УДК 622.4

DOI: 10.25018/0236 1493 2022 8 0 38

# УЧЕТ ВАРИАТИВНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ВЫБОРЕ СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

С.Г. Гендлер<sup>1</sup>, И.А. Борисовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sqendler@mail.ru

Аннотация: Проведено исследование влияния вариативности метеорологических параметров атмосферного воздуха на проветривание глубоких золоторудных карьеров. Установлено, что изменение направления и увеличение скорости воздушного потока, пересекающего карьер, приводит к увеличению относительного объема застойных зон и ухудшению аэрологической обстановки в карьере. Показано, что для моделирования скоростных и температурных полей в карьере следует использовать программный комплекс Ansys Fluent в сочетании с программным комплексом Minitab для интерпретации статистических данных параметров атмосферного воздуха. Сформулирована основная задача работы — прогноз вероятности образования зон рециркуляции в карьере при изменении метеорологических параметров атмосферного воздуха. Отмечено, что для оценки особенностей формирования параметров рудничной атмосферы достаточно проведения математического моделирования аэродинамических процессов. Предложена методология моделирования аэродинамических процессов с учетом геометрии карьерного пространства, температуры, скорости и направления ветрового потока. Показано, что образование зон рециркуляционного движения воздушных масс характерно для всех рассмотренных метеорологических условий наружного воздуха, а также их образование приводит к снижению эффективности естественной вентиляции в карьере. Сделано заключение о возможности повышения эффективности проветривания карьеров за счет предварительного прогноза вероятности образования зон рециркуляции в зависимости от изменения метеорологических параметров наружного воздуха и последующего выбора наиболее благоприятных периодов с точки зрения ведения технологических процессов, характеризующихся значительным выделением пыли и газообразных веществ. Предложен метод управления аэродинамическими процессами в карьере и выполнена оценка эффективности его применения.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, Ansys, стратификация, естественная вентиляция, зоны рециркуляции, параметры атмосферы, Крайний север, аэрологический прогноз.

**Для цитирования:** Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Учет вариативности метеорологических параметров атмосферного воздуха при выборе способа проветривания глубоких карьеров Арктической зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 38–55. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_38.

#### Selection of ventilation method for deep open-pit mines in the Arctic with regard to variability of meteorological data on atmospheric air

S.G. Gendler<sup>1</sup>, I.A. Borisovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: sgendler@mail.ru

Abstract: The study focuses on impact exerted by variability of meteorological data on atmospheric air on ventilation quality in deep open-pit gold mines. The change in direction and the increase in velocity of air flow across the pit leads to the enlargement of dead-air spaces and worsens the air quality in the pit. Modeling of velocity and temperature fields in the pit should use Ansys Fluent in combination with Minitab for interpreting data of atmospheric air statistics. The objective of the research is to predict probability of recirculation zones in the pit under varied meteorological data on atmospheric air. For estimating specifics of open-pit mine atmosphere, it is sufficient to perform mathematical aerodynamics modeling. The methodology of the aerodynamics modeling with regard to the open pit geometry, and the wind flow temperature, velocity and direction is proposed. The zones of air flow recirculation appear to be typical of all test meteorological conditions of open air and deteriorate natural ventilation of open pits. It is possible to enhance ventilation efficiency of open-pit mines by advanced prediction of probable recirculation zones depending on variation in meteorological data of open air and by selecting the most favorable periods to implement production processes accompanied with essential emissions of dust and gaseous substances. The method of aerodynamics control in open pit mines is proposed, and its application efficiency is assessed.

*Key words:* mathematical modeling, Ansys, stratification, natural ventilation, recirculation zones, atmospheric parameters, Extreme North, air quality prediction.

*For citation:* Gendler S. G., Borisovsky I. A. Selection of ventilation method for deep open-pit mines in the Arctic with regard to variability of meteorological data on atmospheric air. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8):38-55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_38.

#### Ведение

Вследствие невысокой плотности населения в Арктической зоне России экологический ущерб, наносимый открытыми горными работами населению, проживающему вблизи карьеров, незначительно влияет на технико-экономические показатели добычи ценных полезных ископаемых: золота, серебра, платины, меди и др. [1]. Однако проблемы обеспечения нормативных параметров карьерного воздуха на рабочих местах, где непосредственно ведутся работы по добыче полезного ископаемого, остаются нерешенными [2]. Вследствие интен-

сивного выделения пыли при буровых работах и газов от работающего оборудования их объемное содержание в воздухе может периодически превосходить предельно допустимые значения (ПДК). Причиной данных событий является образование зон рециркуляционного движения воздуха, в которых накапливаются загрязняющие вещества [3].

Частота повторения этих явлений определяется изменением интенсивности естественной вентиляции, которая зависит от сочетанного действия таких метеорологических параметров атмосферного воздуха, как скорость и направление ветра, а также разница температур между наружным и карьерным воздухом [4].

На начальном этапе отработки месторождения практически весь образующийся объем загрязняющих веществ выносится за границы карьерного пространства за счет естественного воздушного потока [5]. С развитием месторождения глубина ведения добычных работ увеличивается и эффективность естественной вентиляции снижается, что способствует образованию застойных зон, характеризующихся низкой скоростью движения воздушных масс и являющихся потенциально опасными для накопления загрязняющих веществ [6]. Ситуация может усугубляться вследствие изменения метеорологических условий, таких как температура, скорость движения воздушных масс, направление движения и др. Результатом этих процессов является формирование условий, приводящих к простоям горнотранспортного комплекса, что в свою очередь отражается на производительности труда и экономических потерях предприятия [7].

