

Численное моделирование процессов естественного проветривания карьера при вариации его глубины в условиях инверсионного состояния атмосферы

П.В. Амосов¹✉, А.А. Бакланов^{2,3}

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

² Всемирная метеорологическая организация, Женева, Швейцария

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ p.amosov@ksc.ru

Резюме: Целью исследования является оценка влияния параметра фоновой стратификации и глубины карьера на время естественного проветривания карьера и уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку при проведении взрывных работ в условиях Севера.

Использована аэротермодинамическая модель атмосферы, в которой уравнения динамики в приближении несжимаемой жидкости дополнены уравнением переноса тепла, а также учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации. Модель реализована в неспециализированной программе COMSOL и позволяет выполнять исследования аэротермогазодинамики атмосферы при ее различных состояниях. Двухмерная CFD-модель атмосферы карьера апробирована на процессе проветривания по рециркуляционной схеме. Проварьированы параметр фоновой стратификации (от 0,0 до +0,025 °С/м с шагом 0,005 °С/м) и глубина карьера от 300 до 700 м. Зафиксированы скорость ветрового потока 1 м/с на верхнем борту карьера, начальное местоположение пылегазового облака (по центру карьера вблизи подошвы) и угол откоса борта карьера 45°.

Показано существенное увеличение времени естественного проветривания карьера при усилении инверсионного состояния атмосферы. Спрогнозировано два вида формирования области максимального загрязнения с ростом глубины карьера: 1 – смещение от центра к подветренному борту карьера при нейтральной стратификации и 2 – положение по центру карьера вблизи подошвы при положительной фоновой стратификации.

Показано, что рост глубины карьера и увеличение параметра фоновой стратификации приводят к заметному росту времени достижения максимума концентрации на верхнем борту карьера и снижению величины этого максимума. Для рециркуляционной схемы проветривания усиление инверсионного состояния атмосферы увеличивает время естественного проветривания, но снижает уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по потоку.

Ключевые слова: численное моделирование, взрывные работы, проветривание карьера, нейтральное и инверсионное состояния атмосферы

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)». Часть исследований выполнена за счет гранта Российского научного фонда №23-77-30008.

Для цитирования: 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>

Numerical modeling of natural ventilation processes in an open pit mine at its various depths in inversion atmospheric conditions

P.V. Amosov¹✉, A.A. Baklanov^{2,3}

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

² World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ p.amosov@ksc.ru

Abstract: The research objective is to assess the influence of the background stratification parameter and the depth of an open pit mine on the time of natural ventilation of the mine and the level of atmospheric pollution at the upper side of the pit downwind of blasting operations in conditions of the North.

An aerothermodynamic model of the atmosphere was used, in which the equations of dynamics in the approximation of incompressible fluid were supplemented with the heat transfer equation, and the buoyancy and background stratification mechanisms were taken into account. The model was created in a general-purpose COMSOL software package and makes it possible to study aerothermogasdynamics of the atmosphere in its various states. A two-dimensional CFD-model of the open pit atmosphere was tested using the recirculation ventilation process. The background stratification parameter (from 0.0 to +0.025 °C/m with the increment of 0.005 °C/m) and the quarry depth from 300 to 700 m were varied. The wind velocity of 1 m/s at the upper side of the pit, the initial location of the dust and gas cloud (in the center of the pit near its floor) and the slope angle of the pit wall of 45° were recorded.

A significant increase in the time of natural ventilation of the open pit is demonstrated at intensifying inversion of the atmosphere. Two formation types of the maximum pollution area with the increasing pit depth are predicted: (1) displacement from the center to the lee side of the pit at neutral stratification; and (2) position in the center of the pit near its floor at positive background stratification.

It is shown that increasing of both the pit depth and the background stratification parameter leads to a noticeable increase in the time to reach the maximum concentration at the upper side of the pit and a decrease in the value of this maximum. For the recirculation ventilation scheme, intensification of inversion in the atmosphere increases the time of natural ventilation, but reduces the level of atmospheric contamination at the upper side of the pit downstream.

