

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ ВЫРАБОТКИ ГЛУБОКОГО КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Л.Ю. Левин¹, А.Е. Суханов¹, С.В. Мальцев¹, М.О. Пересторонин¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: asukhanov@aerologist.ru

Аннотация: Разработка месторождения в условиях больших глубин характеризуется высокими температурами рудничного воздуха в рабочих зонах подземного рудника. Современные подходы к изучению параметров рудничной атмосферы позволяют с достаточной точностью определять основные источники тепловыделения. Однако малоизученным остается вопрос натурного обследования факторов, формирующих рудничную атмосферу, таких как породный массив, а также добычное и вспомогательное оборудование. Перспективным направлением на сегодняшний день является зонирование призабойного пространства и разработка решений по нормализации теплового режима в отдельных участках исследуемой области. Данный подход является менее энергозатратным в сравнении с решениями по охлаждению всей тупиковой выработки. Для реализации предлагаемых решений проведены натурные исследования, направленные на выявление основных источников тепловыделения в призабойном пространстве глубокого калийного рудника. Представлены результаты экспериментов, направленных на изучение факторов, формирующих тепловой режим в исследуемой области. Определена величина геотермического градиента для исследуемого месторождения. Выполнены измерения поверхностей приводов добычного оборудования, вентиляционного оборудования и поверхностей калийного массива (стенок выработок и поверхности забоя). Отдельное внимание уделено влиянию изменения способа проветривания на температуру в тупиковой выработке. По результатам исследования собраны экспериментальные данные, которые в последующем послужат для разработки технических и организационных мероприятий, направленных на снижение температур в отдельных зонах призабойного пространства. Полученные результаты возможно использовать для построения и настройки трехмерной CFD-модели, позволяющей рассчитывать распределения температур в атмосфере тупиковых выработок.

Ключевые слова: калийный рудник, тепловой режим, температуры, микроклимат рудника, эксперимент, способ проветривания тупиковой выработки, динамические замеры, проходческо-очистной комплекс.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проекты № 124020500030-7 и 121111800053-1).

Для цитирования: Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Мальцев С. В., Пересторонин М. О. Экспериментальное исследование теплового режима в призабойном пространстве тупиковой комбайновой выработки глубокого калийного рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 69–84. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_69.

Experimental investigation of thermal conditions in face space of fully-mechanized blind heading of deep potash mine

L.Y. Levin¹, A.E. Sukhanov¹, S.V. Maltsev¹, M.O. Perestoronin¹

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia, e-mail: asukhanov@aerologist.ru

Abstract: Deep-level mining features high air temperatures in operating areas of underground mines. The current approaches to studying mine air parameters provide a reasonable accuracy of detection of the main heat liberation sources. However, the issue of the on-site investigation of factors that influence mine air quality, namely, rock mass, as well as mining and auxiliary equipment, remains yet insufficiently explored. A promising trend as of today is zoning of face spaces and development of engineering solutions on normalization of thermal conditions on individual sites. This approach is less energy-intensive as compared with the solutions on cooling of blind headings. For the implementation of the proposed engineering designs, full-scale investigations were carried out to reveal the main sources of heat liberation in face spaces of a deep potash mine. This article describes the experimental data on factors that form the heat environment in the study areas. The value of the geothermal gradient is determined at the test deposit. The metering of heat is performed on the surfaces of motors of mining and ventilation equipment, and on the surfaces of potash rock mass (sidewalls and face). Particular attention is given to the influence of a ventilation method on the temperature in a blind heading. The experimental data can help develop technical and organizational measures aimed at reduction of temperature in certain areas of a face space. The obtained results are also usable for building and adjustment of 3D CFD models for calculating temperature distribution in air of blind headings.

Key words: potash mine, thermal conditions, temperatures, mine microclimate, experiment, blind heading ventilation method, dynamic measurements, heading-and-winning machine.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state contract, R&D Projects Nos. 124020500030-7 and 121111800053-1.

For citation: Levin L. Y., Sukhanov A. E., Maltsev S. V., Perestoronin M. O. Experimental investigation of thermal conditions in face space of fully-mechanized blind heading of deep potash mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):69-84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_69.

Введение

Добыча калийных удобрений на протяжении долгого времени имеет стратегическое значение в жизни людей. Это связано с тем, что хлористый калий обеспечивает высокую урожайность культур и является ключевым фактором продовольственной безопасности стран. Так, например, разработка Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей подземным способом ведется

с 1930 г., когда было запущено первое в XX в. Соликамское рудоуправление, а разведка месторождения скважинами активно развивалась еще в начале XIX в. [1 – 3]. История развития Старобинского месторождения также берет свое начало в XX в., его разработка длится уже более 50 лет [4]. В то же время мировой спрос на полезные ископаемые не снижается, а наоборот, только увеличивает- ся. Согласно государственному докладу

«О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году» (под ред. Д.Д. Тетенькина и Е.И. Петрова, 2023 г.), величина производства калийных удобрений в Российской Федерации на 2013 г. составляла 10,1 млн т, а на 2021 г. составила уже 15,1 млн т. В связи с этим в наши дни активно осуществляется вскрытие более глубоких пластов калийных месторождений, которые позволяют обеспечить рынок удобрений требуемыми объемами поставок [5]. При этом увеличение глубины ведения горных работ является причиной возникновения новых задач, с которыми ранее горнопромышленники не сталкивались. Одним из таких вопросов является нормализация параметров микроклимата в горных выработках глубоких рудников.