Решение вопроса повышения безопасности и эффективности добычи полезного ископаемого при открытой разработке месторождения возможно за счет снижения негативного влияния аэродинамических процессов на состояние воздушной среды, что в первую очередь связано с необходимостью изучения закономерностей формирования параметров воздушной среды в карьерном пространстве с последующей разработкой мероприятий по управлению этими процессами [8].

Особенности формирования аэротермодинамических процессов в карьере исследовались еще в 50-х годах прошлого столетия в работах В.С. Никитина, Н.З. Битколова, И.И. Медведева. В них изложены теоретические основы, определяющие эти процессы, а также рас-

смотрены различные схемы вентиляции карьерного пространства и дана характеристика каждому типу [9]. В работах отмечается, что для нормализации параметров воздушной среды требуется использование способов, которые позволят исключить застойные зоны и тем самым повысить эффективность проветривания карьеров [10].

Один из возможных методов разрушения застойных зон, в том числе и температурных инверсий, рассмотрен в работе О.Н. Драгунского, где на основе результатов физического моделирования аэродинамических процессов в карьерном пространстве сделан вывод о возможности применения естественной вентиляции для оказания разрушительного воздействия на формирующиеся рециркуляционные зоны [11].

В связи с развитием программного обеспечения для решения задач аэрогазотермодинамики в последнее десятилетие наметилась тенденция широкого применения программных продуктов для исследования особенностей формирования параметров карьерной атмосферы, в частности, к ним относятся Ansys Fluent, Flow Vision и др. [12].

Один из примеров использования современного программного комплекса для изучения аэрологии карьеров представлен в работе П.В. Амосова, С.А. Козырева, О.В. Назарчука, где для условий железорудного месторождения Ковдорского ГОК разработана аэродинамическая модель карьерного пространства в программном комплексе Ansys Fluent c целью решения задачи по обеспечению соответствующих санитарных условий для рабочих на рабочих местах. В результате математического моделирования установлены условия образования температурных инверсий в зимний и летний период времени в зависимости от установившегося температурного поля в карьере, тем самым выполнена оценка формирующихся в карьере аэрологических условий [13].

Аналогичное исследование для vcловий железорудного месторождения Ковдорского ГОК выполнено специалистами Горного института КНЦ РАН П.В. Амосовым, Н.В. Новожиловым, где при помощи программного комплекса COMSOL проведено математическое моделирование аэротермодинамических процессов в карьере. При этом задача решалась в двухмерной постановке. В результате установлено, что при задании величины температурного градиента воздушная среда в карьере приобретает определенный класс устойчивости, который характеризует эффективность выноса загрязняющих веществ за границы карьерного пространства [14].

Помимо оценки состояния рудничной атмосферы в зависимости от изменяющейся температуры среды, также исследовалось влияние особенностей геометрии карьера и горнотехнических сооружений (отвалов, складов и др.) на процесс формирования аэродинамических процессов в карьере. Например, в работе С.А. Козырева, В.Ф. Скороходова, Р.М. Никитина, П.В. Амосова, В.В. Массана была разработана аэродинамическая модель карьерного пространства в программном комплексе Ansys Fluent для условий карьера Центральный-Глубокий (Кольский полуостров). Отличительной особенностью данной работы от других является то, что авторы при построении модели учли помимо основных глобальных параметров карьера еще и рельефные элементы на прилегающей к карьеру территории (горы, сопки, отвалы и др.).

В результате чего установлено, что учет особенностей рельефа местности и горнотехнических сооружений позволяет более точно осуществить оценку аэродинамических процессов в карьере и выявить объем образующихся зон ре-

циркуляционного движения воздушных масс [15].

Таким образом, из анализа работ, представленных выше, следует, что достоверный прогноз вероятности образования зон рециркуляции с учетом влияния метеорологических параметров атмосферного воздуха обеспечит возможность определения рационального периода для выполнения технологических операций, при которых выделяется значительное количество загрязняющих веществ, и позволит сократить их накопление в зонах рециркуляции. Решение этой задача следует рассматривать в качестве основной цели данной статьи [16].

## **Постановка задачи исследования** Задачей исследования следует счи-

Задачей исследования следует считать:

- оценку состояния воздушной среды, формирующейся во внутрикарьерном пространстве, при естественном способе проветривания с учетом вариативности метеорологических параметров атмосферного воздуха;
- определение объема и вероятности образования застойных зон в зависимости от скорости движения ветрового потока на Земной поверхности;
- разработку метода управления аэродинамическими процессами в карьере и оценку эффективности его применения.

В качестве объекта исследования выбрано золоторудное месторождение, расположенное в Арктической зоне, разрабатываемое открытым способом при максимальной глубине карьера 650—700 м (рис. 1).

Особенность исследований, представленных в данной работе, заключается в установлении влияния вариативности скорости и направления движения воздуха относительно продольной и поперечной оси карьера, а также температуры наружного воздуха на эффективность естественной вентиляции.

