

УДК: 622.4:519.67

**Назарчук Олег Васильевич**

аспирант,  
младший научный сотрудник,  
ФИЦ КНЦ РАН Горный институт КНЦ РАН,  
184209, г. Апатиты, Мурманская обл.,  
ул. Ферсмана, д 24  
e-mail: [o.nazarchuk@ksc.ru](mailto:o.nazarchuk@ksc.ru)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ КАРЬЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ ТОЧЕЧНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНВЕРСИИ И ШТИЛЯ

*Аннотация:*

Цель работы заключается в получении в процессе моделирования закономерностей и связей распределения угарного газа в атмосфере в условиях температурной инверсии и штиля с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. Исследования выполнены на основе разработанных трехмерных CFD моделей аэротермодинамики атмосферы карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Геометрия модели учитывает сложную орографию прилегающей к карьере территории с Северо-Западной, Западной и Юго-Западной сторон, а также перепад высот на бортах карьера. Для описания аэродинамических процессов использовано приближение несжимаемой жидкости. Для замыкания системы уравнений неразрывности и Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, использована Realizable (к-ε)-модель турбулентности. В моделях реализованы граничные условия первого и второго рода. Направление ветрового потока выбрано с Запада на Восток. Скорость ветра на высоте 10 м над бортом карьера равна 0,1 м/с (штилевые условия) и 2 м/с. На бортах карьера расположены стационарные источники выбросов загрязняющих веществ. Загрязнение рассмотрено на примере распределения газовой компоненты по угарному газу (CO). Проанализированы результаты численного моделирования в виде пространственного распределения газовой компоненты CO по различным сечениям и в виде графика распределения концентрации в зависимости от высоты. Показано, что с уменьшением скорости ветрового потока время загрязнения атмосферы карьера уменьшается. Для скоростей ниже 2 м/с, когда преобладают термические силы, результаты численного моделирования хорошо коррелируют с эмпирическими и расчетными данными, представленными в других научных работах, посвященных данной тематике. Установлено, что при штиле, когда зона превышения ПДК достигает дневной поверхности, наблюдается произвольный диффузионный вынос загрязняющих веществ из области карьера.

*Ключевые слова:* CFD-моделирование, карьер, атмосфера, аэротермодинамика, температурные инверсии, загрязнение, проветривание, ПДК, ANSYS Fluent

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.097

**Nazarchuk Oleg V.**

Junior Researcher,  
Federal Research Center  
of Kola Science Center of RAS,  
Mining Institute of KSC of RAS,  
184209 Apatity, Murmansk Region,  
24 Fersmana Str.  
e-mail: [o.nazarchuk@ksc.ru](mailto:o.nazarchuk@ksc.ru)

### INVESTIGATION OF POLLUTION PROCESS OF THE ATMOSPHERE OF OPEN PIT SPACE FROM POINT STATIONARY SOURCES UNDER CONDITIONS OF TEMPERATURE INVERSIONS AND STILL

*Abstract:*

The aim of the work is to obtain while the process of modeling new knowledge, patterns and relationships of the distribution of harmful gas in open pit space under conditions of atmosphere temperature inversion and still, with the use of computational fluid dynamics software ANSYS Fluent. The studies were carried out on the basis of the developed 3-D CFD-models of the open-pit mine atmosphere aerothermodynamic at Zhelezny mine of AO «Kovdorsky GOK». The geometry of the model takes into account the complex orography of the territory adjacent to the quarry from the North-West, West and South-West sides, as well as the height difference on the sides of the open pit. The incompressible fluid approximation is used to describe aerodynamic processes. The mathematical aerothermodynamics model of the open-pit atmosphere is based on the continuity equation, the Reynolds-averaged Navier-Stokes equation and the turbulent heat transfer equation. Boundary conditions of the first and second order are implemented in the models. The direction of the wind flow is chosen from west to east. The wind speed at a height of 10 m above the pit wall is 0.1 m/s (still conditions) and 2 m/s. Stationary sources of pollutant emissions are located on the sides of the quarry. The distribution of pollutants is considered by the example of the distribution of the gas component over carbon monoxide (CO). The results of numerical modeling are analyzed in the form of the spatial distribution of the CO gas component over various sections and in the form of a graph of the concentration distribution depending on the height. It is shown, that with a decrease in the speed of the wind flow the time of contamination of the open pit atmosphere decreases. For speeds below 2 m/s, when thermal forces prevail, the results of numerical modeling correlate well with empirical and calculated data obtained as a result of mathematical calculations published in other science papers on this theme. It was found that during still, when the zone of exceeding the maximum permissible concentration reaches the day surface, an arbitrary diffusion removal of pollutants from the open pit area is observed.

