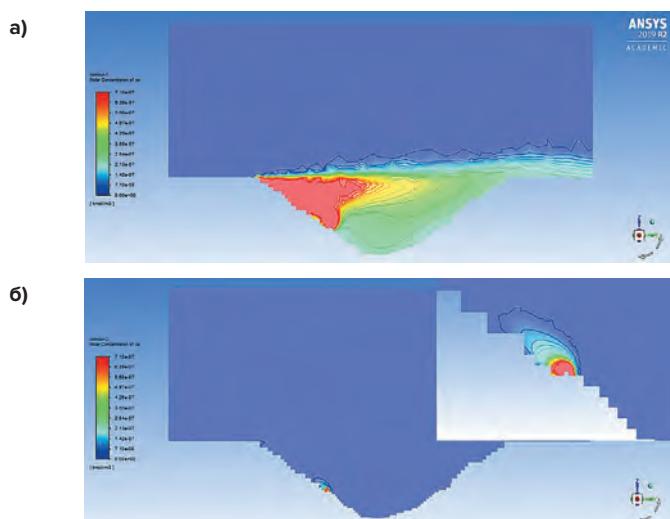


Рис. 7
Распределение газовой компоненты CO в сечении, проходящем через центр подошвы карьера, вдоль направления ветрового потока: а – площадной источник; б – точечный источник

Fig. 7.
Distribution of the CO gas component in the section passing through the center of the open pit bottom, along the direction of the wind flow: а – areal source; б – point source

Как видно из представленных распределений газовой компоненты, область загрязнения от точечного источника значительно меньше, чем при применении площадного.

Авторы считают, что результаты, полученные при моделировании точечных источников загрязнения, в большей мере соответствуют фактическим параметрам загрязнения атмосферы в карьерном пространстве.

Для определения степени влияния препятствий, расположенных вблизи карьера, на распределение поля скорости внутри карьерного пространства была использована модель, которая учитывает отвалы, расположенные с западной и юго-западной стороны карьера. Высота отвалов варьировалась от 20 до 100 м. Градиент температуры +0,01

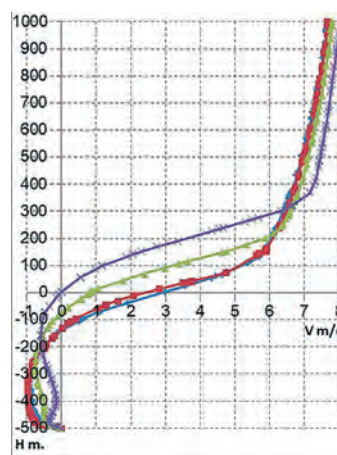


Рис. 8
Распределение Y-компоненты скорости: синий (ромб) – высота отвалов 0 м; красный (квадрат) – высота отвалов 20 м; зеленый (треугольник) – высота отвалов 60 м; фиолетовый (крест) – высота отвалов 100 м

Fig. 8
Distribution of the Y-component of the velocity: blue (diamond) – the dump height of 0 m; red (square) – the dump height of 20 m; green (triangle) – the dump height of 60 m; purple (cross) – the dump height of 100 m

К/м, а скорость ветрового потока 3 м/с по направлению запад-восток. По данным, полученным в результате моделирования, был построен график Y-компоненты скорости, преобладающей по данному направлению (рис. 8).

Как видно из представленного графика, наличие препятствий на верхней площадке карьера приводит к смещению рециркуляционной зоны, а наличие препятствий высотой более 60 м приводит к образованию вторичных зон обратных потоков.

Заключение

На основании данных, полученных после проведения численных экспериментов, было продемонстрировано влияние геометрических параметров элементов CFD-модели, таких как наличие и высота отвалов, расположенных вблизи верхней площадки карьера, геометрия стационарного источника загрязнения и влияние корректного математического описания процессов переноса загрязняющих веществ.

Так, на примере точечного стационарного источника загрязнения в условиях инверсии температур показано, что при моделировании поступления вредностей в атмосферу карьера более корректным, по мнению авторов, является использование точечного источника, сопоставимого с выхлопным трактом дизельного оборудования. Применение данного подхода позволяет проследить динамику пространственного распространения загрязнения внутри карьерного пространства и определить места концентрации вредностей.