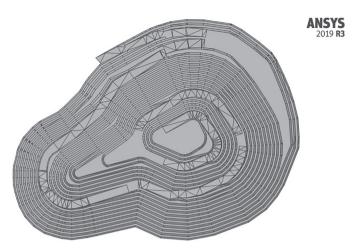


Рис. 1. Завершающий этап разработки месторождения (составлено авторами) Fig. 1. Final mining phase (composed by authors)

В рамках данного исследования использовался современный программный комплекс Ansys Fluent, который позволяет с высокой точностью осуществить оценку состояния воздушной среды в карьере с учетом изменяющихся орографических и метеорологических параметров района расположения месторождения. Результаты математического моделирования позволят определить наиболее благоприятные условия для выполнения технологических операций, что в свою очередь способствует повышению эффективности планирования и ведения добычных работ в карьере [17].

# Выбор исходных данных для моделирования аэротермодинамических процессов

Перед заданием граничных условий и выполнением математического моделирования был осуществлен анализ данных, характеризующих метеорологические условия района расположения золоторудного месторождения. Обработка данных осуществлялась на основе программного комплекса Minitab, набор инструментов которого был использован как для первичной обработки данных

метеорологических наблюдений, так и для их последующей интерпретации. Так, в результате анализа статистических данных, характеризующих средние значения температуры атмосферного воздуха за последние 5 лет (рис. 2), было установлено, что среднемесячный интервал температур наружного воздуха в течение года находится в пределах +/-15 °C (258,15 K/288,15 K) [18].

Аналогичный анализ среднесуточных температур был выполнен для каждого из рассматриваемых месяцев (рис. 3). Из результатов следует, что относительно среднемесячного значения отклонение среднесуточной температуры составляет +/-9 °C (264,15 K/282,15 K).

Таким образом, температура наружного воздуха в районе месторождения постоянно изменяется как в течение месяца, так и в течение суток, оказывая значительное влияние на аэродинамическую обстановку в карьере.

В результате интерпретации статистических данных было установлено, что среднегодовая температура воздуха в объеме карьерного пространства может быть принята соответствующей среднегодовой температуре наружного воздуха, равной –2 °С (271,15 K). Расчетная

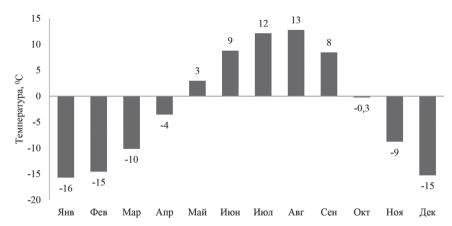


Рис. 2. Динамика изменения среднего значения температуры воздушной среды в районе расположения месторождения (составлено авторами)

Fig. 2. Average air temperature dynamics at location of mineral deposit (composed by authors)

температура набегающего на карьерное пространство ветрового потока должна выбираться с учетом вероятности достижения среднесуточных температур атмосферного воздуха в диапазоне их изменения от 0 °C (273,15 K) до -27 °C (246,15 K) (рис. 4) [19].

Из графика на рис. 4 следует, что с максимальной вероятностью 24% температура атмосферного воздуха будет равна –15 °C (258,15 K).

Анализ среднестатистических данных по направлению (рис. 5) движения воздушного потока показал, что вероят-

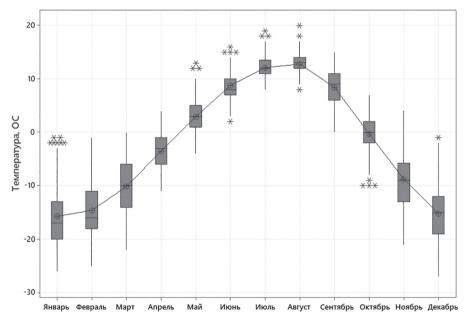


Рис. 3. Разброс значений среднесуточной температуры воздуха относительно среднемесячного значения (составлено авторами)

Fig. 3. Scatter of average daily air temperature as against average monthly layer (composed by authors)

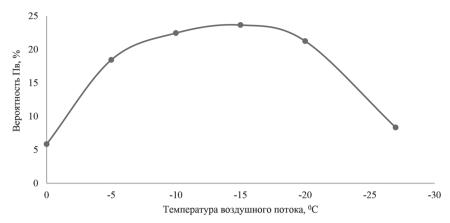


Рис. 4. Вероятность достижения значения температуры воздушной среды в районе расположения месторождения (составлено авторами)

Fig. 4. Probability of air temperature at location of mineral deposit (composed by authors)

ность возникновения ветра северного, восточного и западного направлений составляет 23%, 46% и 27% соответственно. При этом вероятность появления ветра, движущегося в южном направлении, достаточно мала, что дает основание для исключения данного направления из дальнейшего рассмотрения [20, 21].

Анализ скоростей ветрового потока для каждого из направлений (север, запад, восток) показал, что значения изменяются в диапазоне 1–10 м/с. Вероятность достижения соответствующей скорости для каждого из рассматриваемых направлений представлена на рис. 6 (см. Приложение, с. 53).

Из линейного графика следует, что для каждого рассматриваемого направления максимальная доля вероятности, изменяющаяся в диапазоне от 24% до 27%, приходится на скорость движения воздушного потока, равную 3 м/с.

