

Аэродинамические процессы в устье воздухоподающего ствола при нагнетательном способе вентиляции шахт

А. С. Морин, С. С. Сапожников, О. С. Игнатова[✉],
И. С. Плотников, В. Т. Чесноков

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ ignatova.ol@mail.ru

Резюме. Приведена краткая характеристика проблемы борьбы с поверхностными утечками воздуха при искусственном проветривании подземных горнодобывающих предприятий. Рассмотрены аэродинамические процессы в устье вертикального воздухоподающего ствола при нагнетательном способе общеобменной вентиляции горных выработок. Исследованы особенности аэродинамических процессов в устье ствола при заданных режимах работы главного вентилятора с использованием методов физического и численного моделирования. При физическом моделировании аэродинамических процессов была выявлена обратно пропорциональная зависимость доли непродуктивных затрат энергии вентилятора, связанных с поверхностными утечками воздуха, от скорости воздушной струи, исходящей из вентиляционного окна. При численном моделировании аэродинамических процессов с использованием универсального программного обеспечения ANSYS Fluent были установлены закономерности изменения геометрических и кинематических параметров вихревых зон и зон организованного движения в устье ствола в зависимости от скорости истечения воздуха из вентиляционного окна под углом 45°, что позволило соответствующим образом интерпретировать результаты измерений статического давления воздуха на модели ствола. На основании проведенных исследований предложен новый способ снижения поверхностных утечек воздуха при искусственном проветривании шахт нагнетательным способом с помощью направляющих пластин.

Ключевые слова: подземные горные выработки, устье шахтного ствола, вентиляционное окно, нагнетательный способ проветривания, поверхностные утечки воздуха, поля статического давления, скорость потока, направляющие пластины, численное моделирование

Для цитирования: Морин А.С., Сапожников С.С., Игнатова О.С., Плотников И.С., Чесноков В.Т. Аэродинамические процессы в устье воздухоподающего ствола при нагнетательном способе вентиляции шахт. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026;26(1):35-40. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-35-40>.

Investigation of aerodynamic processes at the mouth of a mine air supply shaft

A. S. Morin, S. S. Sapozhnikov, O. S. Ignatova[✉], I. S. Plotnikov, V. T. Chesnokov
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ ignatova.ol@mail.ru

Rezume. A brief description of the problem of combating surface air leaks during artificial ventilation of underground mining enterprises is given. The aerodynamic processes in the mouth of a vertical air supply shaft during the injection method of general exchange ventilation of mine workings are considered. The features of aerodynamic processes at the mouth of the trunk are investigated under the specified operating modes of the main fan using physical and numerical modeling methods. During the physical modeling of aerodynamic processes, an inversely proportional dependence of the proportion of unproductive fan energy costs associated with surface air leaks on the velocity of the air jet emanating from the ventilation window was revealed. When numerically modeling aerodynamic processes using the universal ANSYS Fluent software, patterns of changes in the geometric and kinematic parameters of vortex zones and zones of organized movement at the mouth of the trunk were established depending on the velocity of air outflow from the ventilation window at an angle of 45°, which made it possible to appropriately interpret the results of measurements of static air pressure on the trunk model. Based on the results of the conducted research, a new method has been proposed to reduce surface air leaks during artificial ventilation of mines by injection method using guide plates.

Keywords: Underground mining workings, mine shaft entrance, ventilation window, injection ventilation technique, surface air leakage, static pressure field, flow velocity, guide plates, numerical simulation

For citation: Morin A.S., Sapozhnikov S.S., Ignatova O.S., Plotnikov I.S., Chesnokov V.T. Investigation of aerodynamic processes at the mouth of a mine air supply shaft. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026;26(1):35-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-35-40>.

Введение

При искусственном общеобменном проветривании подземных горных выработок всасывающим или нагнетательным способом на входе или выходе из вентиляционного окна в шахтном стволе формируются два противоположно направленных воздушных потока, один из которых связывает главный вентилятор с объектом проветривания (ВГП), а второй является холостым, его расход относят к поверхностным утечкам [1–6].

Данная статья содержит результаты исследования, выполненного сотрудниками Сибирского федерального университета с целью определения геометрических и кинематических параметров вихревых и застойных зон и зон организованного движения воздуха в устье ствола и выявления закономерностей их влияния друг на друга для обоснования рациональных методов и средств снижения поверхностных утечек воздуха.

