

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ СТАВ С РАЗРЫВОМ

Гендлер С.Г., Стомма А.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: проветривание тупиковых выработок, местная вентиляция, подземные горные работы, способы проветривания, рециркуляция, эффективность проветривания, вентиляция, депрессия.

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы проветривания протяженных тупиковых выработок на шахтах и рудниках. Основное внимание уделяется рассредоточенному расположению вентиляторов местного проветривания как наиболее эффективному способу обеспечения подачи необходимого объема воздуха в забой. Описывается нагнетательный способ проветривания с каскадной рассредоточенной установкой вентиляторов и использованием разрыва вентиляционного става, который позволяет минимизировать зоны вакуумметрического давления. Важным аспектом является правильный подбор мощности вентиляторов местного проветривания с учетом аэродинамического сопротивления воздухопроводов и конфигурации их сопряжений. Приведен расчет, позволяющий определить требуемое количество воздуха при проветривании протяженных тупиковых выработок при использовании схемы проветривания с разрывом. Исследование позволило определить оптимальные параметры воздухопроводов и вывести расчетную формулу, которая позволяет определить количество воздуха, которое необходимо подавать при рециркуляции.

METHODOLOGY FOR SELECTING PARAMETERS OF A VENTILATION SCHEME FOR AN EXTENDED BLIND DRIFT USING A VENTILATION PIPE WITH A GAP

Gendler S.G., Stomma A.A.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: ventilation of blind drifts, local ventilation, underground mining, ventilation methods, recirculation, ventilation efficiency, ventilation, depression.

Abstract. The article discusses modern methods of ventilation of long dead-end workings in mines and quarries. The main attention is paid to the dispersed arrangement of local ventilation fans as the most effective way to ensure the supply of the required volume of air to the face. The authors describe a forced ventilation method with a cascade dispersed installation of fans and the use of a gap in the ventilation stack, which allows minimizing the vacuum pressure zones. An important aspect is the correct selection of the local ventilation fans power taking into account the aerodynamic resistance of the air ducts and the configuration of their connections. The authors made a calculation to determine the required amount of air when ventilating long blind drift using a ventilation scheme with a gap. The study made it possible to determine the optimal parameters of the air ducts and determine the calculation formula that allows determining the amount of air that must be supplied during recirculation.

Введение

Забои в период проведения горных выработок образуют тупики, которые нельзя проветрить вентиляторами главного проветривания. Для обеспечения необходимой вентиляции в тупиковых забоях используются вентиляторы местного проветривания (ВМП). В зависимости от источника и способа проветривания, а также от числа и взаимного расположения тупиковых выработок, существуют различные схемы проветривания. На практике применяют нагнетательный, всасывающий и комбинацию этих двух способов проветривания. Так же возможно применять проветривание из смежных выработок. Эти схемы принимаются на весь период проведения выработки и должны обеспечивать безопасность ведения горных работ, поддерживая допустимые концентрации вредных, взрывоопасных и радиоактивных газов в любой точке выработки, проветривание в штатных и аварийных ситуациях для повышения уровня безопасности [1-3]. Также они должны обеспечивать легкость управления режимами.

Для снижения риска аварийных ситуаций [4] проветривание подготовительных выработок на шахтах осуществляется согласно действующему нормативному документу: «Руководство по вентиляции угольных шахт», а также Приказу Ростехнадзора от 08.12.2020 N 507 (ред. от 23.06.2022) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах».

На шахтах и рудниках используют следующие способы проветривания [5-7].

1. Проветривания тупиковой выработки большой длины одним вентилятором с помощью двух параллельных трубопроводов.
2. Проветривания тупиковой выработки большой длины одним вентилятором с помощью трубопровода большого диаметра.
3. Проветривания тупиковой выработки большой протяженности при каскадном расположении вентиляторов.
4. Проветривания тупиковых выработок большой протяженности вентиляторами, установленными в шлюзовых камерах (рис. 1).
5. Нагнетательный способ проветривания с каскадной рассредоточенной установкой вентиляторов по длине воздуховода. Данный способ является более предпочтительным, так как общая депрессия трубопровода снижается за счет рассредоточенной установки ВМП [8-10] (рис. 2).