Перед проведением математического моделирования были заданы следующие начальные и граничные условия:



Рис. 5. Вероятность движения воздушного потока в соответствующем направлении в районе расположения месторождения (составлено авторами)

Fig. 5. Probability of air flow direction at location of mineral deposit (composed by authors)

Граничные условия для проведения моделирования (составлено авторами)
Boundary conditions in modeling (composed by authors)

№ п/п	Направление движения потока	Скорость движения, м/с	Температура среды за границами карьера, К	Температура среды внутри границ карьера, К
1	Восток	1	258,15	271,15
2	Восток	3	258,15	271,15
3	Восток	5	258,15	271,15
4	Восток	8	258,15	271,15
5	Восток	10	258,15	271,15
6	Запад	1	258,15	271,15
7	Запад	3	258,15	271,15
8	Запад	5	258,15	271,15
9	Запад	8	258,15	271,15
10	Запад	10	258,15	271,15
11	Север	1	258,15	271,15
12	Север	3	258,15	271,15
13	Север	5	258,15	271,15
14	Север	8	258,15	271,15
15	Север	10	258,15	271,15

• Воздушный поток, поступающий в карьер извне.

Давление приравнено к атмосферному и составляет 0,1 МПа. Направление движения, скорость и температура соответствуют значениям таблицы.

• Воздушная среда, сформировав-шаяся в карьере.

Сформировавшаяся воздушная среда во внутрикарьерном пространстве находится в стационарном состоянии, а давление соответствует атмосферному давлению.

Плотность двух рассматриваемых сред вследствие постоянства их температур принята неизменной.

С целью определения степени влияния скорости и направления воздушного потока на условие формирования аэродинамических процессов в карьере максимальные значения скорости были декомпозированы относительно среднестатистического значения, равного 3 м/с,

по году. Значения исходных данных для моделирования приведены в таблице.

### Результаты математического моделирования

В результате математического моделирования было установлено, что изменение скорости и направления движения воздушного потока на земной поверхности при постоянной температуре приводит к возникновению в карьере различных аэрологических ситуаций.

Так, например, при движении воздушного потока по направлению простирания рудного тела (с восточного направления) со скоростью 1 м/с объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс в карьерном пространстве минимален, при этом застойные зоны в основном сосредоточены в донной части карьера и со стороны подветренного борта (рис. 7, см. Приложение, с. 53). При движении

воздушный поток омывает практически всю поверхность карьера. Вследствие этого скорость воздуха вблизи поверхности рабочих уступов снижается незначительно.

На формирование скоростного поля, кроме геометрии карьера, оказывает влияние температурный градиент. В процессе конвективного теплообмена между двумя средами температура потока воздуха, пересекающего карьерное пространство, повышается по сравнению с температурой воздуха, заполняющего карьерное пространство.

С ростом температуры значение плотности снижается, а скорость движения потока возрастает, что приводит к развитию восходящих потоков, способствующих перемещению воздушных масс в карьере.

В процессе последующего моделирования было установлено, что с увеличением скорости движения воздушного потока по земной поверхности аэрологическая обстановка на рабочих местах в карьере ухудшается (рис. 8, см. Приложение, с. 54). Эффективность естественной вентиляции снижается вследствие уменьшения площади контакта ветрового потока с поверхностью карьера, в результате чего объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс в донной части карьера и со стороны подветренного борта увеличивается в несколько раз по сравнению с предыдущей аэрологической обстановкой (рис. 7). Вследствие этого скорость воздуха вблизи поверхности рабочих уступов значительно снижается, в результате чего образуются застойные зоны, потенциально опасные для накопления загрязняющих и вредных примесей.

Для определения возможностей естественной вентиляции при различных метеорологических условиях в сечении с подветренной стороны карьера на рас-

стоянии 500 м от верхней границы формирования карьерного пространства был детализирован характер распределения скорости воздушного потока по глубине карьера (рис. 9, см. Приложение, с. 54). Выбор данного сечения был осуществлен на основании анализа результатов математического моделирования, согласно которым наибольший процент образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс от общего объема выработанного пространства приходится именно на эту область. Расчеты значений скорости движения воздушного потока внутри границ карьерного пространства были проведены в точках на расстоянии 50 м друг от друга. Исходя из полученных данных, была построена графическая зависимость скорости воздушного потока от глубины карьера (рис. 10, см. Приложение, с. 54).

Из графика на рис. 10 следует, что с увеличением начальной скорости движения воздушного потока по земной поверхности с 1 до 10 м/с эффективность естественной вентиляции снижается, так как глубина, на которой обеспечивается полноценный вынос всего объема загрязняющих веществ за границы карьерного пространства, изменяется в диапазоне от 150 до 230 м. Основываясь на полученных ранее зависимостях, представленных на рис. 5 и 6, можно утверждать, что в сравнении с другими вариантами чаще всего формируется воздушный поток, движущийся в восточном направлении со скоростью 3 м/с.

Таким образом, до глубины карьера, составляющей 185 м, аэрологическая безопасность как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства, будет обеспечиваться за счет движения воздушных масс, формирующихся под действием естественных ветровых потоков. С увеличением глубины эффективность естественной вентиляции начинает значительно снижаться.