Keywords: numerical modeling, blasting, open pit mine ventilation, neutral and inversion states of the atmosphere

Acknowledgments: The study was performed within the framework of Research Project "Processes of transformation of natural and anthropogenic systems under climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (using the case of the Murmansk region)" (state reg. No.1021051803680-5). Part of the research was financed from Grant №23-77-30008 of the Russian Science Foundation.

For citation: 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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>

Введение

Проблема обеспечения безопасных условий труда горнорабочих на открытых горных работах продолжает оставаться актуальной. Обусловлено это помимо сложных арктических метеорологических условий продолжающимся углублением ведения добычи полезных ископаемых. Как отмечается в коллективной монографии сотрудников Горного института КНЦ РАН [1], «общая эффективность освоения месторождений может быть повышена не только через совершенствование техники, технологии и организации производства, но и посредством внедрения цифровых технологий в практику оценки запасов месторождения, проектирования и планирования горных работ». Следует согласиться с авторами цитируемой монографии, что внедрение цифровых технологий является актуальной задачей для повышения эффективности горного производства и производительности труда, улучшения безопасности горных работ в условиях Крайнего Севера. Решаемая в статье задача непосредственно связана с обеспечением безопасности труда горнорабочих при проведении массовых взрывов в условиях неблагоприятных атмосферных параметров (инверсионные состояния), при которых затруднителен процесс воздухообмена в карьерах, что приводит к существенным временным простоям горнодобывающих предприятий. Использование методов численного моделирования позволяет достаточно оперативно (или заранее) выполнять численные эксперименты, позволяющие прогнозировать пространственно-временные распределения загрязнений в объеме карьеров при тех или иных технологических параметрах отработки месторождения. Представляется, что именно создание цифровых двойников таких сложных горных объектов, как

карьер, можно достаточно плодотворно использовать для повышения эффективности и обеспечения безопасности ведения работ.

Развитие вычислительной техники, разработка верифицированных программных продуктов, появление нового поколения подготовленных молодых специалистов, способных использовать современные программы, придало толчок к возобновлению исследований процессов естественного проветривания карьеров. Появились исследовательские группы как за рубежом, так и в России, которые с разной степенью успеха пытаются исследовать процессы загрязнения атмосферы карьеров при эксплуатации оборудования с ДВС и проведении взрывных работ, а также процессов проветривания карьеров как естественным образом, так и с привлечением каких-либо технологических способов. Авторы статьи в публикации [2] представили обзор исследований по применению неспециализированных программных продуктов для моделирования аэротермогазодинамических процессов в атмосфере на объектах горнопромышленного комплекса (хвостохранилища, карьеры). Здесь же просто приведем фамилии исследователей-лидеров, используемые ими программы и некоторые заметные публикации.

Среди зарубежных исследовательских групп (Великобритания, Индия, Китай, Чили и др.) интересные результаты получены с использованием программных кодов ANSYS FLUENT (I.S. Lowndes et al. [3], K.V. Raj [4], Y. Wang et al. [5], Z. Huang et al. [6]) и OpenFOAM (M. Balogh et al. [7], F. Flores et al. [8]).

Среди российских исследователей можно выделить несколько групп (Санкт-Петербург, Пермь, Апатиты и др.), использующих мощные, однако не предназначенные для

моделирования пограничного слоя атмосферы (неспециализированные) программные продукты:

- FLOWVISION – Н.Р. Баширов [9], Е.Б. Гридина, И.А. Петров [10];
- ANSYS FLUENT – К.Н. Ястребова [11], С.Г. Гендлер с коллегами [12], С.А. Козырев и П.В. Амосов с коллегами [13], О.В. Назарчук [14], С.А. Бублик и М.А. Семин [15];
- COMSOL – П.В. Амосов [16].

Цель работы – на базе метода численного моделирования исследовать процесс естественного проветривания карьера в условиях нейтрального и инверсионного состояний атмосферы и вариации глубины карьера при проведении массового взрыва, а также уровень загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера вниз по ветровому потоку.