С увеличением глубины ведения горных работ растут температуры в подземных выработках, что связано с естественным приростом температур породного массива в районе разработки месторождения, гидростатическим сжатием воздуха при его движении по стволам, а также с климатическими условиями на дневной поверхности. В связи с этим актуальной задачей является натурное исследование тепловой обстановки в горных выработках. Формирование представительного массива экспериментальных данных позволит приблизиться к разработке решений в части нормализации температурных параметров рудничной атмосферы.

Объектом исследования данной работы является призабойное пространство тупиковой комбайновой выработки глубокого калийного рудника. К особенностям исследуемого объекта стоит отнести сложные горно-геологические условия, характеризующиеся высоким уровнем запыленности, высокой температурой нетронутого массива и значительным горным давлением, ввиду

глубины залегания пласта [6, 7]. Целью исследования являлись сбор и анализ экспериментальных данных по тепловому режиму в призабойном пространстве тупиковой выработки при нахождении в ней проходческо-очистного комплекса.

Анализ изученности вопроса

Первые упоминания об актуальности исследования тепловых параметров берут свое начало с XVIII в. [8, 9], когда ученые начали осуществлять геотермальные наблюдения в подземных шахтах. Вследствие полученных наработок на многих месторождениях Европы стали разрабатываться концепции регулирования теплового режима и были заложены первые основы для исследования тепловой опасности в подземных горных выработках. В последующем развитие лабораторной приборной базы позволило более детально изучить тепловую обстановку в подземных рудниках. У исследователей [10–13] появилась возможность изучать теплопроводность горных пород q , которая в свою очередь способна описывать причины установления теплового режима на разных глубинах месторождениях.

$$q = -\lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где λ — это коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К); δT — разность температур, К; δx — толщина рассматриваемого образца, м.

Описанный параметр позволяет определять, с какой скоростью и в каком объеме теплота недр будет передаваться через стенку выработки рудничному воздуху.

На современном этапе развития горного дела доступны средства непрерывного мониторинга теплового режима в подземных горных выработках. Так, например, исследователями [14] представ-

лен концепт наблюдения за тепловыми параметрами, основанный на использовании станций непрерывного мониторинга. В работе представлена методология, которая может быть рассмотрена специалистами по вентиляции для эффективного внедрения системы управления теплом калийного рудника в Саскачеване, Канада.

В настоящее время большое количество исследований осуществляется в части изучения теплового режима подземных горных выработок. К таковым можно отнести изучение поведения породного массива при разных температурных режимах [15, 16], изучение влияния разных факторов на формирование теплового режима [17], разработку систем нормализации микроклиматических параметров [7].

Способы нормализации микроклиматических параметров можно разделить на три больших группы [18]. Горнотехнические способы включают совершенствование схем проветривания, оптимизацию сечений выработок, ограничение времени пребывания людей и др. Теплотехнические средства базируются на применении парокомпрессионных установок, оросительных систем, а также использовании теплоизоляционных материалов. Существуют и комбинированные подходы при разработке способов нормализации микроклиматических параметров. Все эти подходы объединяет необходимость детального исследования изучаемого объекта для разработки энергоэффективных организационных и технических решений.

Обзор научных работ показал, что малоизученным остается вопрос детального исследования тепловой обстановки призабойного пространства калийного рудника в условиях работ проходческо-очистного комбайнового комплекса. Актуализация геотермических параметров, локализация мощных источников теп-

ловыделений и определение степени влияния системы вентиляции на температурный режим позволят разработать инструменты, с помощью которых станет возможно предложить решения по локальному охлаждению воздуха в тупиковой калийной выработке.

Исследование геотермии месторождения

Современные калийные рудники, как правило, имеют сильноразветвленную вентиляционную сеть. Воздух, который поступает на проветривание призабойного пространства тупиковых выработок, предварительно проходит расстояние в несколько километров по воздухоподающим горным выработкам. В связи с этим первой задачей исследования было изучение изменения тепловых параметров рудничного воздуха при его движении от ствола до тупиковой выработки. Методология данного исследования заключалась в проведении замеров по тракту движения воздушной струи. Замеры осуществлялись в летний период времени с использованием термогигрометра Fluke 971. Погрешность измерения температуры прибором составляет $\pm 0,5$ °C в диапазоне от 0 до 45 °C. Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

Анализ результатов натурных исследований температуры по тракту движения воздушной струи показал, что поступающий в горные выработки воздух уже имеет превышения относительно требований ФНиП № 505 «Правила безопасности при ведении горных работ...». Температура атмосферного воздуха на момент измерений составляла 30,5 °C. Температура на сопряжении ствола с горизонтом зафиксирована 35,8 °C, а в призабойном пространстве 39 °C, при допустимой ФНиП величине 26 °C. Стоит отметить, что для рудника, на котором проводились исследования,