Снижение утечек воздуха через устье ствола, фактическая доля которых может достигать от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ производительности ВГП [4], является актуальной научно-технической задачей в области подземной добычи полезных ископаемых, решение которой позволяет поддерживать относительно комфортные условия труда в горных выработках при снижении удельных затрат энергии на их искусственное проветривание.

Цель работы: исследование аэродинамических процессов в устье воздухоподающего ствола при нагнетательном способе вентиляции шахт.

Методы исследований

При нагнетательном способе вентиляции существенное влияние на величину Q_y оказывают силы давления и инерционные силы, действующие в зоне разделения воздушной струи, исходящей из вентиляционного окна 3 (рис. 1) на восходящую и нисходящую ветви [8–15].

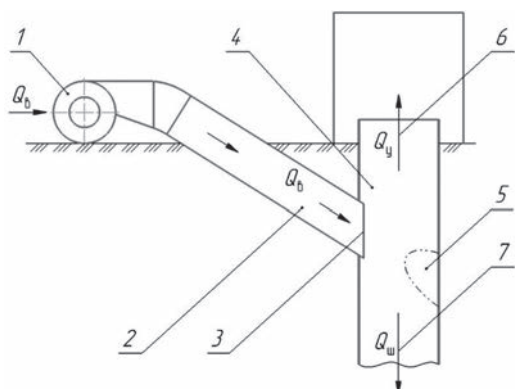


Рис. 1. Аэродинамические связи вентилятора с внешней и рудничной атмосферой при нагнетательном способе вентиляции: 1 – вентилятор; 2 – вентиляционный канал; 3 – вентиляционное окно; 4 – воздухоподающий ствол; 5 – участок разделения воздушной струи; 6 – восходящий воздушный поток; 7 – нисходящий воздушный поток / **Fig. 1.** Aerodynamic connections of the fan with the external and mine atmosphere during the injection ventilation method: 1 – fan; 2 – ventilation duct; 3 – ventilation window; 4 – air supply shaft; 5 – air jet separation section; 6 – ascending airflow; 7 – descending airflow

Объект и методы исследований

В качестве объекта исследований был выбран вертикальный ствол, натурные параметры которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Натурные параметры шахтной вентиляционной системы [16] / Full-scale parameters of the shaft ventilation system [16]

Параметр	Значение
Длина верхнего участка вертикального ствола, м	111,5
Внутренний диаметр ствола, м	8
Угол наклона вентиляционного канала, град	45
Длина вентиляционного канала, м	9,3
Ширина вентиляционного окна, м	4
Высота вентиляционного окна, м	5
Производительность вентилятора, м³/с	75÷325
Средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне, м/с	3,75÷16,25

Использование математических методов анализа аэродинамических процессов в устье ствола связано со значительными трудностями и приводит к значительной погрешности в связи с большим количеством влияющих факторов. Поэтому для изучения аэродинамических связей вентилятора главного проветривания с внешней и рудничной атмосферой при нагнетательном способе общеобменной вентиляции применялись методы физического и численного моделирования с использованием универсального программного обеспечения ANSYS Fluent.

В связи с этим для обеспечения нормативного воздухообмена шахты с внешней средой $Q_{ш}$ требуемую производительность вентилятора главного проветривания (ВГП) Q_b принято повышать на величину поверхностных (внешних) утечек воздуха Q_y [6, 7]:

$$Q_b = k_y Q_{ш}, \quad (1)$$

где $k_y = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент поверхностных утечек воздуха.

Результаты исследований и их обсуждение

На начальном этапе исследований была использована физическая модель шахтной вентиляционной системы (рис. 2).

Коэффициент пропорциональности M_L линейных размеров натурального объекта и модели был принят равным 77:1.

В качестве критерия подобия натуральных и модельных процессов был выбран критерий Фруда Fr , что обеспечило пропорциональность действия сил тяжести и инерции [17, 18]:

$$u_n^2 / (g \cdot D_n) = Fr_n = Fr_m = u_m^2 / (g \cdot D_m), \quad (2)$$

где индексы «н» и «м» относятся соответственно к натурным и модельным параметрам; u – средняя скорость воздушного потока на выходе из вентиляционного окна, м/с; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения; D – линейный размер вентиляционного окна, м.