Математическая модель и методика исследования

Для выполнения численных экспериментов в двухмерной постановке использована ранее построенная в неспециализированном программном коде COMSOL¹ компьютерная модель аэрогазодинамики атмосферы карьера [16]. Выбрана геометрия карьера, который проветривается по рециркуляционной схеме [17, с. 34]: относительная длина карьера в направлении движения ветра менее 5–6; угол откоса подветренного борта карьера более 15°.

Модернизация модели: в приближении несжимаемой жидкости выполнен переход в терминологию отклонений потенциальной температуры и приведенного давления, уравнения сохранения вертикальной компоненты импульса и переноса тепла дополнены учетом двух механизмов (плаучести и фоновой стратификации) соответственно. Модернизированная математическая модель аналогична модели, описанной в работах Г.И. Марчука, В.В. Пененко, А.А. Бакланова [18–22]. Математическая модель исследуемых процессов, переход к ней в программном комплексе COMSOL, а также обзор исследований по применению неспециализированных программных продуктов для моделирования аэротермогазодинамических процессов в атмосфере на объектах горнопромышленного комплекса (хвостохранилища, карьеры) подробно описаны в работе [2]. Там же приведено описание начальных и граничных условий, используемых при численном решении уравнений аэротермогазодинамики атмосферы.

Последовательность выполнения расчетов содержит три шага:

1-й шаг: получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием (k-ε) – модели турбулентности;

2-й шаг: решаем нестационарную задачу аэротермодинамики с учетом сложившегося к концу первого шага поля скорости и коэффициентов турбулентного переноса тепла с выходом практически на стационарный режим аэротермодинамических параметров (продолжительность расчета 4 ч);

3-й шаг: с учетом сложившегося к концу второго шага поля скорости и коэффициентов турбулентного переноса загрязнений выполняется нестационарный расчет распространения газовой компоненты до выхода загрязнения в области моделирования на уровень ПДК.

На каждом шаге используются необходимые для расчетов начальные и граничные условия [2], в т.ч. и установленные по умолчанию разработчиками программы COMSOL².

Фиксированные параметры

- начальное местоположение пылегазового облака (ПГО) (по центру карьера вблизи подошвы);
- начальная загазованность ПГО (100 ПДК по условной СО);
- скорость ветра на высоте +10 м к верхнему борту карьера равна 1 м/с;
- угол откоса борта карьера (45°).

Параметры варьирования

- параметр фоновой стратификации S (0,000–0,025 °С/м с шагом 0,005 °С/м);
- глубина карьера Н (300–700 м с шагом 100 м).

Выходные параметры анализа

- время естественного проветривания карьера, т.е. его очищение от примеси до уровня ПДК;
- пространственное распределение загрязнения по объему карьера на время достижения ПДК;
- динамика и уровень загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера вниз по потоку.

Результаты расчетов и их анализ

Расчетное время естественного проветривания карьера

В табл. 1 обобщены результаты расчетов процессов проветривания при вариации указанных выше параметров. Хорошо видно, что при используемом в расчетах местоположении ПГО и глубины карьера не во всех расчетах выполняется монотонность прогнозного времени проветривания при вариации параметров модели. Некоторые особенности наблюдаются при минимальной глубине карьера (300 м) – это состояние, близкое к пограничному определению рециркуляционной схемы проветривания, а также для нейтрального состояния атмосферы. За указанным исключением и рост глубины карьера, и усиление стратификации приводят к увеличению времени проветривания. Если минимальное значение времени проветривания чуть менее 1,5 ч, то максимальное значение, отвечающее глубине 700 м и фоновой стратификации 0,025 °С/м, почти в 10 раз больше.

Таблица 1
Расчетное время естественного проветривания карьера при вариации глубины карьера и параметра фоновой стратификации, с

Table 1
Estimated time of natural ventilation inside an open pit mine at various pit depths and background stratification parameter, s

Глубина, м	Параметр стратификации, °С/м					
	0,000	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
300	~ 6540	~ 5480	~ 6000	~ 6480	~ 7000	~ 7460
400	~ 4890	~ 7600	~ 10950	~ 12690	~ 13920	~ 14820
500	~ 4680	~ 17430	~ 21870	~ 24180	~ 25620	~ 26640
500	~ 4890	~ 30690	~ 35520	~ 38100	~ 39690	~ 40800
600	~ 5310	~ 43290	~ 48390	~ 50880	~ 52470	~ 53550

¹ Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/>; CFD Module User's Guide. Comsol official site. Available at: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>

² Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/>; CFD Module User's Guide. Comsol official site. Available at: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>

Коэффициенты функции аппроксимации для пяти значений параметра стратификации (кроме $S = 0,000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$) в форме степенной функции $T = A \cdot H^b$ с высокими коэффициентами достоверности могут быть описаны экспоненциальной (0,9972) и линейной (0,9980) функциями соответственно.