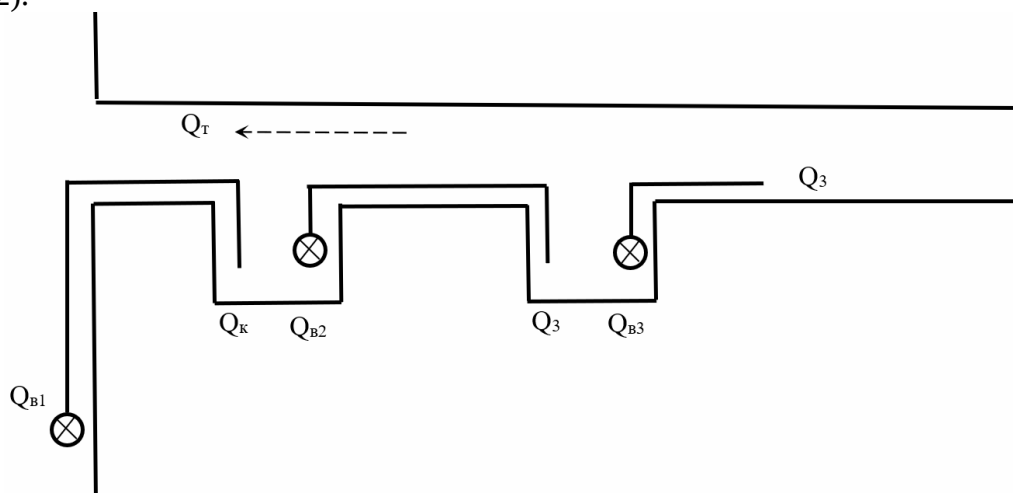


Рис. 1. Схема проветривания вентиляторами, установленными в шлюзовых камерах

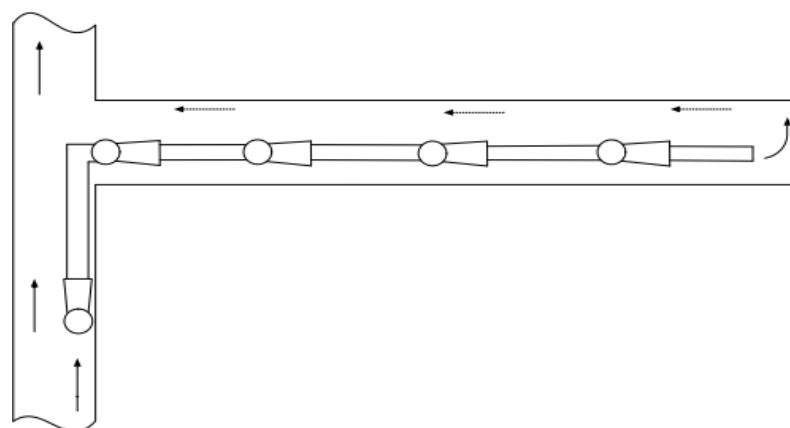


Рис. 2. Схема проветривания с каскадной рассредоточенной установкой вентиляторов по длине воздуховода

Основная часть

Рассмотрим эпюры полного давления при каскадной рассредоточенной установке вентиляторов по длине воздуховода (рис. 3). Как видим, при таком расположении вентиляторов перед вторым в последовательности ВМП, а также и перед последующими с высокой вероятностью при неверном подборе параметров образуется зона

The diagram illustrates the flow of air through a Venturi tube. The top part shows the tube with two sections: a wider inlet section and a narrower throat section. Arrows indicate the direction of air flow from left to right, labeled "движ. воздуха". The inlet and throat sections are marked with "ВМГ". Below the tube, a pressure distribution graph is shown. The vertical axis is labeled $P_{атм}$. The graph consists of two trapezoidal areas representing pressure distribution. The first area, corresponding to the inlet section, shows a linear decrease in pressure from a high value on the left to a lower value on the right. The second area, corresponding to the throat section, shows a linear increase in pressure from a low value on the left to a higher value on the right. The pressure at the throat is lower than the pressure at the inlet.