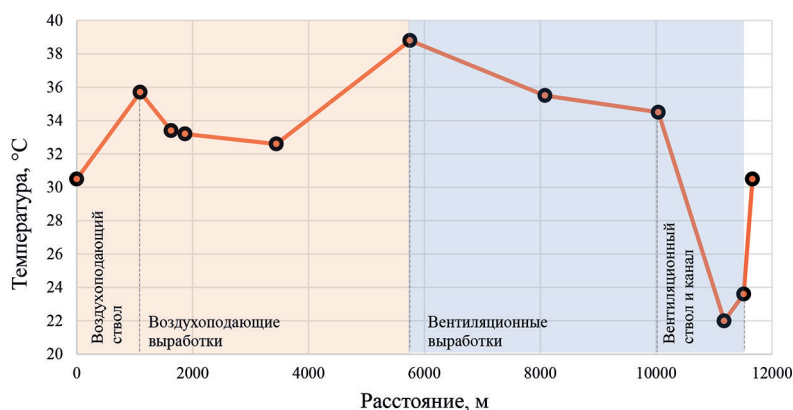


Рис. 1. Термограмма направления исследуемого рудника по маршруту воздухоснабжающий ствол — выработки направлений — вентиляционный ствол

Fig. 1. Thermogram of the direction of the mine under study along the route air supply shaft — direction workings — ventilation shaft

выполнено обоснование безопасности опасного производственного объекта (ОБ ОПО) в части превышения температур воздуха. При соблюдении установленных организационных и технических компенсирующих мероприятий максимальная допустимая величина температуры воздушной среды составляет 36 °С.

Высокие фиксируемые температуры воздуха в горных выработках обосно-

вываются разными факторами, формирующими тепловой режим. Первым из таких факторов являются горно-геологические условия. В связи с этим в рамках эксперимента определена геотермия месторождения для участков ведения проходческо-очистных работ. Для определения данного показателя использовался метод прямых измерений [15]; были обследованы 12 точек, наиболее отдаленных от околоствольного двора.

Таблица 1

Измерение естественной температуры породного массива

Measurement of the natural temperature of a rock mass

№ точки	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{ср}, ^\circ\text{C}$	$T_v, ^\circ\text{C}$	$\varphi_v, \%$	$H, \text{м}$
1	33,0	35,3	32,9	30,1	1115,5
2	34,1	37,2	35,9	29,5	1116,0
3	33,7	37,2	36,3	26,5	1116,0
4	34,0	36,2	35,6	24,0	1116,0
5	32,8	34,9	34,4	24,8	1120,5
6	33,0	34,2	34,0	27,5	1126,5
7	33,5	37,5	35,0	21,7	1129,0
8	33,6	36,7	35,0	21,7	1129,0
9	33,7	36,0	35,7	43,4	1133,0
10	33,4	36,0	35,7	43,4	1135,0
11	34,5	35,8	35,2	27,8	1165,0
12	33,2	35,8	36,2	26,5	1165,0

Осуществлялись замеры температуры воздуха T_v , температуры стенок $T_{ст}$ выработки и температуры в шпурах T_m , глубина которых составляла не менее 2 м. Результаты приведены в табл. 1.

Величина геотермического градиента Γ месторождения определяется по формуле

$$\Gamma = \frac{T_m - T_0}{h - h_0}, \text{ } ^\circ\text{C/м}, \quad (2)$$

где T_m — естественная температура горных пород на глубине h , $^\circ\text{C}$; h_0 — глубина зоны постоянных температур (нейтральный слой), м; T_0 — температура в нейтральном слое, $^\circ\text{C}$. Таким образом, средняя величина градиента для исследуемого участка вычисляется по формуле

$$\Gamma = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Gamma_i, \text{ } ^\circ\text{C/м}. \quad (3)$$

Полученные значения показывают, что средняя величина геотермического градиента в исследуемых горных выработках калийного рудника составляет в среднем $0,0212 \text{ } ^\circ\text{C/м}$. Для полученных значений выполнен статистический анализ результатов замеров. Выполнен расчет стандартного отклонения σ и посчитан 95%-ный доверительный интервал по формулам (4) и (5), соответственно:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Gamma_i - \Gamma)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

$$\Gamma \pm t_{0,975;n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

где $t_{0,975;n-1}$ — коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня доверия (95%).

Таким образом, величина геотермического градиента для обследованных точек составляет в среднем $0,0212 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ с доверительным интервалом $\pm 0,00032 \text{ } ^\circ\text{C/м}$. Низкое значение стандартного отклонения $0,0005 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ указывает на высокую

достоверность полученных данных. Полученные результаты описывают лишь природную составляющую, которая участвует в формировании рудничного микроклимата. Значительное влияние на температурный режим оказывают техногенные источники, о которых в дальнейшем пойдет речь.

Исследование тепловыделений от добычного оборудования

Вторым фактором, влияющим на формирование микроклимата в тупиковой выработке, является мощное добычное оборудование, располагающееся в призабойном пространстве. Разработка калийного пласта осуществляется проходческо-очистным комбайновым комплексом, состоящим из добычного комбайна, самоходного вагона и иногда бункера перегружателя. Суммарная электрическая мощность добычного оборудования может превышать 800 кВт в зависимости от конфигурации комплекса. Согласно научным исследованиям [19], суммарная мощность электрических машин, используемых в тупиковой выработке, прямо пропорционально влияет на тепловыделения в призабойном пространстве.

В связи с этим выполнено детальное обследование оборудования, располагающегося в тупиковых выработках.

Наиболее энергетически оснащенным оборудованием в тупиковой выработке является проходческо-очистной комбайн. На исследуемом руднике используются комбайны типа «Урал-20Р». Согласно паспортным данным, комбайн оснащен десятью электрическими двигателями. На рис. 2 представлен пример термограммы добычного комбайна, располагающегося в исследуемой выработке.