Обобщенная функция времени естественного проветривания карьера в зависимости от глубины карьера (300–700 м) и параметра фоновой стратификации (0,005 – 0,025 $^\circ\text{C}/\text{м}$) имеет вид

$$T(S, H) = 0,0011 \cdot e^{89,0066 \cdot S} \cdot H^{-11,4120 \cdot S + 2,6583}$$

В принципе приведенное аналитическое выражение позволяет получить частные производные этой функции и выполнить при необходимости ее аккуратный анализ. Однако уже из графического изображения, построенного в MS Excel, видно, что экстремум функции имеет место при максимальных значениях исследуемых параметров: $S = 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ и $H = 700 \text{ м}$.

Пространственное распределение загрязнения по объему карьера (на время достижения ПДК)

Для анализа пространственных распределений загрязнения в области карьера на моменты достижения уровня ПДК использованы «мгновенные» картинки. Приняты следующие диапазоны загрязнений: 0,0–0,2 ПДК, 0,2–0,4 ПДК, 0,4–0,6 ПДК, 0,6–0,8 ПДК, 0,8–1,0 ПДК.

Продемонстрированы особенности размещения области максимального загрязнения в зависимости от параметра фоновой стратификации и глубины карьера. В частности, с увеличением глубины карьера наблюдаются два вида формирования области максимального загрязнения:

- 1) смещение от центра к подветренному борту карьера при нейтральной стратификации;
- 2) положение по центру карьера вблизи подошвы при нулевой фоновой стратификации.

Усиление инверсии приводит к более сильному «приземлению» загрязнения к основанию карьера, что не противоречит экспериментальным данным классиков аэрологии карьеров – С.С. Филатов, Н.З. Битколов, И.И. Медведев [23; 24].

Динамика и уровень загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера вниз по потоку

В процессе проветривания карьера вынос загрязнений в первую очередь сказывается на верхнем борту карьера вниз по потоку. На рис. 1, а и б представлена динамика концентрации загрязнения атмосферы (в единицах ПДК) на верхнем борту карьера в зависимости от глубины карьера для двух значений параметра стратификации: а – $S = 0,000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ и б – $S = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$.

Анализ графической информации позволяет констатировать, что увеличение параметра стратификации приводит к снижению концентрации загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера. Именно поэтому не приводятся графики динамики концентрации загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера при значениях параметра стратификации выше 0,005 $^\circ\text{C}/\text{м}$.

Максимальные значения концентрации отвечают глубине карьера 300 м. При нейтральной стратификации значение максимума концентрации прогнозируется на уровне 0,8 ПДК, а при $S = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ значение максимума уменьшается вдвое. Для более глубоких карьеров уровни загрязнения существенно ниже.

При учете механизма стратификации (см. рис. 1, б)