*Key words:* CFD-modeling, open pit, atmosphere, aerothermodynamics, temperature inversions, pollution, ventilation, level of concern, ANSYS Fluent

## Введение

Общие тенденции развития горного дела направлены на углубление карьеров, повышение производительности карьерного транспорта и увеличение мощности силовых установок, и, как следствие, возникает проблема проветривания глубоких карьеров.

В последние годы для исследования проблем проветривания глубоких карьеров применяют универсальные программные комплексы COMSOL, FLOWVISION, ANSYS Fluent и др. Специалисты горнорудных предприятий, занимающиеся обеспечением нормальных санитарно-гигиенических условий атмосферы карьеров при их эксплуатации на различных этапах отработки месторождений, также заинтересованы в применении современного программного обеспечения.

Исследования этих проблем проводились такими специалистами, как Калабин Г.В. и Бакланов А.А. [1], Амосов П.В. [2 – 4], Гридина Е.Б. [5], Баширов Н.Р. [6], Ястребова К.Н. [7], а также иностранными специалистами [8 – 13].

Цель данной работы, являющейся продолжением исследований Горного института КИЦ РАН по использованию методов численного моделирования при решении задач рудничной аэрологии [1 – 4], заключается в получении в процессе моделирования закономерностей и связей распределения угарного газа в атмосфере в условиях температурной инверсии и штиля при работе оборудования с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

### *Методика проведения численного моделирования*

Ввиду особенностей добычи полезных ископаемых открытым способом горные работы сопровождаются крупными изменениями ландшафта прилегающей территории, такими как образование отвалов, создающих перепады высот на бортах карьеров. Также для гористой местности характерны так называемые «вентиляционные каналы». В связи с углублением карьеров и усложнением орографии прилегающей территории ухудшается естественный воздухообмен карьерного пространства. Как следствие, происходит накопление вредных веществ, и повышаются производственные риски для работников горнорудных предприятий. Для решения задач, связанных с исследованием процесса загрязнения карьерного пространства в программном комплексе ANSYS Fluent, были созданы две трехмерные CFD-модели атмосферы карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Моделирование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики [1 – 4]. Линейные параметры сетки варьируются от 150 мм для участков, прилегающих к источникам загрязняющих веществ, до 25 м для участков атмосферы, расположенных за пределами карьерного пространства. Выбор таких линейных параметров сеточной генерации позволяет сократить время численного моделирования от 10 до 25 %.

Геометрические характеристики модели: глубина карьера 500 м; высота отвалов с Западной и Юго-Западной стороны составляет 60 м; перепад высот Западного и Восточного борта карьера составляет 40 м; наивысшая точка прилегающей территории с высотной отметкой 420 м находится на Северо-Западном борту (см. рис. 1).

Ранее проведен ряд численных экспериментов для оценки влияния сложной орографии прилегающей к карьере территории. В зависимости от точности построения прилегающей к карьере территории погрешность в распределении поля скоростей может составлять от 4 до 20 %. Высокая степень погрешности, порядка 20 %, обусловлена плоской прилегающей территорией, которая не учитывает отвалов или возвышенностей высотой более 20 м, располагающихся на верхних уступах карьера.

В первой модели скорость ветрового потока принимается 0,1 м/с на высоте 10 м над уровнем борта карьера, что соответствует штилевым условиям (от 0 до 0,5 м/с). Для второй модели скорость ветрового потока принимается равной 2 м/с.