Термографические исследования осуществлялись с использованием тепловизора Hikmicro G60. Диапазон изме-

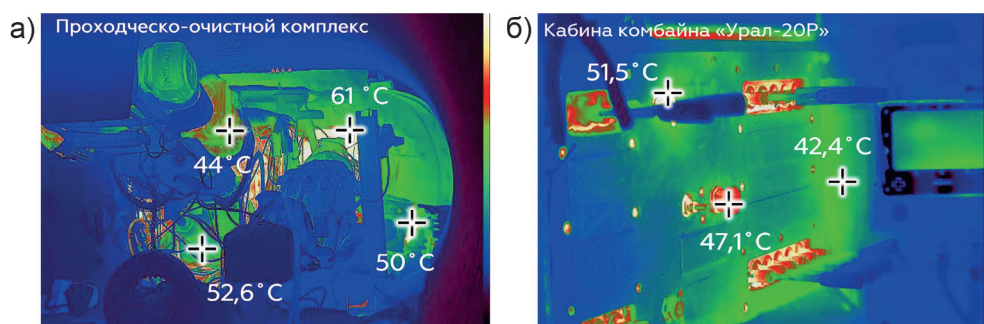


Рис. 2. Термограмма проходческо-очистного комбайна типа «Урал 20Р»: вид сзади (а); кабина машиниста комбайна (б)

Fig. 2. Thermogram of a Ural 20R type tunneling and cleaning combine: rear view (a); combine operator's cabin (b)

рения данного прибора составляет от -20°C до $+650^{\circ}\text{C}$, при этом абсолютная погрешность измерений не превышает $\pm 2^{\circ}\text{C}$ при измерении температур до $+100^{\circ}\text{C}$. Точечные измерения температуры приводов производились с помощью инфракрасного термометра Fluke 568 с абсолютной погрешностью измерений $\pm 1^{\circ}\text{C}$ при измерении положительных температур поверхности. Результаты обследования температур каждого из приводов добычного комбайна представлены в табл. 2.

Основными источниками тепловыделения являются мощные приводы режу-

щих дисков, температура поверхности которых достигает 61°C . Углубленный анализ термографических снимков показал высокие температуры поверхностей, на которые выходят элементы гидравлического привода добычного комбайна (рис. 2, б).

Термографический анализ осуществлялся путем нанесения на тепловизионные снимки результатов замеров, выполненных инфракрасным термометром, который обладает меньшей величиной абсолютной погрешности. Панель управления, которая располагается в кабине проходческо-очистного комбай-

Таблица 2

Обследование электрических приводов на комбайне типа «Урал-20Р»

Inspection of electric drives on a Ural-20R type combine

№	Назначение привода	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Средняя измеренная температура приводов, $^{\circ}\text{C}$
1	Привод № 1 режущих дисков	160	1000	55
2	Привод № 2 режущих дисков	160	1000	61
3	Привод переносного вращения	75	1500	49
4	Привод отбойного устройства	45	1500	45
5	Привод № 1 бермового органа	75	1500	53
6	Привод № 2 бермового органа	75	1500	50
7	Привод № 1 конвейера	30	1500	46
8	Привод № 2 конвейера	30	1500	44
9	Привод насосной станции	55	1000	52
10	Привод пылеотсоса	30	3000	50

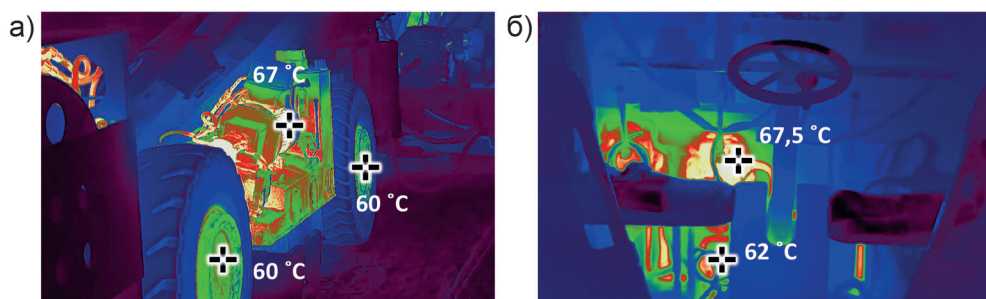


Рис. 3. Термограмма исследуемого самоходного вагона: вид сбоку (а); кабина машиниста вагона (б)
Fig. 3. Thermogram of the self-propelled car under study: side view (a); cabin of the driver of the car (b)

на, включает в себя рычаги управления горной машиной, регулирующие подачу гидравлической жидкости. Таким образом, панель управления является сильным источником тепловыделений в кабине машиниста комбайна. Локальные элементы управления нагреваются до температур свыше 50 °С.

Аналогичные результаты выявлены при проведении анализа источников тепловыделения самоходного вагона типа В17К (рис. 3).

Согласно результатам полученных замеров, основными источниками тепловыделения самоходного вагона также являются электродвигатели и гидравлическое оборудование. В кабине, где расположено рабочее место машиниста самоходного вагона, установлена аппаратура управления, в том числе и насос-дозатор, выполняющий функцию рулевого механизма. Также имеются гидроблоки управления кабельным барабаном, подъемом кузова, стояночным тормозом и другими элементами. По-

скольку элементы управления машиной работают от гидропривода, температура некоторых участков внутренней части кабины достигает 67 °С. Результаты измерения температуры поверхности приводов самоходного вагона представлены в табл. 3.