Об этом свидетельствуют значения скорости воздушного потока, которые, достигнув максимума, начинают уменьшаться вплоть до уровня донной части карьера. Также следует отметить, что для всех рассмотренных метеорологических условий характерно незначительное увеличение скорости воздушного потока примерно на глубине в 425 м. Данное явление является следствием образования зоны рециркуляционного движения воздушных масс. В результате у поверхности рабочих уступов карьера образуются застойные зоны, в которых скорость движения не превышает 0,3 м/с.

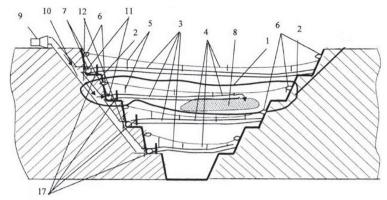
Для повышения эффективности ведения горных работ, безопасности на рабочих местах, а также исключения незапланированных простоев горнотранспортных комплексов, необходимо планировать горные работы на основе прогноза аэрологической ситуации в карьере. Примером такого прогноза может служить полученная на основе результатов математического моделирования (данные таблицы) экспоненциальная зависимость образования объема застойных зон от скорости движения воздушного потока во внутрикарьерном пространстве. В данную зависимость также включен результат дополнительного расчета вероятности возникновения соответствующих аэрологических условий, который основан на произведении вероятности движения воздушного потока в соответствующем направлении и его вероятности движения с соответствующей скоростью.

Из представленной на рис. 11 (см. Приложение, с. 55) зависимости следует, что с увеличение скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, аэрологическая ситуация усугубляется, так как объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс возрастает от 1 до 40% от общего выработанного

пространства. При этом на наиболее сложные аэрологические условия, при которых образуется значительный объем застойных зон на уровне 30 – 40% от общего выработанного пространства, приходится малая доля вероятности. которая составляет всего 1%. Наиболее часто, с вероятностью в 11%, воздушный поток движется в восточном направлении со скоростью 3 м/с, что приводит к образованию застойных зон в карьере, объем которых равен 12% от общего выработанного пространства. Учитывая необходимость обеспечения непрерывного режима работы предприятия, существует 11%-ная вероятность возникновения неблагоприятной для ведения работ аэрологической ситуации, что может привести к снижению производительности труда и незапланированным простоям горнотранспортного оборудования в течение полуторамесячного периода, что скажется на увеличении себестоимости конечного продукта.

Одним из временных превентивных мероприятий по минимизации незапланированных простоев техники может быть распределение оборудования, задействованного на добычных работах, с подветренного борта карьера на наветренный борт до момента возникновения условий, способствующих разрушению зон рециркуляции, прилегающих к рабочим горизонтам подветренной части карьера. Однако данное мероприятие позволяет бороться со следствием, но при этом никак не воздействует на саму причину возникновения застойных зон. Для обеспечения постоянной аэрологической безопасности во всем выработанном пространстве карьера необходима разработка дополнительных инженернотехнических мероприятий.

Примером таких мероприятий может служить способ проветривания глубоких карьеров, который включает в себя вскрытие карьера системой подземных



1 – карьерное пространство; 2 – карьерные уступы; 3 – гибкие трубопроводы; 4 – тросы; 5 – подвижные подвески; 6 – устройства для крепления тросов и перемещения гибких воздуховодов в горизонтальных плоскостях; 7 – трубопроводы для распределения воздуха; 8 – область с отрицательной температурной инверсией; 9 – вентилятор; 10 – наклонный ствол; 11 – сбойки; 12 – перемычки в сбойках; 13 – шиберы на гибких трубопровода

Рис. 12. Вертикальный разрез карьера с трубопроводами для подачи воздуха (составлено авторами) Fig. 12. Profile of open pit with air supply pipelines (composed by authors)

горных выработок и организацию воздухообмена между карьерным и атмосферным воздухом путем подачи свежего воздуха через эти выработки и его последующим распределением по объему карьерного пространства по гибким трубопроводам за счет работы вентиляторов на поверхности. Принципиальная схема предлагаемого решения представлена на рис. 12 [22].

Гибкие трубопроводы подвешиваются на тросах, которые связывают противоположенные нерабочие борта карьера, при этом трубопроводы укрепляются на откосах уступов в горизонтальных плоскостях по глубине карьера. Гибкий трубопровод собирается из отдельных частей, которые прикрепляют друг к другу с помощью молниевых соединений. Перемещение гибкого трубопровода по тросам осуществляют за счет канатов, прикрепляемых к его концу с помощью лебедок, которые устанавливаются на противоположенных бортах карьера в плоскости расположения гибкого трубопровода, соединение с подающим трубопроводом проводится на одном из бортов карьера, который монтируется вдоль образующего сопряжения откоса уступа с рабочей площадкой, и связывает его через сбойки с наклонным стволом, причем адресная подача воздуха в область карьерного пространства с застойной зоной осуществляется с помощью перемычек и шиберов. Таким образом, данный способ после определения проблемных зон позволяет адресно воздействовать на застойную зону и тем самым обеспечивать нормализацию параметров рудничной атмосферы.