Таблица 2 / Table 2

Модельные параметры шахтной вентиляционной системы /
Model parameters of the shaft ventilation system

Параметр	Значение
Длина верхнего участка вертикального ствола, м	1,45
Внутренний диаметр ствола, м	0,104
Угол наклона вентиляционного канала, град	45
Длина вентиляционного канала, м	0,12
Ширина вентиляционного окна, м	0,053
Высота вентиляционного окна, м	0,067
Производительность вентилятора, м³/с	0,001÷0,006
Средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне, м/с	0,43÷1,85

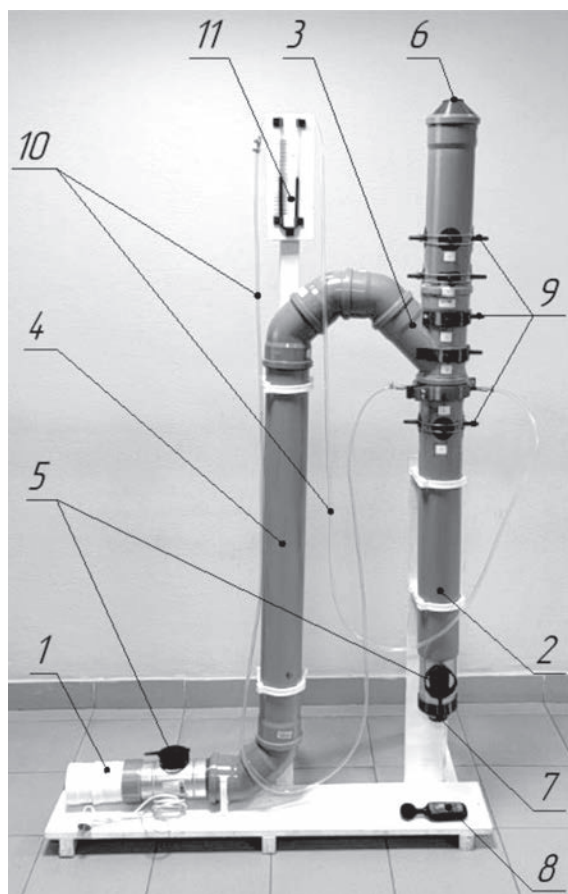


Рис. 2. Физическая модель шахтной вентиляционной системы:

- 1 – двухступенчатый осевой вентилятор; 2 – вертикальный ствол;
3 – вентиляционный канал; 4 – промежуточный воздуховод;
5 – поворотные шиберы; 6 – верхнее выпускное отверстие;
7 – нижнее выпускное отверстие; 8 – переносной анемометр;
9 – патрубки с наружной резьбой; 10 – присоединительные шланги;
11 – U-образный водяной пьезометр /

Fig. 2. Physical model of the shaft ventilation system: 1 – two-stage axial fan;
2 – vertical shaft; 3 – ventilation duct; 4 – intermediate duct; 5 – rotary gates;
6 – upper outlet; 7 – lower outlet; 8 – portable anemometer; 9 – pipes with external
thread; 10 – connecting hoses; 11 – U-shaped water piezometer

Для изучения особенностей влияния воздушной струи, поступающей из вентиляционного окна, на формирование поверхностных утечек в устье ствола при заданных параметрах вентиляционной системы (табл. 2) была проведена серия опытов, где скорость струи u_m изменялась от 0,427 до 1,852 м/с с шагом 0,285 м/с. Величину u_m контролировали с помощью переносного анемометра ADA AeroTemp 30, присоединяемого к верхнему 6 и нижнему 7 выпускным отверстиям модели.

Фактический коэффициент поверхностных утечек воздуха рассчитывали по формуле

$$k_y = 1 + Q_y / Q_{\text{ш}} \quad (3)$$

Постепенное увеличение скорости потока u , а также расходов Q_y , Q_y и $Q_{\text{ш}}$ вызывало снижение величины отношения $Q_y / Q_{\text{ш}}$ и коэффициента k_y (рис. 3). Следствием этого стало постепенное уменьшение доли непродуктивных затрат энергии ВГП, связанных с поверхностными утечками воздуха. Очевидно, что этот факт объясняется усиливающимся действием сил инерции воздушной струи, исходящей из вентиляционного окна.