Суммарная максимальная энергоемкость самоходного вагона — 137 кВт, что составляет 19% от максимально возможной мощности добычного комбайна. Наиболее нагретым элементом самоходного вагона является маслостанция, температура поверхности которой 67 °С.

Влияние работы проходческо-очистного оборудования на формирование теплового режима в тупиковой выработке подтверждено результатами динамического измерения изменения температуры. Цель эксперимента заключалась в определении изменения температуры в зависимости от технологического процесса, происходящего в призабойном пространстве. В зоне расположения ка-

Таблица 3

Обследование электрических приводов на самоходном вагоне В17К
Inspection of electric drives on a V17K self-propelled wagon

№	Назначение привода	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Количество приводов	Температура приводов, °С
1	Мотор-колесо	25	1000	4	60
2	Привод конвейера	22	1000	1	49
3	Насосная установка	15	1000	1	67

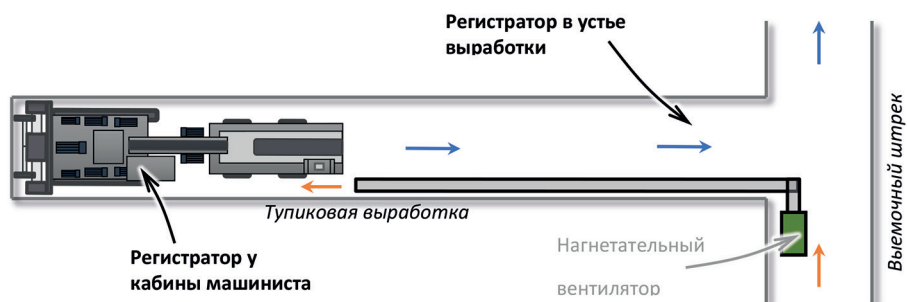


Рис. 4. Схема размещения регистраторов температуры в тупиковой выработке

Fig. 4. The layout of temperature recorders in a dead-end mine

бины машиниста, а также в устье тупиковой камеры были размещены регистраторы параметров kestrel D3 (рис. 4), с абсолютной погрешностью прибора $\pm 0,5^\circ\text{C}$, которые непрерывно записывали данные с промежутком в 5 с.

В это же время в дневнике велась фиксация процессов, происходящих в призабойном пространстве. Результаты эксперимента представлены в виде графиков на рис. 5–7. Красный график характеризует изменение температуры в районе кабины машиниста комбайна, синий график — изменение температуры в устье выработки.

На представленных графиках выделены цветные прямоугольники, которые характеризуют интервалы работы комбайна в режиме разрушения забоя и одновременной погрузки самоходно-

го вагона. Из графиков (см. рис. 5–7), построенных для кабины машиниста, видно, что запуск добычного комбайна и присутствие самоходного вагона в призабойном пространстве нагревают воздух примерно на 1°C . В то же время зачастую в устье выработки не фиксируются экстремумы, что в свою очередь свидетельствует о выравнивании температуры потока исходящего воздуха из тупиковой выработки. Данный факт свидетельствует о наличии теплообмена между рудничным воздухом и свежееобнаженным калийным массивом в границах призабойного пространства. Дополнительная интенсификация теплообмена с породами реализуется за счет тепловой конвекции и аэродинамического эффекта от вентиляторов охлаждения. Этот эффект особенно сильно