Для оценки эффективности предлагаемого решения было выполнено математическое моделирование для метеорологических условий, соответствующих пункту 3 таблицы, при этом в проблемную зону (подветренная и донная часть карьера) по пройденным трубопроводам нагнетался атмосферный воздух со скоростью 5 м/с, температурой 271,15 К и общим расходом воздуха в 60 м³/с. В результате конфигурация поля скоростей в карьерном пространстве значительно изменилась (рис. 13, см. Приложение, с. 55).

При взаимодействии двух воздушных потоков, вызванных движением воз-

духа за счет естественных факторов и принудительной вентиляции через систему трубопроводов, объем зон рециркуляции в карьере значительно сокращается, а средняя скорость воздушного потока внутри границ карьерного пространства возрастает.

Это дает основание говорить об эффективности предлагаемого способа вентиляции карьера.

#### Выводы

- 1. Сравнение результатов математического моделирования показало, что вариативность значений скорости и направления движения воздушных потоков оказывает влияние на эффективность естественной вентиляции внутрикарьерного пространства. Таким образом, согласно рассмотренным результатам моделирования 11% от общего рабочего времени предприятия не обеспечивается полноценный вынос за границы карьерного пространства всего объема загрязняющих атмосферу веществ.
- 2. Прогнозирование аэрологических условий в зависимости от метеорологических условий района расположения месторождения позволит повысить эффективность разработки месторождения за счет более грамотного планирования горных работ, что в свою очередь позволит сократить внеплановые простои на каждом из этапов развития месторождения.
- 3. С увеличением скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, аэрологическая

- ситуация усугубляется, так как объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс относительно общего выработанного пространства возрастает. В результате установлено, что наиболее сложными условиями обеспечения аэрологической безопасности являются периоды, характеризующиеся скоростью движения воздушного потока более 3 м/с, поэтому для нормализации параметров карьерного воздуха необходимо использование дополнительных инженерно-технических мероприятий.
- 4. Для рассматриваемого золоторудного месторождения с учетом вероятности формирования тех или иных метеорологических условий установлено, что до глубины в 185 м чаще всего обеспечивается эффективное проветривание как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства воздушными массами, формирующимися за счет естественных ветровых потоков. С увеличением глубины эффективность естественной вентиляции начинает значительно снижаться, образуются зоны рециркуляционного движения воздушных масс, потенциально опасные для накопления вредных и загрязняющих вешеств.
- 5. Использование принудительной вентиляции через систему трубопроводов приводит к значительному сокращению объема зон рециркуляции. При этом возрастает средняя скорость воздушного потока, установившаяся в карьере, что способствует выносу из карьерного пространства загрязняющих веществ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Никулин А. Н., Должиков И. С., Климова И. В., Смирнов Ю. Г. Оценка результативности и эффективности системы управления охраной труда на горном предприятии // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 1. С. 66 72. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-66-72.
- 2. Rudakov M. L., Babkin R. S., Medova E. A. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations // Applied Sciences. 2021, no, 11, pp. 1-13.

- 3. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2. С. 99—107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
- 4. *Рогалев В. А., Ястребова К. Н.* Методические особенности интенсификации естественного проветривания карьеров // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 131—133.
- 5. Фомин C. И., Базарова E. И. Анализ чувствительности параметров рудных карьеров на предварительной стадии проектирования // Записки Горного института. 2015. Т. 216. C. 76 81.
- 6. Yuan Wang, Cuifeng Du Distribution law of the temperature inversion layer in a deep open-pit mine // ACS Omega. 2021, vol. 6, no. 12, pp. 8693 8699. DOI: 10.1021/acsomega. lc00674.
- 7. *Фомин С. И.* Обоснование технологических решений при организации отработки рудных карьеров // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 644—650. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.644.
- 8. Wang Zhi-Ming, Zhou Wei, Jiskani Izhar Mithal, Ding Xiao-Hua, Liu Zhi-Chao, Qiao Yan-Zhen, Luan Boyu 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. 2021, pp. 1–16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118.
  - 9. *Битколов Н. З.*, *Медведев И. И.* Аэрология карьеров. Недра, 1992. 263 с.
  - 10. Никитин В. С., Битколов Н. З. Проветривание карьеров. Недра, 1975. 248 с.
- 11. Драгунский О. Н. О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 13-21. DOI: 1025018/0236-1493-2019-05-0-13-21.
- 12. Gridina E. B., Andreev R. E. 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. 2017, vol. 10, no. 1, pp. 62—69. DOI: 10.15866/iremos.vl0il.l 1101.
- 13. Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Разработка компьютерной модели аэтермдинамики атмосферы карьера в Ansys Fluent // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). -2018. -898 44. -688 C. -898 121. DOI: -898 101.
- 14. Амосов П. В., Новожилов Н. В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. СВ 56. С. 528 534.
- 15. 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. СВ 56. С. 399 403.
- 16. *Шахрай С. Г.*, *Курчин Г. С.*, *Сорокин А. Г.* Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 654—659. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.
- 17. *Козырев С. А.*, *Амосов П. В.* Моделирование аэродинамических процессов в глубоких карьерах / Глубокие карьеры: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Апатиты, 2012. С. 470 474.
- 18. Li Lin, Zhang Ruixin, Sun Jiandong, He Qian, Kong Lingzhen, Liu Xin Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021, vol. 19, pp .401 414. DOI: 10.1007/s40201-021-00613-0.