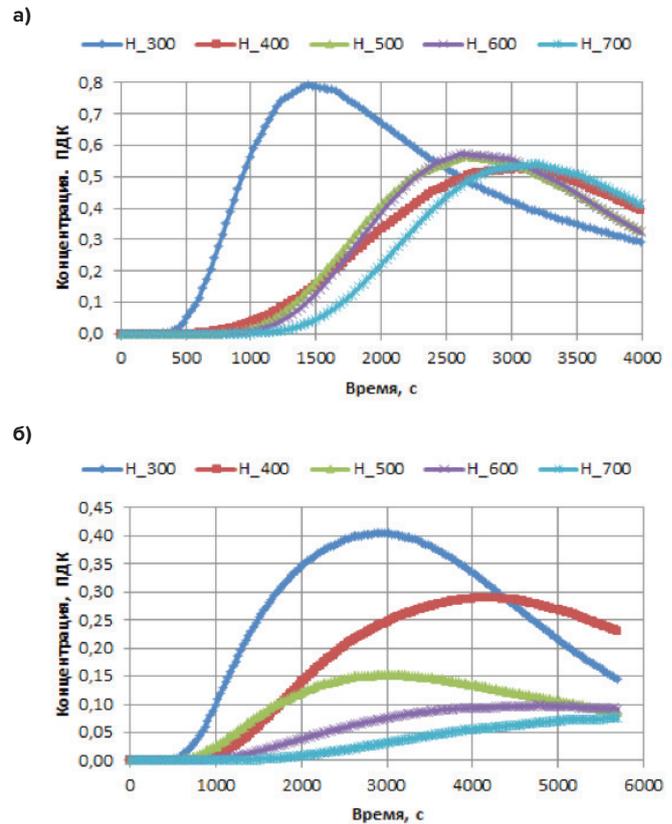


Рис. 1
Динамика концентрации загрязнения атмосферы (в единицах ПДК) на верхнем борту карьера в зависимости от глубины карьера: а – параметр стратификации $S = 0,000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ и б – параметр стратификации $S = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$

Fig. 1
Dynamics of atmospheric pollution concentration (in maximum allowable concentration units) at the upper side of the pit as a function of the pit depth: а – stratification parameter $S = 0.000 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ and б – stratification parameter $S = 0.005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$

последовательность максимальных значений концентрации (с понижением) совпадает с цепочкой значений глубины карьера 300–400–500–600–700 м. Сами значения максимумов заметно отличаются. При нейтральном же состоянии атмосферы такого порядка нет. При этом значения максимумов концентрации для глубин карьеров 400–700 м близки: отличия в величинах укладываются в интервал ~9% (см. рис. 1, а).

Интересно проследить за временем достижения максимальных значений. При нейтральной стратификации для глубины карьера 300 м максимум прогнозируется примерно через 1500 с. Для глубины карьера 400 м время достижения максимума уступает времени достижения максимума концентрации при глубинах карьера 500 и 600 м и практически равно для карьера глубиной 700 м. При этом время достижения максимумов для глубин 400–700 м укладывается в интервал 2600–3200 с.

Включение механизма стратификации на уровне $S = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ существенно увеличивает время достижения максимумов для карьеров с глубиной 300, 400, 600 и 700 м, но практически не изменяет время достижения максимума для карьера глубиной 500 м. Отмеченные особенности объясняются сложившимися структурами полей скорости и значениями аэродинамических параметров.

Подтверждением указанных фактов (в значительной степени качественно) являются поверхности функции времени максимального загрязнения атмосферы $FT(S,H)$ и поверхности функции максимумов концентрации загрязнения атмосферы $FC(S,H)$ на верхнем борту карьера в зависимости от параметра стратификации и глубины карьера соответственно, построенные в MS Excel.

Анализ изображений позволяет оценить и конкретизировать минимальные и максимальные значения функций времени и максимумов. Поверхность функции $FT(S,H)$ в зависимости от параметра стратификации и глубины карьера определяет максимум функции времени при максимальных значениях параметров вариации: $S = 0,025$ °C/м и $H = 700$ м, а минимум, наоборот, при минимальных значениях параметров вариации: $S = 0,005$ °C/м и $H = 300$ м. Поверхность функции $FC(S,H)$ в зависимости от параметра стратификации и глубины карьера определяет максимум функции максимумов концентрации при минимальных значениях параметров вариации: $S = 0,005$ °C/м и $H = 300$ м, а минимум, наоборот, при максимальных значениях параметров вариации: $S = 0,025$ °C/м и $H = 700$ м.

Авторы рассматривают представленные результаты как отработку методического подхода по исследованию и анализу результатов численных экспериментов в задаче проветривания карьеров. В подходе заложен принцип вариации как обозначенных в исследовании параметров, так и других не менее важных природных и технологических факторов (поток радиации, влажность атмосферы, скорость ветрового потока, местоположение массового взрыва, начальная загазованность, эксплуатация оборудования с ДВС и др.).