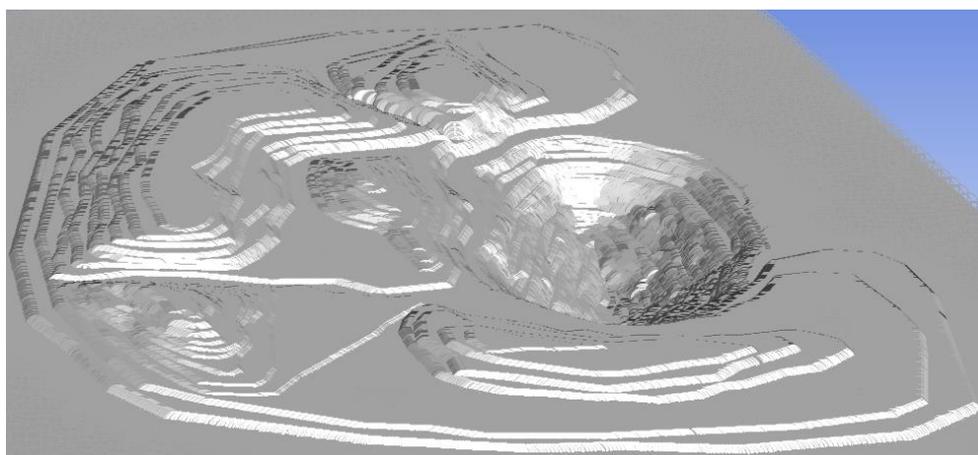


Рис. 1. Геометрия модели карьера с учетом сложной орографии прилегающей территории

В связи с большой площадью моделируемой территории и ограничением в мощности вычислительной техники, моделирование проводилось по направлению ветрового потока, преобладающего на протяжении года и соответствующего розе ветров, составленной для данной территории. Также ограничения в вычислительных мощностях и большие геометрические размеры области моделирования не позволяют разместить то количество техники, которое задействовано в процессе добычи полезных ископаемых. Тем не менее данные, полученные в процессе моделирования, демонстрируют принципиальную возможность использования методов численного моделирования для прогнозирования загрязнения атмосферы карьера при добыче полезных ископаемых на различных этапах обработки карьерного пространства.

Ввиду этих ограничений на бортах карьера расположены двадцать стационарных точечных источников выбросов загрязняющих веществ. Оборудование (ДВС) распределено по четырем рабочим зонам, по пять единиц в каждой (см. рис. 2), на высотных отметках 165, –65 и –170 м. Загрязняющее вещество – угарный газ (СО).

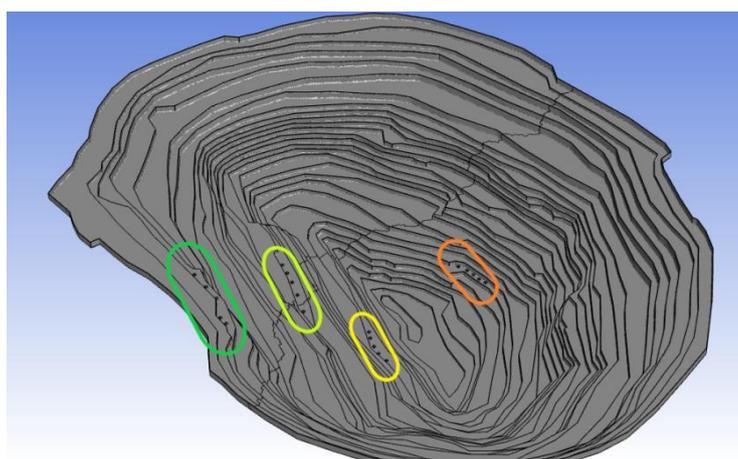


Рис. 2. Расположение рабочих зон оборудования с ДВС на бортах карьера

Для описания аэродинамических процессов использовано приближение несжимаемой жидкости. Математическое описание модели является традиционным для турбулентных течений: осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности, Realizable (к- $\epsilon$ )-модель турбулентности [4, 14].