Для решения задачи проветривания протяженных тупиковых выработок предлагается использовать каскадное расположение воздухопроводов и ВМП. Используется нагнетательный способ подачи воздуха на участок воздуховода [14-16]. Мощность ВМП подбирается из расчёта необходимого расхода воздуха с учётом преодоления аэродинамического сопротивления участка воздуховода. Перед следующим участком трубопровода оставляется разрыв. Разрывы позволяют избежать создание зон вакуумметрического давления. При этом нужно выбрать параметры воздухопроводов, конфигурации сопряжений с учётом расхода воздуха создаваемого вентиляторами местного проветривания так, чтобы происходило минимальное примешивания загрязненного воздуха, оттекающего из забоя, с последующей рециркуляцией в призабойное пространство.

The diagram illustrates the flow of a gas turbine engine. It shows a horizontal duct with three main sections. The first section on the left is labeled with D_0 and η_1 . The middle section is labeled with D_{vx} and η_2 . The right section is labeled with Q_3 . Above the duct, there are labels for Q_{3T} , $\Delta C_r = I/Q_3$, and $\Delta Q_{cb} = \Delta Q_{3arp}$. A dashed arrow points from Q_1 to Q_1^1 , with a label $C_1 = C_{3arp}$. A solid arrow points from Q_1 to Q_1^1 , with a label L_{tp} . A dashed arrow points from Q_1^1 to Q_3 , with a label $C_1 = C_{3arp}$. A solid arrow points from Q_1^1 to Q_3 , with a label $C_1 = C_{3arp}$.

Обозначения на рисунке 4:

$C_{г0}$ – концентрация газа на входе в вентиляционную систему, доли ед., мг/м³;

Q_1^1 – расход воздуха на входе во вторую вентиляционную трубу, м³/с; ($Q_1^1 = Q_1$).

$C_{\Gamma} = C_{\text{BX}}$ – концентрация газа на входе во вторую вентиляционную трубу, доли ед., мг/м³;

Q_3 – расход воздуха на выходе из первой вентиляционной трубы (в забой), $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{ут}}$ – суммарные утечки воздуха из второй вентиляционной трубы в тупиковую выработку, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{загр}}$ и $C_{\text{загр}}$ – расход воздуха и концентрация газа в тупиковой выработке в начале второй вентиляционной трубы, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta Q_{\text{св}}$ – утечки свежего воздуха из первой вентиляционной трубы в тупиковую выработку, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta Q_{\text{загр}}$ – протечки загрязнённого воздуха из тупиковой выработки во вторую вентиляционную трубу, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta C_r = I / Q_3$ – приращение концентрации воздуха в забое выработки, доли ед., $\text{мг}/\text{м}^3$;

I – интенсивность источника загрязнения в забое тупиковой выработки, $\text{мг}/\text{с}$;

$D_0, D_{\text{вх}}$ – диаметры первой вентиляционной трубы и конфузора на входе во вторую вентиляционную трубу, м;

η_1, η_2 – коэффициенты доставки воздуха в первой и второй вентиляционных труб.

Концентрация газа на входе определяется по формуле

$$C_{\text{вх}} = \frac{C_{\text{загр}} \cdot \Delta Q_{\text{загр}}}{Q_1}.$$

Примем $K_{\text{рец}} = \frac{\Delta Q_{\text{загр}}}{Q_1}$ – коэффициент рециркуляции.

Тогда $C_{\text{вх}} = K_{\text{рец}} \cdot C_{\text{загр}}$.

Если $Q_1 = \eta_1 Q_0$ и $Q_3 = \eta_1 \eta_2 Q_0$,

то $\Delta Q \cdot C_r = \frac{I}{\eta_1 \eta_2 Q_0}$.

Тогда $C_{\text{загр}} = \frac{\Delta C_r Q_3 + C_{\text{вх}} Q_{\text{ут}}}{Q_3 + Q_{\text{ут}}} = \frac{I + C_{\text{вх}} Q_{\text{ут}}}{Q_1} = \frac{I + K_{\text{рец}} C_{\text{загр}} Q_{\text{ут}}}{Q_1}$.