Показана необходимость учета теплового фактора, так как он вносит значительный вклад в изменение структуры воздушных потоков внутрикарьерного пространства, в смещение рециркуляционной зоны и приводит к образованию зон обратных потоков, которые ослабляют естественную вентиляцию атмосферы карьера.

Продемонстрировано влияние препятствий, расположенных на наветренном борту карьера, в зависимости от высоты препятствий. Определено, что наличие препятствий вносит вклад, сопоставимый с влиянием теплового фактора, в изменение структуры поля скорости.

Список литературы / References

1. Ушаков К.З., Михайлов В.А. *Аэрология карьеров*. М.: Недра; 1975. 248 с.
2. Никитин В.С., Битколов Н.З. *Проветривание карьеров*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1975. 254 с.
3. Пененко В.В., Алоян А.Е. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука; 1985. 256 с.
4. Ястребова К.Н. *Повышение интенсивности естественного воздухообмена в рабочих зонах карьеров на основе аэродинамического профилирования подветренных бортов: дис. ... канд. техн. наук*. Санкт-Петербург; 2015. 118 с.
5. Драгунский О.Н. Разрушение внутрикарьерных инверсий естественными ветровыми потоками. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(2):14–19. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-14-19>
Dragunskiy O.N. Destruction of inversions by natural winds inside open pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-14-19>
6. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):99–107. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107>
Gendler S.G., Borisovsky I.A. Aerodynamic control in open pit gold mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):99–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107>
7. 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 Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):441–452. (In Russ.)
8. 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 Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):59–75. (In Russ.)
9. Гридина Е.Б., Петров И.А. Опыт математического моделирования процесса проветривания Оленегорского карьера в программном комплексе Flowvision. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S5-1):32–42.
Gridina E.B., Petrov I.A. Experience of mathematical modeling of ventilation Olenegorsk career in the software package Flowvision. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S5-1):32–42. (In Russ.)
10. Гридина Е.Б., Черкай З.Н. *Аэрология горных предприятий (карьеров)*. СПб.: ЛЕМА; 2017. 190 с
11. Козырев С.А., Вассерман А.Д., Осинцева А.В. Оценка параметров аэрации и загрязнения атмосферы карьеров вредными технологическими примесями. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2009;12(4):588–590. Режим доступа: https://vestnik.mauniver.ru/v12_4_n37/articles/05_kozyr.pdf (дата обращения: 19.10.2024).
Kozyrev S.A., Vasserman A.D., Osintseva A.V. Assessment of the aeration parameters and the open pit atmosphere polluted with adverse technological impurities. *Vestnik of MSTU*. 2009;12(4):588–590. (In Russ.) Available at: https://vestnik.mauniver.ru/v12_4_n37/articles/05_kozyr.pdf (accessed: 19.10.2024).
12. Амосов П.В., Новожилова Н.В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S56):528–534.
Amosov P.V., Novozhilova N.V. Study of thermal gradient impact on formation of meteorological fields in open-pit atmosphere (based on numerical modeling). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S56):528–534. (In Russ.)
13. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. 3D компьютерное моделирование характера распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S56):399–403.
Kozyrev S.A., Skorokhodov V.F., Nikitin R.M., Amosov P.V., Massan V.V. 3D computer modeling of air flow distribution on surface and in open-pit space of deep open-pits with taking into account real relief and open-pit scale. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S56):399–403. (In Russ.)
14. Raj K.V. *Three-dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures* [Thesis of Ph.D.]. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (accessed: 17.10.2024).
15. Кондраков О.В., Крючин О.В., Волосатов М.Ю., Клетров С.Ю. Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере на основании модели «Факела». *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2011;16(1):196–198.
Kondrakov O.V., Kryuchin O.V., Volosatov M.Yu., Kletrov S.Yu. Modeling of distribution of polluted substances in atmosphere on base of “Torch” model. *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki*. 2011;16(1):196–198. (In Russ.)

Информация об авторе

Назарчук Олег Васильевич – младший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: o.nazarchuk@ksc.ru

Information about the author

Oleg V. Nazarchuk – Junior Researcher at the Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: o.nazarchuk@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.10.2024
Поступила после рецензирования: 18.11.2024
Принята к публикации: 25.11.2024

Article info

Received: 13.10.2024
Revised: 18.11.2024
Accepted: 25.11.2024