В качестве граничных условий для скорости ветрового потока выбраны условия первого и второго рода. Данные условия являются классическими для подобного рода

задач [2, 3]. Для описания верхней и боковых границ, параллельных ветровому потоку, использовано условие симметрии. При описании входной и выходной границ задавался профиль скорости, а на основании модели – условие отсутствия скольжения, т.е. нулевая скорость.

### Обсуждение результатов

По результатам моделирования получены данные распределения газовой компоненты CO в виде молярной концентрации по различным сечениям. В качестве примера на рис. 3 и 4 представлено распределение газовой компоненты в сечении, проходящем через геометрический центр подошвы карьера, вдоль направления ветрового потока для первой и второй моделей, соответственно, через 8 часов работы оборудования с ДВС.

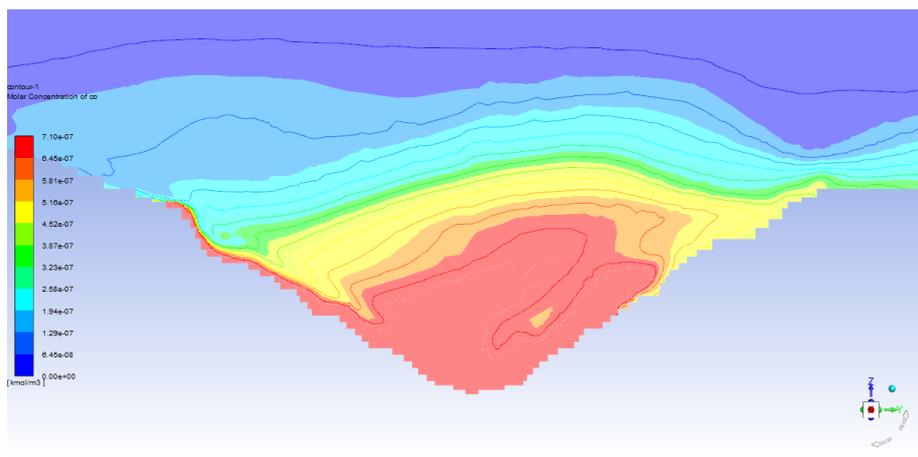


Рис. 3. Распределение газовой компоненты CO вдоль сечения, проходящего через геометрический центр подошвы карьера при штиле через 8 часов работы оборудования с ДВС

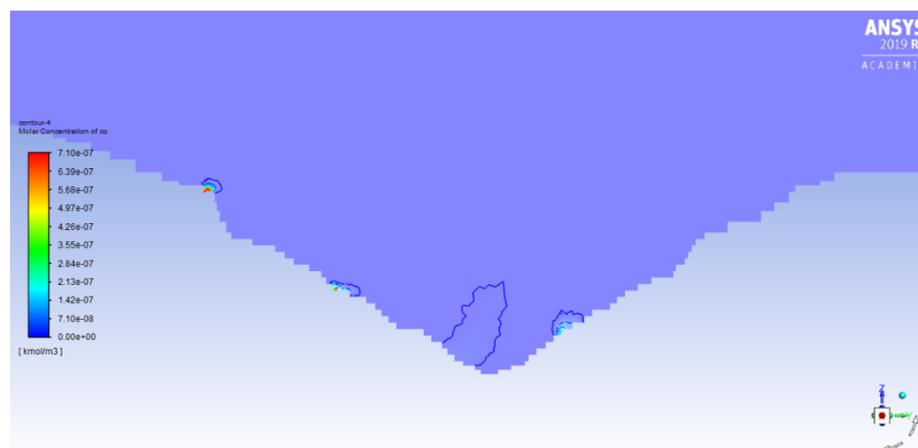


Рис. 4. Распределение газовой компоненты CO вдоль сечения, проходящего через геометрический центр подошвы карьера вдоль направления ветрового потока при скорости 2 м/с через 8 часов работы оборудования с ДВС

Анализ расчетов показывает, что условия штилей наиболее неблагоприятны для ведения работ по добыче полезных ископаемых. При низких скоростях ветрового потока, когда превалирует температурный фактор над компонентой скорости, размеры области загрязнения значительно выше ПДК ( $20 \text{ мг/м}^3$  для CO). Выявлено, что через 5 ча-

сов работы всего оборудования с ДВС происходит полное загрязнение атмосферы карьера, после чего начинается диффузионный вынос СО за пределы области карьера (рис. 5).