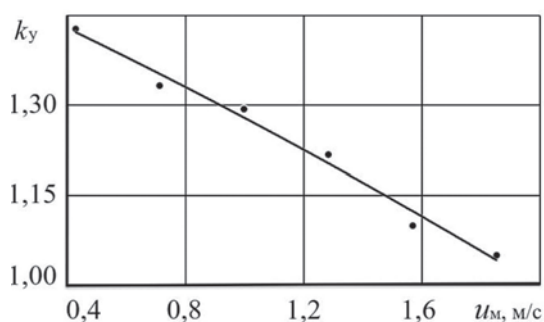


Рис. 3. График зависимости коэффициента поверхностных утечек в устье ствола k_y от скорости подачи воздуха из вентиляционного окна u_m /
Fig. 3. Graph of the dependence of the coefficient of surface leaks at the mouth of the trunk k_y on the air supply rate from the ventilation window u_m

Наличие многочисленных отверстий в стенке модели ствола, снабженных герметичными затворами, позволило периодически измерять статическое давление воздуха в соответствующих точках с помощью U-образного жидкостного пьезометра. На основании полученных данных были составлены карты полей статического давления воздуха вблизи верхней концевой части стенки ствола, которые фактически дали представление о размерах участка разделения воздушного потока, исходящего из вентиляционного окна, на две ветви (поз. 6 и 7 на рис. 1) и об относительной величине скорости восходящих и нисходящих воздушных потоков.

Измерения статического давления воздуха, выполненные на стенке ствола, показали, что при скорости истечения воздушной струи из вентиляционного окна модели $u_m = 0,427 \div 0,712$ м/с зона с наиболее низким статическим давлением воздуха находилась над вентиляционным окном.

При $u_m = 0,997 \div 1,282$ м/с эта зона оказывалась смещенной в сторону участка разделения струи при весьма неравномерном распределении статического давления по площади стенки концевой части ствола.

При $u_m = 1,567 \div 1,852$ м/с зона максимального разрежения по-прежнему находилась на границах примыкания струи к стенке ствола, а распределение статического давления воздуха на остальной площади стенки ствола выравнивалось.

Для интерпретации результатов измерений статического давления воздуха на физической модели ствола было выполнено численное моделирование объекта исследования с применением универсального программного обеспечения ANSYS Fluent (рис. 4–6) (см. цв. вклейку на стр. 34).

В качестве основного фактора по-прежнему использова-

лась величина скорости (скоростного давления) воздушной струи, поступающей из вентиляционного окна.

При скорости $u_m = 0,427 \pm 0,712$ м/с на границах струи, исходящей из вентиляционного окна, сформировались два инерционных вихря (поз. 1 и 2 на рис. 4). Один из этих вихрей раскручивался восходящим воздушным потоком, а второй, более крупный – нисходящим потоком. Разность статических давлений в вихрях и струе приводила к естественному перетoku воздуха из вихрей в струю, что вызывало повышение ее расхода и более быстрое затухание скорости, в основном из-за расширения струи. Наиболее интенсивная эжекция воздуха из верхнего вихря внутрь струи регистрировалась на выходе струи из вентиляционного окна. В нижнем вихре максимальная интенсивность эжекции приходилась на средний участок струи. Наиболее высокая скорость восходящего движения воздуха была зарегистрирована на ограниченном участке верхнего сечения ствола на линиях длинного тока. В этом случае вихри оказывали значительное воздействие на оба организованных потока, ограничивая их живое сечение.

Увеличение u_m от 0,997 до 1,282 м/с вызывало уменьшение размеров нижнего и верхнего вихрей вследствие возрастающего действия сил статического разрежения в струе, поступающей из вентиляционного окна (рис. 5). Максимальная скорость восходящего движения воздуха была зарегистрирована на более обширном участке верхнего сечения ствола на линиях длинного тока.

При повышении скорости u_m с 1,567 до 1,852 м/с (рис. 6) на выходе струи из вентиляционного окна в ее нижней части сформировалась заметная застойная зона. Продолжилось уменьшение размера нижнего вихря, а верхний вихрь, изначально обладавший меньшими геометрическими размерами, был целиком втянут в воздушную струю, поступающую в ствол из вентиляционного окна. Вследствие этого значения скорости восходящего движения воздуха на выходе из ствола распределились по сечению наиболее равномерно.