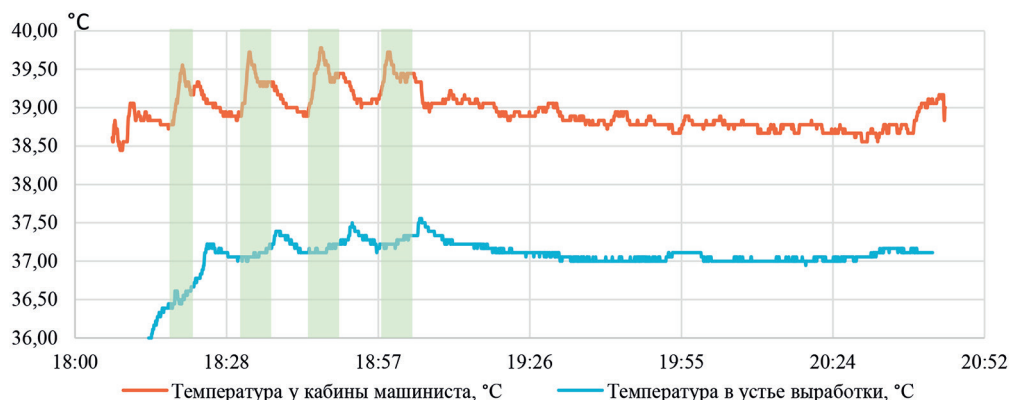


Рис. 5. Динамические замеры температуры в исследуемом забое № 1

Fig. 5. Dynamic temperature measurements in the studied face no. 1

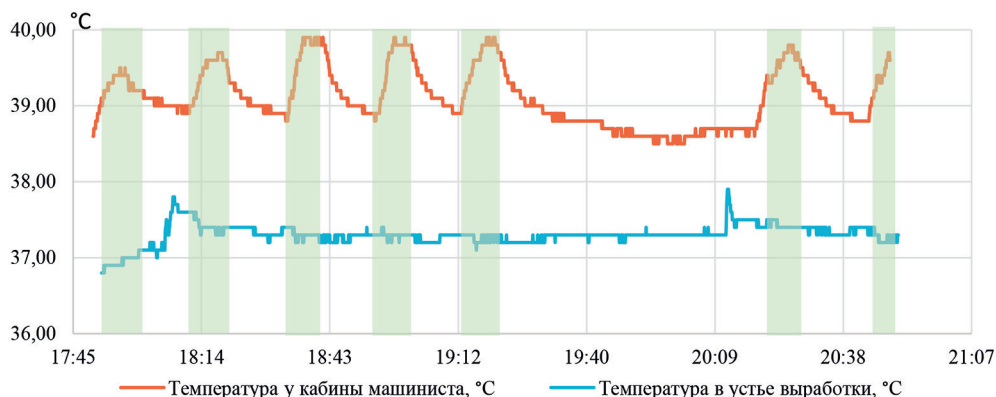


Рис. 6. Динамические замеры температуры в исследуемом забое № 2

Fig. 6. Dynamic temperature measurements in the studied face no. 2

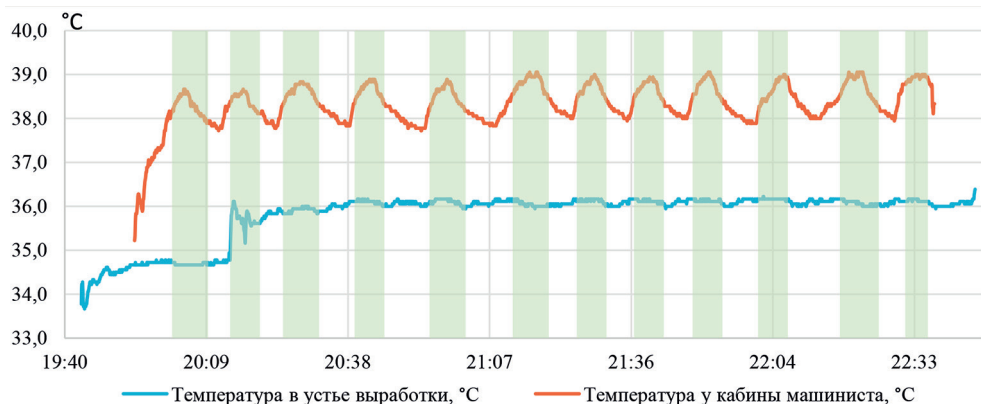


Рис. 7. Динамические замеры температуры в исследуемом забое № 3

Fig. 7. Dynamic temperature measurements in the studied face no. 3

проявляется при всасывающем способе проветривания [20].

Исследование тепловыделений от оборудования системы местного проветривания

Для обеспечения безопасных условий труда тупиковая горная выработка должна проветриваться активной воздушной струей. Для подачи воздуха в призабойное пространство используются вентиляторы местного проветривания (ВМП), имеющие осевой тип исполнения с расположением электродвигателя под общим корпусом на одной оси с рабочим колесом, электрическая мощность ко-

торых может превышать 100 кВт. Такая конструктивная особенность также приводит к дополнительному нагреву воздуха, что необходимо учитывать при разработке мероприятий по нормализации теплового режима в призабойном пространстве. Данное утверждение подтверждается результатами термографического обследования вентиляторов.

На рис. 8 представлены примеры термоснимков одного из исследуемых вентиляторов. Наибольшие температуры фиксируются в зоне расположения рабочего колеса и составляют 54,6 °С.

За все время выполнения экспериментов проведено обследование 10 агре-

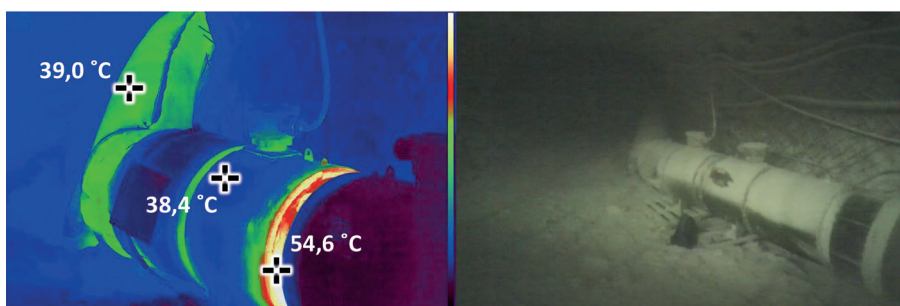


Рис. 8. Термограмма обследуемого вентилятора

Fig. 8. Thermogram of the examined fan

готов в разных участках шахтного поля исследуемого рудника. Выполнены замеры расхода воздуха Q_i , его температуры t_i и влажности φ_i перед местом установки ВМП (№ 1), на выходе потока воздуха из вентилятора (№ 2), а также в забое тупиковой выработки (№ 3). Схема точек замеров воздуха представлена на рис. 9.

На основе выполненных замеров рассчитано приращение температуры воздуха, обусловленное тепловыделениями от работы вентилятора местного проветривания. Результаты сведены в табл. 4.

Таким образом, результаты обследования показали, что средняя величина приращения температуры в результате нагрева за счет электропривода на вентиляторах типа FBd-7,1 и 7,5 составила 4,5 °C. В то же время на вентиляторах местного проветривания типа FBd-8,0 средняя величина приращения составила 8,2 °C, что обуславливается более высокой мощностью агрегатов. Для оцен-

ки теплового влияния вентиляторов местного проветривания на рудничную атмосферу в призабойном пространстве рассчитана удельная величина приращения температуры на 1 кВт мощности привода по следующей формуле:

$$q_t = \frac{\Delta t}{N}, \quad (6)$$

где q_t — удельное приращение температуры, °C/кВт; Δt — рост температуры воздуха на вентиляторе, °C; N — мощность привода, кВт.