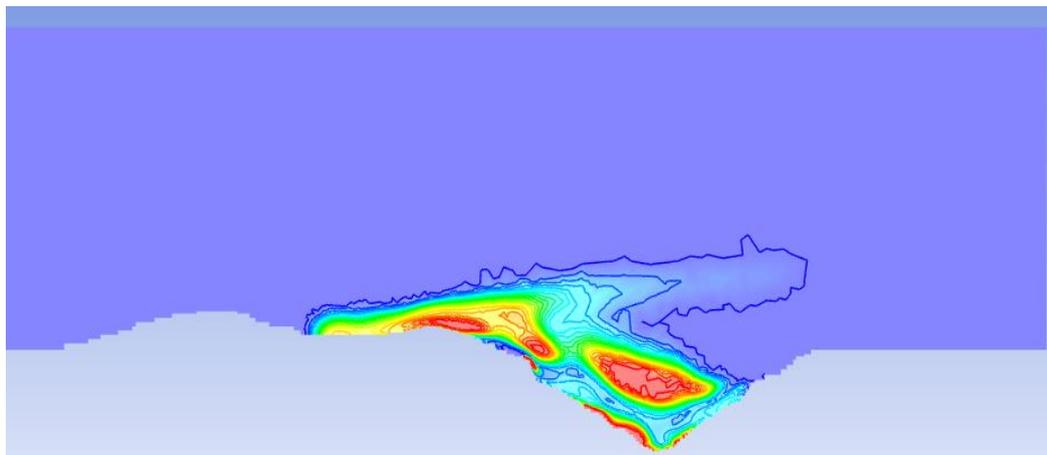


Рис. 5. Диффузионный вынос газовой компоненты СО вдоль сечения, проходящего через геометрический центр подошвы карьера при штиле через 5 часов работы оборудования

Также построены графики распределения газовой компоненты вдоль вертикальной оси по центру подошвы карьера (рис. 6 и 7).