Окончательно получим уравнение или для расчёта концентрации загрязнённого воздуха, или при $C_{\text{загр}} = C_{\text{ПДК}}$ необходимого для обеспечения нормативного значения концентрации расход воздуха Q_0 :

$$C_{\text{загр}} = \frac{I + K_{\text{рец}} C_{\text{загр}} Q_1 (1 - \eta_2)}{Q_1}.$$

Выражая из последнего соотношения расход воздуха Q_1 и учитывая его связь через коэффициент доставки η_1 с расходом Q_0 , получим:

$$Q_0 = \frac{I}{C_{\text{ПДК}} \eta_1 [1 - K_{\text{рец}}]}.$$

Задавая интенсивность источника загрязнения в забое тупиковой выработки I и величины коэффициента рециркуляции загрязнённого воздуха K_r , получим требуемый расход воздуха для обеспечения $C_{\text{ПДК}}$.

Далее приводятся графики зависимости количества требуемого воздуха от коэффициента рециркуляции (рис. 5).

Для определения коэффициента рециркуляции было проведено моделирование в программной среде ANSYS [20-22] (рис. 6). Моделирование основывалось на трехмерной модели горной выработки. Во всех случаях выработка моделировалась круглого сечения площадью сечения 70 м^2 . В выработке помещался вентиляционный став поперечным сечением $2,5 \text{ м}^2$. Расстояние между вентиляционными трубами составляло 1,5; 2,0; 2,5 метра. Длина модели 115 метров. Также на принимающие трубы устанавливались насадки, изменяющие диаметр до 1,5 м; 2,0 м; 2,5 м; 3,5 м.

В результате моделирования [23-25] были получены значения рециркуляции, которые сведены в таблицу 1.