На основании расчетов среднее удельное значение для обследуемых вентиляторов проветривания составляет 0,046 °C/кВт. Полученные результаты показали, что осевые вентиляторы местного проветривания оказывают существенное влияние на температурный режим в призабойном пространстве. Значительная часть электрической мощности преобразуется в тепло, которое впоследствии, при нагнетательной схе-

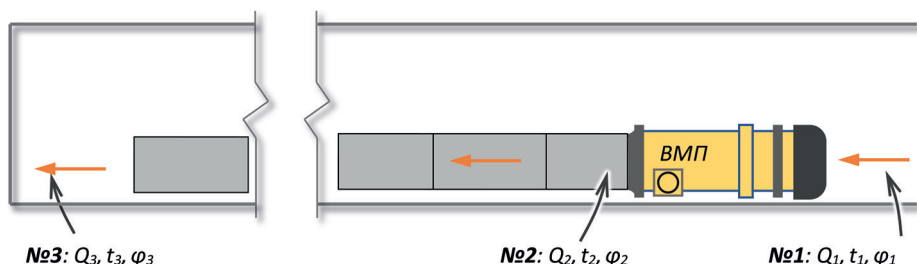


Рис. 9. Схематичное расположение точек замеров при обследовании ВМП

Fig. 9. Schematic location of the measuring points during the examination of the LVF

Таблица 4

Результаты обследования вентиляторов местного проветривания**The results of the examination of local ventilation fans**

№	Тип вентилятора	Мощность привода, кВт	Температура, °С		Приращение температуры на ВМП, °С	Температура в забое (№ 3), °С
			перед ВМП (№ 1)	после ВМП (№ 2)		
1	FBd-7,1	2х45	33,6	40,3	6,7	37,5
2	FBd-7,1	2х45	37,5	42,8	5,3	39,1
3	FBd-7,5	1х45	34,0	36,3	2,3	36,8
4	FBd-7,5	2х45	32,3	37,4	4,6	39,5
5	FBd-7,5	2х45	35,3	38,5	3,2	36,7
6	FBd-7,5	2х45	32,8	37,4	4,6	39,8
7	FBd-8,0	2х75	35,0	42,2	7,2	37,5
8	FBd-8,0	2х75	27,0	35,9	4,6	38,3
9	FBd-8,0	2х75	37,4	45,8	8,4	38,8

ме проветривания, поступает в зону расположения проходческо-очистного комплекса. В связи с этим возникает необходимость изучения альтернативных способов организации вентиляции призабойного пространства. Одним из них является всасывающий способ проветривания тупиковой выработки [21].

В рамках данного исследования проведено опытно-промышленное испытание, заключающееся в определении степени влияния способа проветривания на температурный режим в тупиковой выработке. Эксперимент производился в тупиковой горной выработке при работающем проходческо-очистном оборудовании. Система вентиляции исследуемой выработки состояла из двух вентиляторов местного проветривания. Первый вентилятор типа ВМ-6М применялся для нагнетания воздуха в тупиковую выработку в количестве 315 м³/мин. Второй вентилятор типа FBd-7.5 использовался для всасывающего проветривания выработки, с расходом 370 м³/мин. Всасывающий вентилятор располагался за пределами тупиковой выработки и транспортировал воздух через жесткий вентиляционный трубопровод. Тех-

нологические операции по изменению способа проветривания производились непрерывно, без остановки проходческо-очистного комплекса на длительное время.

В исследуемой выработке размещены регистраторы параметров Kestrel D3. Один из регистраторов был установлен на задней части кабины машиниста комбайна, а второй на расстоянии 30 м от стрелы проходческо-очистного комбайна, на стенке выработки. Суть эксперимента заключалась в поочередном изменении способа проветривания и фиксации показателей температуры в местах установки датчиков. Результаты эксперимента представлены в виде графиков на рис. 10.

Анализ полученного графика демонстрирует различия параметров температурного режима при разных способах проветривания. При нагнетательном способе проветривания фиксируются максимальные значения температуры воздуха. В районе кабины машиниста значения величина температуры достигает 39 °С, а в отдалении от комбайна — 38,5 °С. При переходе на всасывающую схему проветривания наблюдается ста-

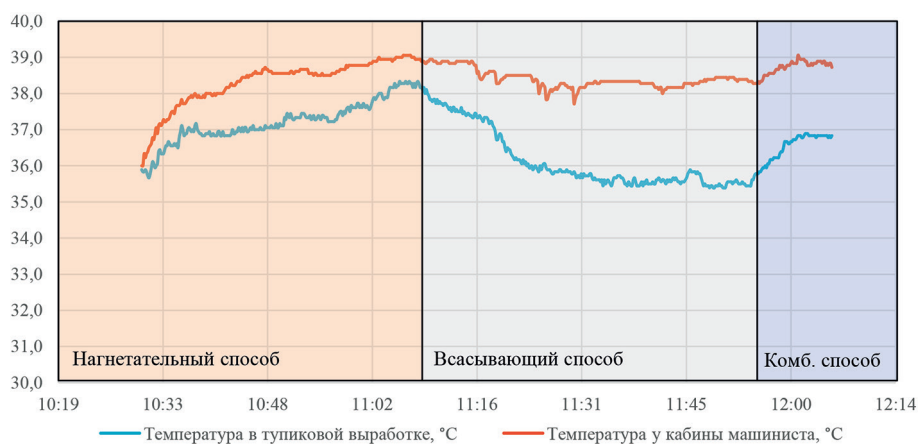


Рис. 10. Графики изменения показаний температуры в исследуемой выработке при разных способах проветривания