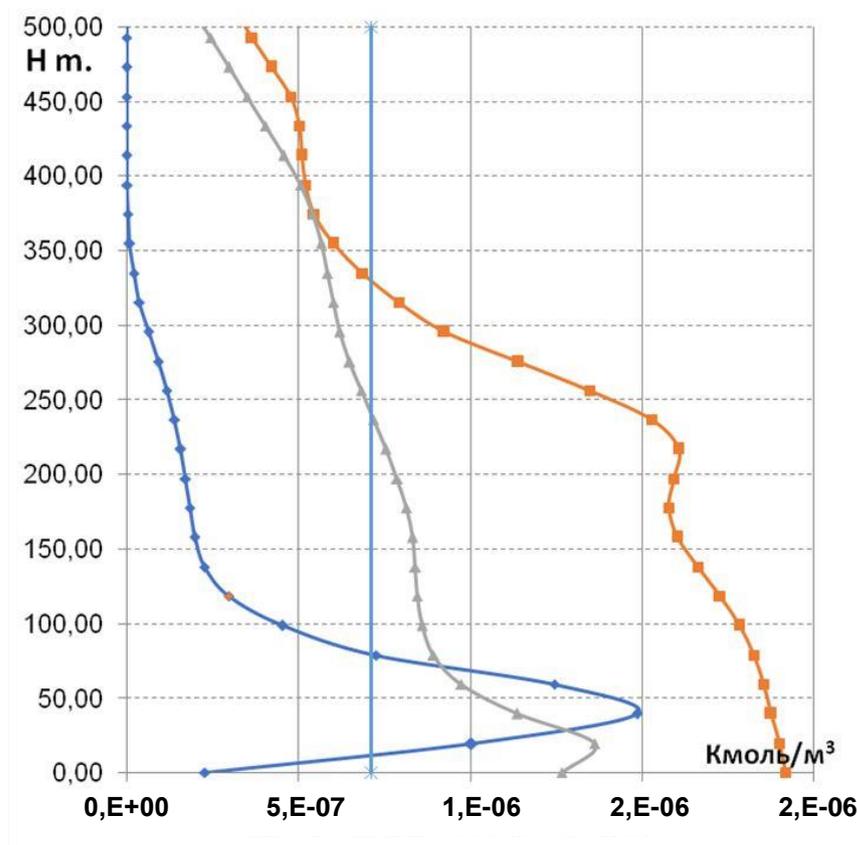


Рис. 6. График распределения газовой компоненты вдоль вертикальной оси при штиле:  
—■— за 1 час работы оборудования; —■— за 5 часов работы оборудования;  
—▲— за 8 часов работы оборудования; линия ×—× — ПДК для СО

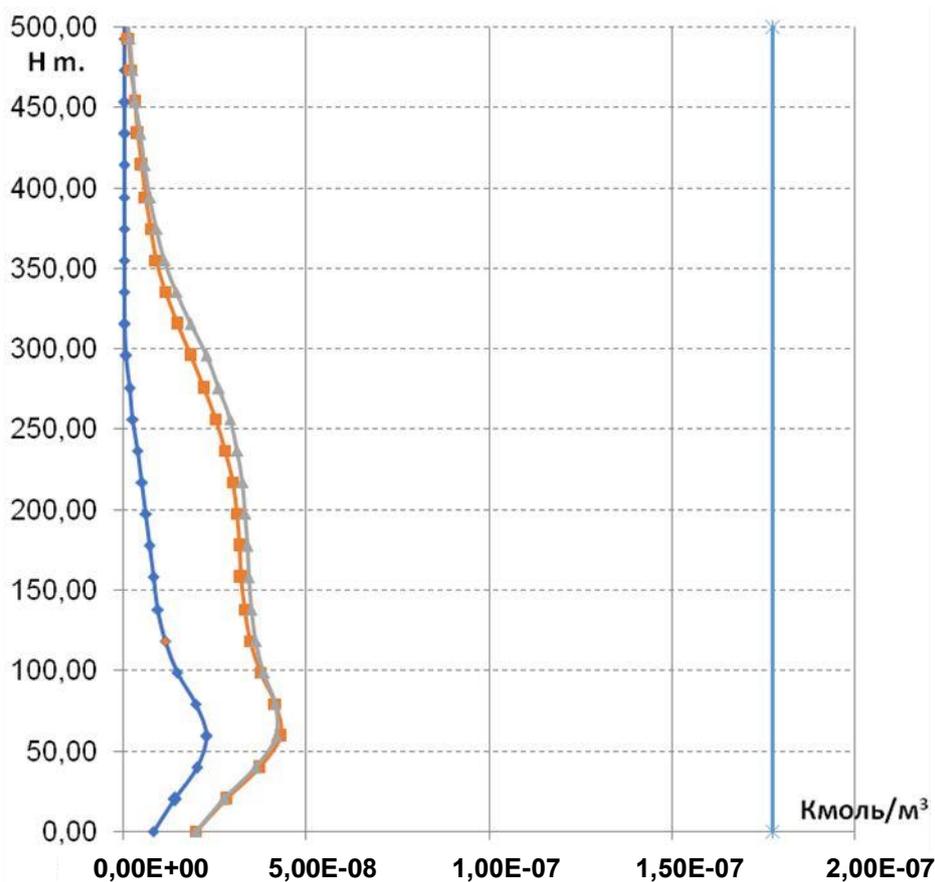


Рис. 7. График распределения газовой компоненты вдоль вертикальной оси при скорости ветрового потока 2 м/с:  
—■— за 1 час работы оборудования; —■— за 5 часов работы оборудования;  
—▲— за 8 часов работы оборудования; линия ×—× — ПДК для CO

Для удобства представления результатов за 0 по высоте выбрана нижняя точка карьера. Наиболее существенные количественные различия (на два порядка) по концентрации CO наблюдаются в области карьера на пятом часу работы оборудования. Если для ситуации со скоростью ветрового потока 2 м/с концентрация CO по области карьера не превышает  $1 \text{ мг/м}^3$ , то для ситуации в условиях штиля концентрация составляет  $54 \text{ мг/м}^3$ , что превышает ПДК почти в 3 раза.