- 19. Wang Yuan, Du Cuifeng, Xu Haiyue Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep. Sunken open-pit mine // ACS Omega. 2021, vol. 6, no. 1, pp. 448 455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881.
- 20. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in openpit mines // Applied Ecology and Environmental Research. 2019, vol. 17, no. 5, pp. 10313—10333. DOI: 10.15666/aeer/1705 1031310333.
- 21. Abdulwahid M. A., Kareem H. J., Almudhaffar M. A. Numerical analysis of two phase flow patterns in vertical and horizontal pipes // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2017, vol. 12, pp. 131 140.
- 22. Гендлер С. Г., Лейсле А. В., Борисовский И. А. Патент РФ № 2021111806, 26.04.2021. Способ проветривания глубоких карьеров. 2021. Бюл. № 33. пиль

#### REFERENCES

- 1. Nikulin A. N., Dolzhikov I. N., Klimova I. V., Smirnov Yu. G. Assessment of the effectiveness and efficiency of the occupational health and safety management system at a mining enterprise. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 1, pp. 66 72. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-66-72.
- 2. Rudakov M. L., Babkin R. S., Medova E. A. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations. *Applied Sciences*. 2021, no. 11, pp. 1–13. [In Russ].
- 3. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Aerodynamic control in open pit gold mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 99–107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
- 4. Rogalev V. A., Yastrebova K. N. Methodological features of the intensification of natural ventilation of open pits. *Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 207, pp. 131 133. [In Russ].
- 5. Fomin S. I., Bazarova E. I. Sensitivity analysis of ore open pit parameters at the preliminary design stage. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 216, pp. 76 81. [In Russ].
- 6. Yuan Wang, Cuifeng Du Distribution law of the temperature inversion layer in a deep openpit mine. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 12, pp. 8693 8699. DOI: 10.1021/acsomega.lc00674.
- 7. Fomin S. I. Substantiation of technological solutions in the organization of mining of ore open pits. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 221, pp. 644 650. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.644.
- 8. Wang Zhi-Ming, Zhou Wei, Jiskani Izhar Mithal, Ding Xiao-Hua, Liu Zhi-Chao, Qiao Yan-Zhen, Luan Boyu 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*. 2021, pp. 1–16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118.
- 9. Bitkolov N. Z., Medvedev I. I. *Aerologiya kar'erov* [Aerology of quarries], Nedra, 1992, 263 p.
- 10. Nikitin V. S., Bitkolov N. Z. *Provetrivanie kar'erov* [Ventilation of quarries], Nedra, 1975, 248 p.
- 11. Dragunskiy O. N. Breaking inversions in open pit mines using induced ventilation facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 13 21. [In Russ]. DOI: 1025018/0236-1493-2019-05-0-13-21.
- 12. Gridina E. B., Andreev R. E. 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*. 2017, vol. 10, no. 1, pp. 62 69. [In Russ]. DOI: 10.15866/iremos.vl0il.l 1101.
- 13. Amosov P. V., Kozyrev S. A. and Nazarchuk O. V. Development of a computer model of the atmosphere aetermdynamics of a quarry in Ansys Fluent. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2018, no. 44, pp. 121 125. [In Russ]. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121.

- 14. Amosov P. V., Novozhilov N. V. Investigation of the influence of the temperature gradient on the formation of meteorological fields in the atmosphere of a quarry (based on numerical modeling). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, special edition 56, pp. 528 534. [In Russ].
- 15. Kozyrev S. A., Skorokhodov V. F., Nikitin R. M., Amosov P. V., Massan V. V. 3D computer modeling of the nature of the distribution of air flows on the surface and in the quarry space of deep quarries, taking into account the real terrain and the scale of the quarry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, special edition 56, pp. 399 403. [In Russ].
- 16. Shakhrai S. G., Kurchin G. S., Sorokin A. G. New technical solutions for ventilation of deep quarries. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 654–659. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.
- 17. Kozyrev S. A., Amosov P. V. Modeling of aerodynamic processes in deep quarries. *Glubokie kar'ery: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarod-nym uchastiem* [Deep careers: a collection of reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation], Apatity, 2012, pp. 470 474. [In Russ].
- 18. Li Lin, Zhang Ruixin, Sun Jiandong, He Qian, Kong Lingzhen, Liu Xin Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2021, vol. 19, pp .401 414. DOI: 10.1007/s40201-021-00613-0.
- 19. Wang Yuan, Du Cuifeng, Xu Haiyue Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep. Sunken open-pit mine. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 1, pp. 448 455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881.
- 20. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019, vol. 17, no. 5, pp. 10313 10333. DOI: 10.15666/aeer/1705 1031310333.
- 21. Abdulwahid M. A., Kareem H. J., Almudhaffar M. A. Numerical analysis of two phase flow patterns in vertical and horizontal pipes. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. 2017, vol. 12, pp. 131 140.
  - 22. Gendler S. G., Leisle A. V., Borisovsky I. A. Patent RU 2021111806, 26.04.2021. [In Russ].

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гендлер Семен Григорьевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: sgendler@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7721-7246, Борисовский Иван Анатольевич<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: s195058@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-8560-5863, <sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет. Для контактов: Гендлер С.Г., e-mail: sgendler@mail.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.G. Gendler<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: sgendler@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7721-7246, I.A. Borisovsky<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: s195058@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-8560-5863, 1 Spirit Potenthura Mining University 100

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia. **Corresponding author**: S.G. Gendler, e-mail: sqendler@mail.ru.