Предполагается продолжить исследования по созданию цифровых двойников карьеров.

Заключение

На базе программы COMSOL разработана компьютерная модель аэротермогазодинамики атмосферы карьера для исследования процессов проветривания при проведении взрывных работ. Модель в приближении несжимаемой жидкости модифицирована учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации.

Выполнен цикл расчетов процессов естественного проветривания карьера при вариации глубины карьера (300–700 м) и параметра фоновой стратификации (0–0,025 °C/м). При этом зафиксированы следующие параметры модели: скорость ветрового потока на верхнем борту карьера, угол откоса борта карьера, начальное местоположение пылегазового облака и его начальный уровень загазованности (по условному СО).

Выполнен анализ следующих выходных параметров:

- время естественного проветривания карьера, т.е. его очищение от примеси до уровня ПДК;
- пространственное распределение загрязнения по объему карьера;
- динамика и уровень загрязнения атмосферы на верхнем борту карьера вниз по потоку.

Продемонстрирована возможность аналитического описания времени естественного проветривания карьера как функции двух переменных – глубины карьера и параметра фоновой стратификации при его положительных значениях.

Выполнен анализ пространственного распределения загрязнения в объеме карьера на момент достижения уровня ПДК. Продемонстрированы особенности размещения области максимального загрязнения в зависимости от параметра фоновой стратификации и глубины карьера (смещение к подветренному борту карьера, по центру вблизи дна карьера).

Выполнен анализ величины и времени достижения максимума концентрации загрязнения на верхнем борту карьера вниз по потоку. Показано, что рост глубины карьера и параметра фоновой стратификации приводят к увеличению времени достижения и снижению величины максимума.

Список литературы

1. Лукичев С.В. (ред.) *Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности*. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук; 2019. 192 с.
2. Амосов П.В., Бакланов А.А. Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL. *Вестник МГТУ*. 2023;26(1):25–44. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44>
3. Lowndes I.S., Silvester S.A., Kingman S.W., Hargreaves D.M. Improved multi-scale computational modelling of fugitive dust dispersion from surface mining operations. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009;(4):178–186.
4. 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*. Ph.D. Thesis. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756>
5. 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>
6. 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

7. Balogh M., Parente A., Benocci C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation: implementation and comparison for Fluent and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012;104–106:360–368. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.023>
8. 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>
9. Баширов Н.Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(2):40–47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47>
10. 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.
11. Ястребова К.Н. Имитационное моделирование процесса обтекания бортов открытой горной выработки естественным ветровым потоком. *Безопасность труда в промышленности*. 2014;(8):60–62.
12. 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. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>
13. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Исследование влияния теплового фактора на аэродинамические параметры атмосферы карьера на основе трехмерного компьютерного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):322–332.
14. Назарчук О.В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и штиля. *Проблемы недропользования*. 2021;(4):97–104. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.097>
15. Бублик С.А., Семин М.А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании. *Горное эхо*. 2022;(1):126–133. <https://doi.org/10.7242/echo.2022.1.20>
16. Амосов П.В. Доминирующий фактор в паре «взрывные работы – ветровой режим» // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2020;(54):93–98. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98>
17. Никитин В.С., Битколов Н.З. *Проектирование вентиляции в карьерах*. М.: Недра; 1980. 171 с.
18. Марчук Г.И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. М.: Наука; 1982. 320 с.
19. Пененко В.В. (ред.) *Методы математического моделирования в гидродинамических задачах окружающей среды*. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР; 1983. 168 с.
20. Пененко В.В., Алоян А.Е. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука; 1985. 256 с.
21. Битколов Н.З., Пененко В.В. (ред.) *Нормализация атмосферы глубоких карьеров*. Л.: Наука; 1986. 296 с.
22. Бакланов А.А. *Численное моделирование в рудничной аэрологии*. Апатиты: КФАН СССР; 1988. 200 с.
23. Битколов Н.З., Медведев И.И. *Аэрология карьеров*. М.: Недра; 1992. 264 с.
24. Филатов С.С. *Вентиляция карьеров*. М.: Недра; 1981. 206 с.