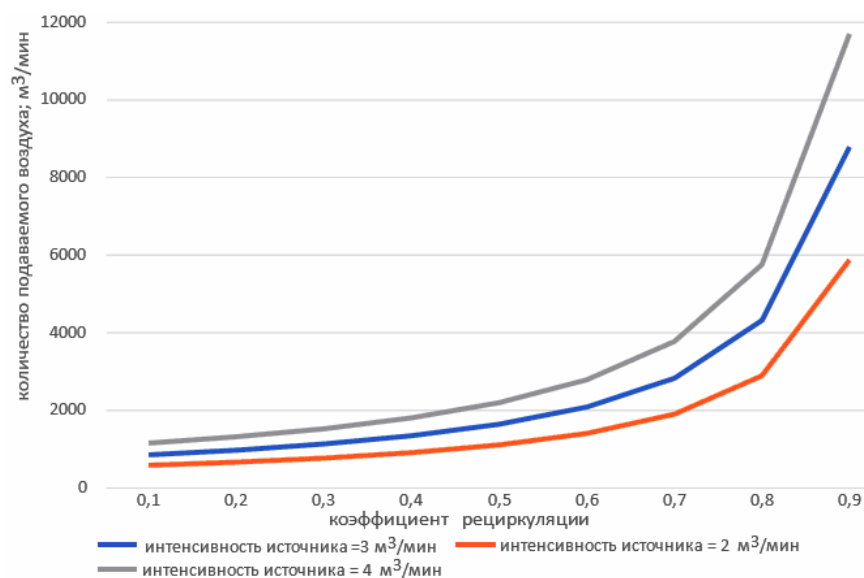


Рис. 5. Зависимость количества подаваемого воздуха от коэффициента рециркуляции

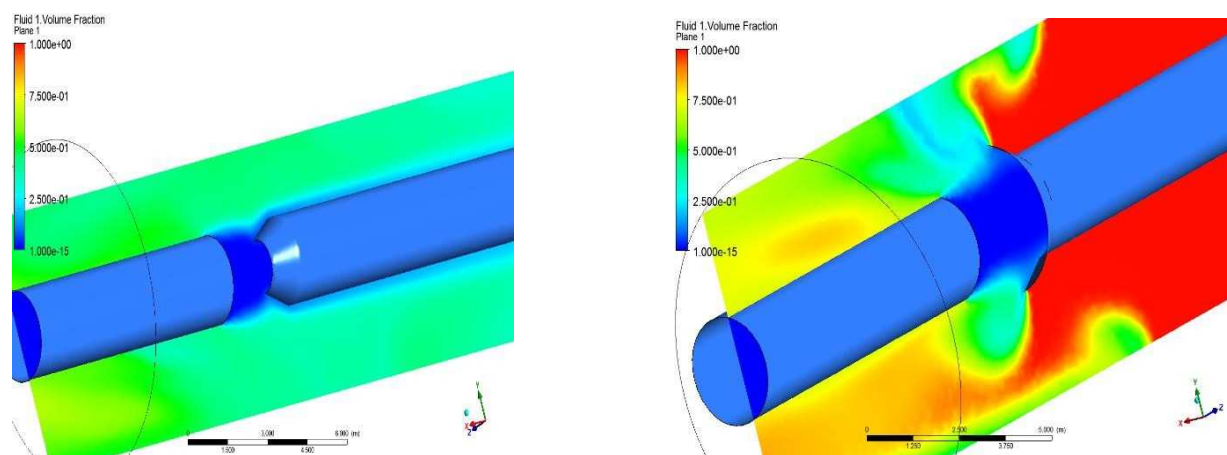


Рис. 6. Пример результата моделирования в программной среде ANSYS при диаметре труб воздухопроводов 2,5 м, на входящем трубопроводе конфузор 1,5 м, при равных расходах исходящего и входящего трубопровода

Табл. 1. Результаты моделирования

D, м	L, м	Количество воздуха, кг/с			загр./чист, %
		Общий	Загр.	Чистый	
3,5	2,5	53,75	3,97	49,78	7,972
3,5	2	53,75	3,19	50,56	6,318
3,5	1,5	53,75	2,91	50,84	5,727
2,5	2,5	53,75	3,64	50,11	7,268
2,5	2	53,75	3,10	50,65	6,124
2,5	1,5	53,75	2,82	50,93	5,540
2	2,5	53,75	3,69	50,06	7,38
2	2	53,75	2,79	50,96	5,48
2	1,5	53,75	2,62	51,13	5,13
1,5	2,5	53,75	3,54	50,21	7,06
1,5	2	53,75	2,87	50,88	5,64
1,5	1,5	53,75	2,37	51,38	4,61

Заключение

В работе рассмотрены современные методы проветривания протяженных тупиковых выработок на шахтах и рудниках. Предложен способ проветривания протяженных тупиковых выработок с помощью рассредоточенного расположения вентиляторов местного проветривания по длине вентиляционного става с разрывом этого става.

Результатом работы является зависимость, позволяющая определить требуемое количество воздуха при проветривании протяженных тупиковых выработок при использовании схемы проветривания с разрывом.

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95-111. – DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 68-78. – DOI: 10.31897/PMI.2023.12.
3. Князев Н.А., Кормищиков Д.С. Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. – 2022. – №3. – С. 74-80. – doi.org/10.7242/echo.2022.3.12.
4. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости // Горный журнал. – 2023. – №9. – С. 41-48. – DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.
5. Корнев А.В., Спицын А.А., Займенцева Л.А., Зубко М. В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 180-198. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_180.
6. Павлов С.А. Проветривание призабойного пространства протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 260-266. – DOI: 10.15372/FPVGN2021080140.
7. Brodny J., Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 151, pp. 373-400. doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.029.
8. Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, iss. 4, pp. 533-539. doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.016.
9. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Savchenko I.A., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. Modeling and Complex Analysis of the Topology Parameters of Ventilation Networks When Ensuring Fire Safety While Developing Coal and Gas Deposits // Fire. 2023, vol. 6, iss. 3, p. 95. doi.org/10.3390/fire6030095.
10. Shengyong H., Qi L., Guorui F., Yisheng H., He S., Yang G., Fei H. Influences of ventilation velocity on dust dispersion in coal roadways // Powder Technology. 2020, vol. 360, pp. 683-694. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.080.
11. Paluchamy B., Mishra D., Panigrahi D.C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines – Generation, health impacts and control measures for cleaner production // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 296, p. 126524. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126524.
12. Pacitto A. et al. Effect of ventilation strategies and air purifiers on the children's exposure to airborne particles and gaseous pollutants in school gyms // Science of the Total Environment. 2020, vol. 712, p. 135673. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135673.
13. Кобылкин С.С., Харисов А.Р. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 531-538. – DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4.
14. Menéndez J. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings // Renewable Energy. 2020, vol. 146, pp. 1166-1176. doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.054.
15. Каледина Н.О., Малашкина В.А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 553-561. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
16. Пузырев Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А. Разработка шахтных воздухонагревательных установок нового типа // Уголь. – 2021. – № 5(1142). – С. 54-61. – doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-54-61.
17. Николаев А.В., Максимов П.В., Земсков А.Н., Конотоп Д.А., Куимов С.А., Бартоломей М.Л. Оценка адекватности математических моделей и зависимостей распределения газовойоздушной смеси в пределах