Представленный на компьютерной модели механизм формирования восходящего потока раскрыл степень влияния инерционных вихрей на величину поверхностных утечек воздуха. Направление вращения и угловая скорость вихрей, а также их размер в основном зависят от величин

и направления действия сил инерции и статического давления, на которые, в свою очередь, определяющее влияние оказывают температурный режим и диаметр ствола, скорость и угол наклона воздушной струи, поступающей из вентиляционного окна.

С учетом выявленных закономерностей аэродинамических процессов при нагнетательном способе общеобменной вентиляции подземных горных выработок несомненный интерес представляет проверка эффективности использования в воздухоподающих стволах направляющих пластин для снижения поверхностных утечек за счет преобразования сил инерции и статического давления, формирующих восходящий и нисходящий потоки воздуха.

Заключение

1. При организации общеобменного проветривания подземных горных выработок нагнетательным способом поверхностные утечки в устье вертикального ствола формируются на фоне вихревого движения воздуха на свободных границах воздушной струи, подаваемой через вентиляционное окно со скоростью u . Эти вихри оказывают существенное влияние на организованное движение воздуха в стволе. Направление вращения и угловая скорость вихрей, а также их размер в основном зависят от величины и направления действия сил инерции и давления.

2. Рост скоростного разрежения в воздушной струе, вызванный увеличением ее скорости u , приводит к уменьшению размера инерционных вихрей вследствие прижимающего воздействия струи и эжекции воздуха.

3. При увеличении скорости u воздушной струи на выходе из вентиляционного окна снижается коэффициент поверхностных утечек в устье ствола k_y , что связано с уменьшением зон вихревого движения воздуха и усилением сил инерции воздушной струи.

4. Для снижения поверхностных утечек воздуха в устье шахтного ствола при нагнетательном способе общеобменной вентиляции целесообразно применение направляющих пластин, размещаемых на стенке ствола с целью преобразования инерционных сил и сил статического давления, действующих в зоне течения воздушной струи, подаваемой через вентиляционное окно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ушаков В.К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015; 4: 240-248.
Ushakov V.K. The problem of reliability and efficiency of mine ventilation systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015; 4: 240-248. (In Russ.).
2. Алыменко Н.И., Минин В.В., Папулов Л.М. Снижение внешних утечек воздуха на рудниках и шахтах. *Горный журнал*. 1994; 6: 46-47.
Alymenko N.I., Min V.V., Papulov L.M. Reduction of external air leaks in mines and mines. *Mining magazine*. 1994; 6: 46-47. (In Russ.).
3. Абрамов Ф.А. Аэродинамическое сопротивление горных выработок. Москва, 1964: 186.
Abramov F.A. Aerodynamic resistance of mine workings. Moscow, 1964: 186 p. (In Russ.).
4. Камenskikh А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2011: 143.
Kamenskikh A.A. Development of methods for controlling and reducing surface air leaks in mines: dissertation candidate technical sciences. Perm, 2011: 143. (In Russ.).
5. Русский Е.Ю. Повышение эффективности работы эксплуатируемых вентиляторов главного проветривания шахт и метрополитенов: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2022: 370.
Russkiy E.Y. Improving the efficiency of the operated fans of the main ventilation of mines and subways: dissertation Ph.D technical sciences. Novosibirsk, 2022: 370. (In Russ.).
6. Гришко А.П. Стационарные машины. Т. 2: Рудничные водоотливные, вентиляторные и пневматические установки: учебник для вузов. Москва, 2007: 586.
Grishko A.P. Stationary machines. Vol. 2: Mine drainage, fan and pneumatic installations: textbook for universities. Moscow, 2007: 586. (In Russ.).