References

1. Lukichev S.V. (ed.) *Scientific and practical aspects of applying digital technologies in the mining industry*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2019. 192 p. (In Russ.)
2. Amosov P.V., Baklanov A.A. Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for the study of dusting processes at tailings dumps using COMSOL software. *Vestnik of MSTU*. 2023;26(1):25–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44>
3. Lowndes I.S., Silvester S.A., Kingman S.W., Hargreaves D.M. Improved multi-scale computational modelling of fugitive dust dispersion from surface mining operations. *Ukrainskii gidrometeorologichnii zhurnal*. 2009;(4):178–186.
4. 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*. Ph.D. Thesis. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756>
5. 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>
6. 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
7. Balogh M., Parente A., Benocci C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k- ϵ model and wall function formulation: implementation and comparison for Fluent and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012;104–106:360–368. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.023>
8. 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>
9. Bashirov N.R. Method for dynamic design of dumps in preliminary simulation of airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2018;(2):40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47>
10. 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.)
11. Yastrebova K.N. Simulation modeling of the natural wind flow over the walls of an open-pit mine face. *Occupational Safety in Industry*. 2014;(8):60–62. (In Russ.)

12. Gendler S.G., Borisovsky I.A. Estimation of peculiarities of temperature inversion formation in open mining in the arctic conditions. *Izvestiya Tulskegogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):59–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>
13. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. The study of the thermal factor's impact on aerodynamic parameters of the open pit atmosphere based on 3d modelling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S37):322–332. (In Russ.)
14. Nazarchuk O.V. Investigation of pollution process of the atmosphere of open pit space from point stationary sources under conditions of temperature inversions and still. *Problems of Subsoil Use*. 2021;(4):97–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.097>
15. Bublik S.A., Semin M.A. Mathematical modeling of heat and air distribution in open-pit mines with natural ventilation. *Gornoe ekho*. 2022;(1):126–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2022.1.20>
16. Amosov P.V. Dominant factor in the pair “blasting – wind mode”. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2020;(54):93–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98>
17. Nikitin V.S., Bitkolov N.Z. *Design of ventilation in open pit mines*. Moscow: Nedra; 1980. 171 p. (In Russ.)
18. Marchuk G.I. *Mathematical modeling of environmental issues*. Moscow: Nedra; 1982. 320 p. (In Russ.)
19. Penenko V.V. (ed.) *Methods of mathematical modeling in hydrodynamic environmental problems*. Novosibirsk: Computing Center of the USSR Academy of Sciences; 1983. 168 p. (In Russ.)
20. Penenko V.V., Aloyan A.E. *Models and methods for solutions of environmental problems*. Novosibirsk: Nauka; 1985. 256 p. (In Russ.)
21. Bitkolov N.Z., Penenko V.V. (eds) *Atmospheric normalization in deep open pits*. Leningrad: Nauka; 1986. 296 p. (In Russ.)
22. Baklanov A.A. *Numerical modeling in mining aerology*. Apatity: Kazan Branch of the USSR Academy of Sciences; 1988. 200 p. (In Russ.)
23. Bitkolov N.Z., Medvedev I.I. *Aerology of open-pit mines*. Moscow: Nedra; 1992. 264 p. (In Russ.)
24. Filatov S.S. *Ventilation in open pit mines*. Moscow: Nedra; 1981. 206 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Амосов Павел Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>; e-mail: p.amosov@ksc.ru

Бакланов Александр Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, научный сотрудник отдела науки и инноваций; Всемирная метеорологическая организация, Швейцария, Женева; главный научный сотрудник, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>; e-mail: aabaklanov@yahoo.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2023
 Поступила после рецензирования: 22.11.2023
 Принята к публикации: 02.12.2023

Information about the authors

Pavel V. Amosov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>; e-mail: p.amosov@ksc.ru

Alexander A. Baklanov – Dr. Sci. (Phys. & Math.), Professor, Chief Scientist, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland; Chief Scientist, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>; e-mail: aabaklanov@yahoo.com

Article info

Received: 15.09.2023
 Revised: 22.11.2023
 Accepted: 02.12.2023