тупиковой выработки калийного рудника // Уголь. – 2022. – № 10(1159). – С. 60-65. – doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-60-65.

18. Кашников А.В., Круглов Ю.В. Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 594-605. – DOI: 10.31897/PMI.2022.75.
19. Курилко А.С., Соловьёв Д.Е., Киселев В.В., Алексеев К.Н. Прогноз теплового режима горных выработок глубокой золотороссыпной шахты криолитозоны, закрепленных металлической и комбинированной теплозащитной набрызгбетонной крепью // Успехи современного естествознания. – 2023. – №11. – С. 147-154. – DOI: 10.17513/use.38156.
20. Zobaer T., Sutradhar A. Modeling the effect of tumor compression on airflow dynamics in trachea using contact simulation and CFD analysis // Computers in Biology and Medicine. 2021, vol. 135, p. 104574. doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104574.
21. Suwardana R. Analysis of airflow distribution on urban mini plant factory using computational fluid dynamics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 1116, no. 1, p. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/1116/1/012029.
22. Harrson S. Santana, Adriano G.P. da Silva, Mariana G.M. Computational methodology for the development of microdevices and microreactors with ANSYS CFX // MethodsX. 2020, vol. 7, p. 100765. doi.org/10.1016/j.mex.2019.12.006.
23. Журавков М.А., Николаев А.В. Экспертная система компьютерного моделирования вентиляционной обстановки в шахте при возникновении аварии // Уголь. – 2023. – № 7(1169). – С. 85-88. – doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-85-88.
24. Jiang W., Xu X., Wen Z., Wei L. Applying the similarity theory to model dust dispersion during coal-mine tunneling // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 148, pp. 415-427. doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.026.
25. Trechera P. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China // International Journal of Coal Geology. 2021, vol. 235, p. 103677. doi.org/10.1016/j.coal.2021.103677.

References

1. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 259, pp. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Glebova E.V., Volokhina A.T., Vikhrov A.E. Assessment of the efficiency of occupational safety culture management in fuel and energy companies // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 259, pp. 68-78. DOI: 10.31897/PMI.2023.12.
3. Knyazev N.A., Kormshchikov D.S. Improving the safety of miners' evacuation through ventilation shafts during air flow reversal in the cold season at a deep mine // Mining echo. 2022, no. 3, pp. 74-80. doi.org/10.7242/echo.2022.3.12.
4. Gendler S.G., Prokhorova E.A. Methodological foundations for selecting priority areas of labor protection management in underground coal mining based on the analysis of the dynamics of the integral risk of injuries and occupational diseases // Mining journal. 2023, no. 9, pp. 41-48. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.06.
5. Kornev A.V., Spitsyn A.A., Zaimentseva L.A., Zubko M.V. Research of the physico-chemical properties of hydrogel as a means of dust-explosion protection and dust reduction in coal mines // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 9-1, pp. 180-198. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_180.
6. Pavlov S.A. Ventilation of the face space of an extended dead-end working due to the ejection effect arising from the installation of a longitudinal partition // Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences. 2021, vol. 8, no. 1, pp. 260-266. DOI: 10.15372/FPVGN2021080140.
7. Brodny J., Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 151, pp. 373-400. doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.029.
8. Sjöström S., Klinton E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, iss. 4, pp. 533-539. doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.016.
9. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Savchenko I.A., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. Modeling and Complex Analysis of the Topology Parameters of Ventilation Networks When Ensuring Fire Safety While Developing Coal and Gas Deposits // Fire. 2023, vol. 6, iss. 3, p. 95. doi.org/10.3390/fire6030095.
10. Shengyong H., Qi L., Guorui F., Yisheng H., He S., Yang G., Fei H. Influences of ventilation velocity on dust dispersion in coal roadways // Powder Technology. 2020, vol. 360, pp. 683-694. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.080.
11. Paluchamy B., Mishra D., Panigrahi D.C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines – Generation, health impacts and control measures for cleaner production // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 296, p. 126524. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126524.