7. Алыменко Н.И. Вентиляторные установки и их применение. Екатеринбург, 1999: 224.
Alymenko N.I. Fan installations and their application. Yekaterinburg, 1999: 224. (In Russ.).
8. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А. и др. Аэрология горных предприятий. Москва, 1987: 421.
Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., et al. Aerology of mining enterprises. Moscow, 1987: 421. (In Russ.).
9. Huang X., Liu Y. Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2022; 17: 1232-1238. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac104>.
10. Hou J., Nie G., Li G., et al. Optimization of Branch Airflow Volume for Mine Ventilation Network Based on Sensitivity Matrix. *Sustainability*. 2023; 15: 12427. <https://doi.org/10.3390/su151612427>.
11. Yi H., Kim M., Lee D., et al. Applications of Computational Fluid Dynamics for Mine Ventilation in Mineral Development. *Energies*. 2022; 15: 8405. <https://doi.org/10.3390/en15228405>.
12. Chen Y., Li Z., Liu X., et al. Research on Intelligent Ventilation System of Metal Mine Based on Real-Time Sensing Airflow Parameters with a Global Scheme. *Applies sciences*. 2024; 14: 7602. <https://doi.org/10.3390/app14177602>.
13. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. Управление аэрологическими рисками угольных шахт на основе статистических данных системы аэрогазового контроля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 1: 78-89. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89>.
Skopintseva O.V., Balovtsev S.V. Management of aerological risks of coal mines based on statistical data of the aerogas control system. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2021; 1: 78-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89>.
14. Ушаков В.К. Анализ затрат на создание и эксплуатацию шахтных вентиляционных систем с целью повышения безопасности труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; 6: 214-221.
Ushakov V.K. Cost analysis for the creation and operation of mine ventilation systems in order to improve occupational safety. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018; 6: 214-221. (In Russ.).
15. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. *Горный журнал*. 2019; 4: 85-89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.04.19>.
Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Improving the level of energy efficiency and safety of the coal mine excavation site. *Mining Journal*. 2019; 4: 85-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.04.19>.
16. Морин А.С., Сапожников С.С., Анушенков А.Н. и др. Обоснование энергосберегающих методов и средств снижения утечек воздуха через устье шахтного ствола. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024; 29: 126-135. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-126-135>.
Morin A.S., Sapozhnikov S.S., Anushenkov A.N., et al. Substantiation of energy-saving methods and means of reducing air leaks through the mouth of a mine shaft. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 29: 126-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-126-135>.
17. Сапожников С.С. Изучение полей давления в приустьевой зоне шахтного ствола на физической модели. *Перспектив Свободный*. Красноярск, 2024: 352-355.
Sapozhnikov S.S. The study of pressure fields in the estuary zone of a mine shaft on a physical model. *Prospect Svobodny*. Krasnoyarsk, 2024: 352-355. (In Russ.).
18. Морин А.С. Обоснование технологии трубопроводного проветривания глубоких карьеров: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2011: 211.
Morin A. S. Substantiation of the technology of pipeline ventilation of deep quarries: dissertation Ph.D technical sciences. Krasnoyarsk, 2011: 211. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Степанович Морин –

д-р техн. наук, заведующий кафедрой горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Сергей Сергеевич Сапожников –

аспирант кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Ольга Сергеевна Игнатова –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Иван Сергеевич Плотников –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Andrey S. Morin –

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Sergey S. Sapozhnikov –

Postgraduate Student of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Olga S. Ignatova –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Ivan S. Plotnikov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Валерий Тимофеевич Чесноков –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства:

А. С. Морин – научный менеджмент, постановка исследовательских задач, разработка идеи, обоснование метода моделирования, внесение правок, анализ полученных данных, составление плана статьи; С. С. Сапожников – обзор литературных источников, обоснование исходных данных, расчет параметров моделирования, проведение исследований, анализ полученных данных, составление плана статьи; О. С. Игнатова – расчет параметров моделирования, проведение исследований, анализ полученных данных, работа с редакцией; И. С. Плотников – расчет параметров моделирования, проведение исследований, анализ полученных данных; В. Т. Чесноков – обзор литературных источников, обоснование исходных данных, расчет параметров моделирования, проведение исследований, анализ полученных данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.12.2025

Поступила после рецензирования: 27.01.2026

Принята к публикации: 06.02.2026

Valery T. Chesnokov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Contribution:

A. S. Morin – scientific management, setting research objectives, developing an idea, justifying a modeling method, editing, analyzing the obtained data, drawing up an article plan; S. S. Sapozhnikov – reviewing literature sources, justifying initial data, calculating modeling parameters, conducting research, analyzing data obtained, drafting article plan; O. S. Ignatova – calculating modeling parameters, conducting research, analyzing obtained data, working with editorial staff; I. S. Plotnikov – calculating modeling parameters, carrying out research, analyzing data; V. T. Chesnokov – reviewing literature, justifying initial data, calculating parameters, researching, analyzing data acquired. All the authors have reviewed and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Received: 10.12.2025

Revised: 27.01.2026

Accepted: 06.02.2026