#### Заключение

Для исследования процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства в условиях температурной инверсии и штиля в программном комплексе ANSYS Fluent были построены модели аэротермодинамики карьерного пространства. Модели учитывают сложную топографию прилегающей к карьере территории. Граничные условия удовлетворяют условиям температурных инверсий и штилей. Процесс загрязнения рассмотрен на примере работы техники оборудованной ДВС в виде двадцати точечных стационарных источников загрязнения по CO.

Результаты численного моделирования не противоречат общеизвестным фактам и результатам наблюдений о том, что условия штилей наиболее неблагоприятны для ведения работ по добыче полезных ископаемых.

При низких скоростях ветрового потока, когда превалирует температурный фактор над компонентой скорости, наблюдаются зоны превышения ПДК почти в 3 раза.

Выявлено, что через 5 часов работы всего оборудования с ДВС происходит полное загрязнение атмосферы карьера, после чего начинается диффузионный вынос CO за пределы области карьера.

### Список литературы

1. Калабин Г.В., Бакланов А.А., 1991. *Математическое моделирование процессов загрязнения атмосферы на объектах горной промышленности*. Кольский научный центр АН СССР. Апатиты: КНЦ АН СССР, 89 с.
2. Амосов П.В., Новожилова Н.В., 2015. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования). *Горный информационно-аналитический бюллетень. Спецвыпуск "Глубокие карьеры"*, С. 528 - 534.
3. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В., 2015. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров. *Вестник Мурманского государственного технического университета*, Т. 18, № 2, С. 178 - 182.
4. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В., 2018. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в Ansys Fluent. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института*, № 44 (70), С. 121 - 125. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121
5. Gridina E.B., Andreev R.E., 2017. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package. *International Review on Modelling and Simulations*, V. 10, № 1, P. 62 - 69. DOI:10.15866/iremos.v10i1.11101
6. Баширов Н.Р., 2018. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока. *Известия вузов. Горный журнал*, № 2, С. 40 - 47.
7. Ястребова К.Н., 2015. *Повышение интенсивности естественного воздухообмена в рабочих зонах карьеров на основе аэродинамического профилирования подветренных бортов*. Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 118 с.
8. Abdollahisharif Jafar, Bakhtavar Ezzeddin, Nourizadeh Hadi, 2016. Green bio-compatible approach to reduce the toxic gases and dust caused by the blasting in surface mining. *Environmental earth sciences*, Vol. 75, Issue: 3 Article Number: 191 P. 1-12. DOI: 10.1007/s12665-015-4947-9
9. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L., 2019. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied ecology and environmental research*, Volume: 17, Issue: 5, P. 10313 - 10333. DOI: 10.15666/aer/1705\_1031310333
10. Wang Y., Du Cf., 2021. Distribution law of the temperature inversion layer in a deep open-pit mine. *ACS OMEGA*, V. 6 Issue: 12 P. 8693 - 8699. DOI: 10.1021/acsomega.1c00674
11. Li Lin, Zhang Ruixin, Sun Jiandong, He Qian, Kong Lingzhen, Liu Xin, 2021. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. P. 401-414. DOI: 10.1007/s40201-021-00613-0
12. Wang Zhi-Ming, Zhou Wei, Jiskani Izhar Mithal, Ding Xiao-Hua, Liu Zhi-Chao, Qiao Yan-Zhen, Luan Boyu, 2021. Dust reduction method based on water infusion blasting in open-pit mines: a step toward green mining. *Energy sources part a-recovery utilization and environmental effects*. P. 1 - 16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118
13. Wang Yuan, Du Cuifeng, Xu Haiyue, 2021. Key Factor Analysis and Model Establishment of Blasting Dust Diffusion in a Deep, Sunken Open-Pit Mine. *ACS OMEGA* V. 6 Issue: 1 P. 448-455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881
14. *Ansys 19.0 Documentation*, 2018. Houston: Swanson Analysis Systems, Inc.