12. Pacitto A. et al. Effect of ventilation strategies and air purifiers on the children's exposure to airborne particles and gaseous pollutants in school gyms // *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 712, p. 135673. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135673.
13. Kobylkin S.S., Kharisov A.R. Features of the ventilation design of coal mines using the room and pillar mining system // *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 531-538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4.
14. Menéndez J. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings // *Renewable Energy*. 2020, vol. 146, pp. 1166-1176. doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.054.
15. Kaledina N.O., Malashkina V.A. Indicator assessment of the reliability of functioning of mine ventilation and degassing systems // *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 553-561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
16. Puzyrev E.M., Afanasyev K.S., Golubev V.A. Development of a new type of mine air heating units // *Coal*. 2021, no. 5(1142), pp. 54-61. doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-54-61.
17. Nikolaev A.V., Maksimov P.V., Zemskov A.N., Konotop D.A., Kuimov S.A., Bartolomey M.L. Assessment of the adequacy of mathematical models and dependences of the distribution of the gas-air mixture within the dead-end development of a potassium mine // *Coal*. 2022, no. 10(1159), pp. 60-65. doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-60-65.
18. Kashnikov A.V., Kruglov Yu.V. Strategy for controlling mine ventilation in the optimal mode using the fuzzy logic apparatus // *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 594-605. DOI: 10.31897/PMI.2022.75.
19. Kurilko A.S., Soloviev D.E., Kiselev V.V., Alekseev K.N. Forecast of the thermal regime of mine workings of a deep gold placer mine in the cryolithozone, reinforced with metal and combined heat-protective shotcrete support // *Advances in current natural sciences*. 2023, vol. 11, pp. 147-154. DOI: 10.17513/use.38156.
20. Zobaer T., Sutradhar A. Modeling the effect of tumor compression on airflow dynamics in trachea using contact simulation and CFD analysis // *Computers in Biology and Medicine*. 2021, vol. 135, p. 104574. doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104574.
21. Suwardana R. Analysis of airflow distribution on urban mini plant factory using computational fluid dynamics // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 1116, no. 1, p. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/1116/1/012029.
22. Harrson S. Santana, Adriano G.P. da Silva, Mariana G.M. Computational methodology for the development of microdevices and microreactors with ANSYS CFX // *MethodsX*. 2020, vol. 7, p. 100765. doi.org/10.1016/j.mex.2019.12.006.
23. Zhuravkov M.A., Nikolaev A.V. Expert system for computer modeling of the ventilation situation in a mine in the event of an accident // *Coal*. 2023, no. 7(1169), pp. 85-88. doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-85-88.
24. Jiang W., Xu X., Wen Z., Wei L. Applying the similarity theory to model dust dispersion during coal-mine tunneling // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021, vol. 148, pp. 415-427. doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.026.
25. Trechera P. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China // *International Journal of Coal Geology*. 2021, vol. 235, p. 103677. doi.org/10.1016/j.coal.2021.103677.

Сведения об авторах:

Гендлер Семен Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств	Gendler Semen Grigorievich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of industrial safety
Стомма Антон Андреевич – аспирант anton-stomma@mail.ru	Stomma Anton Andreevich – postgraduate student

Получена 17.02.2025