Получена редакцией 04.04.2022; получена после рецензии 14.06.2022; принята к печати 10.07.2022. Received by the editors 04.04.2022; received after the review 14.06.2022; accepted for printing 10.07.2022.

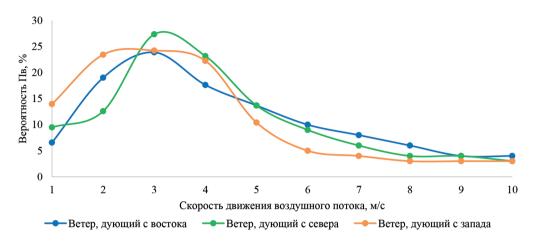


Рис. 6. Вероятность достижения скорости движения воздушного потока по соответствующему направлению в районе расположения месторождения (составлено авторами)



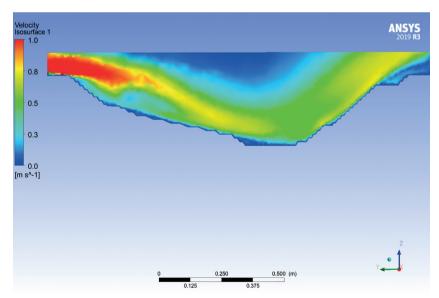


Рис. 7. Скоростное поле при движении потока по простиранию рудного тела со скоростью 1 м/с. Результат соответствует условию 1 из таблицы (составлено авторами)

Fig. 7. Velocity field in air flow across ore body strike at velocity of 1 m/s. The result fits condition 1 from Table (composed by authors)

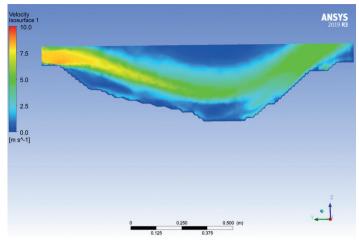


Рис. 8. Скоростное поле при движении потока по простиранию рудного тела со скоростью 10 м/с. Результат соответствует условию 5 из таблицы (составлено авторами)

Fig. 8. Velocity field in air flow along ore body strike at velocity of 10 m/s. The result fits condition 5 from Table (composed by authors)

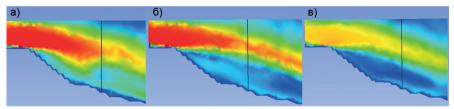
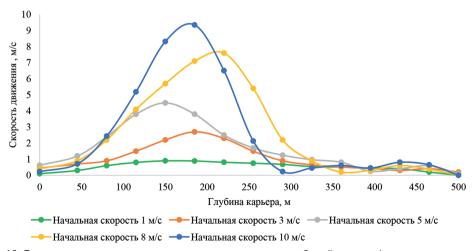


Рис. 9. Выполненное сечение с подветренной стороны карьера для аэродинамических картин с заданными метеорологическими условиями для воздушного потока, движущегося по земной поверхности, начальная скорость: 1 м/c (a); 5 м/c (b); 10 м/c (b) (составлено авторами)

Fig. 9. Profile of open pit downwind side for aerodynamic patterns with assigned meteorological conditions for ground air flow, initial velocity of: 1 m/s (a); 5 m/s (b); 10 m/s (v) (composed by authors)



Puc. 10. Величина изменения скорости воздушного потока с глубиной карьера (составлено авторами) Fig. 10. Change in air flow velocity with open pit depth (composed by authors)

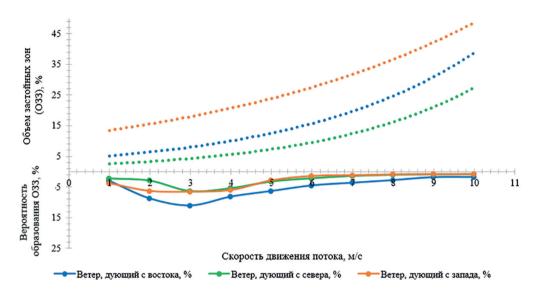


Рис. 11. Объем застойных зон, образующихся в карьерном пространстве, в зависимости от скорости ветрового потока, вероятность равенства которой определяется направлением ветра, и вероятности соответствующих аэрологических условий при движении воздуха с определенной скоростью и в определенном направлении (составлено авторами)

Fig. 11. Volume of dead-air spaces in open pit void as function of wind velocity, with equality probability governed by wind direction, and probability of corresponding air conditions at air flow at certain velocity and in certain direction (composed by authors)

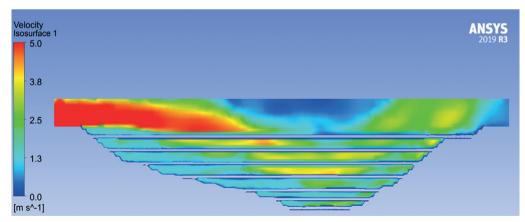


Рис. 13. Скоростное поле при условии совместного действия естественной и принудительной вентиляции в карьере (составлено авторами)

Fig. 13. Velocity field in case of joint effect of natural and forced ventilation in open pit mine (composed by authors)