## References

1. Kalabin G.V., Baklanov A.A., 1991. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov zagryazneniya atmosfery na ob"ektakh gornoj promyshlennosti* [Mathematical modelling of atmosphere pollution processes at mining facilities]. Kol'skii nauchnyi tsentr AN SSSR. Apatity: KNTs AN SSSR, 89 p.
2. Amosov P.V., Novozhilova N.V., 2015. *Issledovanie vliyaniya temperaturnogo gradienta na formirovanie meteopolei atmosfery kar'era (na baze chislennogo modelirovaniya)* [Research of the influence of the temperature gradient on the formation of the meteorological fields of the quarry atmosphere (based on numerical modeling)]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Spetsvypusk "Glubokie kar'ery", P. 528 - 534.
3. Kozyrev S.A., Skorokhodov V.F., Nikitin R.M., Amosov P.V., Massan V.V., 2015. *Otsenka aerologicheskoi obstanovki na otkrytykh gornyykh rabotakh na osnove trekhmernyykh modelei kar'erov* [Assessment of the aerological situation in open-pit mining works based on three-dimensional models of quarries]. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Vol. 18, № 2, P. 178 - 182.
4. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V., 2018. *Razrabotka komp'yuternoi modeli aerotermodinamiki atmosfery kar'era v Ansys Fluent* [Development of the atmospheric aerothermodynamics computer model of a quarry using Ansys Fluent]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta, № 44 (70), P. 121 - 125. DOI 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121
5. Gridina E.B., Andreev R.E., 2017. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package. International Review on Modelling and Simulations, V. 10, № 1, P. 62 - 69. DOI:10.15866/iremos.v10i1.11101
6. Bashirov N.R., 2018. *Metod dinamicheskogo proektirovaniya otvalov pri predvaritel'noi simulyatsii vozdushnogo potoka* [A method of dynamic design of waste dumps with preliminary simulation of air flow]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal , № 2, P. 40 - 47.
7. Yastrebova K.N., 2015. *Povyshenie intensivnosti estestvennogo vozdukh-obmena v rabochikh zonakh kar'erov na osnove aerodinamicheskogo profilirovaniya podvetrennykh bortov* [Increasing the intensity of natural air exchange in the working areas of quarries based on aerodynamic milling of the downwind sides]. Dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: FGBOU VPO "Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet "Gornyi", 118 s.
8. Abdollahisharif Jafar, Bakhtavar Ezzeddin, Nourizadeh Hadi, 2016. Green bio-compatible approach to reduce the toxic gases and dust caused by the blasting in surface mining. Environmental earth sciences, Vol. 75, Issue: 3 Article Number: 191 P. 1-12. DOI: 10.1007/s12665-015-4947-9
9. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L., 2019. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. Applied ecology and environmental research, Volume: 17, Issue: 5, P. 10313 - 10333. DOI: 10.15666/aeer/1705\_1031310333
10. Wang Y., Du Cf., 2021. Distribution law of the temperature inversion layer in a deep open-pit mine. ACS OMEGA, V. 6 Issue: 12 P. 8693 - 8699. DOI: 10.1021/acsomega.1c00674
11. Li Lin, Zhang Ruixin, Sun Jiandong, He Qian, Kong Lingzhen, Liu Xin, 2021. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm. Journal of Environmental Health Science and Engineering. P. 401-414. DOI: 10.1007/s40201-021-00613-0
12. Wang Zhi-Ming, Zhou Wei, Jiskani Izhar Mithal, Ding Xiao-Hua, Liu Zhi-Chao, Qiao Yan-Zhen, Luan Boyu, 2021. Dust reduction method based on water infusion blasting in open-pit mines: a step toward green mining. Energy sources part a-recovery utilization and environmental effects. P. 1 - 16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118
13. Wang Yuan, Du Cuifeng, Xu Haiyue, 2021. Key Factor Analysis and Model Establishment of Blasting Dust Diffusion in a Deep, Sunken Open-Pit Mine. ACS OMEGA V. 6 Issue: 1 P. 448-455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881
14. Ansys 19.0 Documentation, 2018. Houston: Swanson Analysis Systems, Inc.