Fig. 10. Graphs of changes in temperature readings in the work area under study with different ventilation methods

бильное снижение температуры. В районе кабины машиниста комбайна температура снижается до 38°C , а в отдалении от комбайна до $35,5^{\circ}\text{C}$. График датчика, размещенного на кабине машиниста, не показал такой эффективности, какую показал датчик, размещенный на удалении от комбайнового комплекса. Это связано с тем, что поверхность добычного оборудования оказывала значительное влияние на параметры температуры и не успела охладиться за период проведения эксперимента.

Расчет стандартного отклонения выполнен отдельно для массива данных, полученных с каждого датчика при разных сценариях, представленных на рис. 10. Полученные значения варьируются в диапазоне от $0,3^{\circ}\text{C}$ до $0,8^{\circ}\text{C}$, что говорит о высокой достоверности полученных значений. Максимальные колебания зафиксированы в период изменения способов проветривания, в то время как в установившихся режимах проветривания величина отклонения имела минимальные значения.

Заключение

Результатом выполненного исследования является сопоставительный анализ

полученных натурных данных, а также выявление зависимостей, характеризующих тепловой режим в призабойном пространстве тупиковой комбайновой выработки глубокого калийного рудника. Выявлено, что тепловая обстановка формируется под влиянием как природных, так и техногенных факторов. Одним из важнейших факторов являются горно-геологические параметры калийного массива. Натурные исследования показали, что величина геотермического градиента для исследуемого месторождения в среднем составила $0,0212^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Существенное влияние оказывает оборудование, входящее в состав проходческо-очистного комплекса, а именно приводы и гидравлические трассы. Зафиксированные температуры поверхностей электрических двигателей и пультов управления достигали $60–67^{\circ}\text{C}$, что обуславливает значительные тепловыделения в призабойном пространстве. Обследование системы вентиляции установило, что вентиляторы, работающие по нагнетательной схеме проветривания, также вносят существенный вклад в формирование теплового режима. Величина удельного приращения температуры воздуха в среднем соста-

вила 0,046 °С/кВт. Выявлено, что переход на всасывающую схему проветривания позволит снизить температуры на 2–2,5 °С.

Из результатов представленного исследования вытекает, что перспективным направлением является внедрение средств локального охлаждения воздуха, которые в сравнении с системами местного охлаждения характеризуются меньшими энергозатратами при эксплуатации. Их суть заключается в охлажде-

нии отдельных зон, в которых горнорабочие проводят большую часть смены. Полученные в ходе исследования экспериментальные данные могут быть использованы для параметризации моделей тепломассопереноса в воздушном пространстве тупиковых выработок. Предлагаемый подход ранее был успешно реализован в работах [22] для моделирования процессов распределения газа и пылевых частиц в тупиковых горных выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилов В. В. История открытия и роль крупнейшего в мире Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вестник Прикамского социального института. — 2023. — № 2(95). — С. 140–159.
2. Барях А. А., Смирнов Э. В., Квиткин С. Ю., Тенисон Л. О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 41–50.
3. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. — М.: Эпсилон Плюс, 2013. — 429 с.
4. Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И. Развитие механизированной разработки калийных руд. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. — 522 с.
5. Ranjith P. G., Zhao J., Ju M., De Silva R. V. S., Rathnaweera T. D., Bandara A. K. M. S. Opportunities and challenges in deep mining: a brief review // Engineering. 2017, vol. 3, no. 4, pp. 546–551.
6. Семин М. А., Исаевич А. Г., Жихарев С. Я. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 2. — С. 178–191.
7. Зайцев А. В., Бородавкин Д. А., Поляков И. В. Обеспечение безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника // Горное эхо. — 2020. — № 1(78). — С. 72–79. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16.
8. Li N., Shu H., Sun D. Human thermal comfort indicator in high-temperature environments in deep mining // Journal of Safety and Sustainability. 2025, vol. 2, no. 2, pp. 134–141. DOI: 10.1016/j.jsasus.2025.03.001.
9. Bullard E. C. Historical introduction to terrestrial heat flow // Terr Heat Flow. 1965, vol. 8, pp. 1–6.
10. Bullard E. C. Heat flow in South Africa // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1939, vol. 173, no. 955, pp. 474–502.
11. Liu Dw., Gu Ds., Dai Tg. Analysis and calculation of thermal conductivity of rock in deep strata // Journal of Central South University of Technology. 2005, no. 12 (Suppl. 1), pp. 114–119.
12. Cho W. J., Kwon S., Choi J. W. The thermal conductivity for granite with various water contents // Engineering Geology. 2009, vol. 107, no. 3-4, pp. 167–171.
13. Gao J., Li S., Wu F., Ma L. Heat transfer model and thermal insulation characteristics of surrounding rock of thermal insulation roadway in a high-temperature mine // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 16, article 12555. DOI: 10.3390/su151612555.
14. Ryan A., Eluer D. S. Heat stress management in underground mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 651–655. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.020.
15. Зайцев А. В., Бородавкин Д. А., Бублик С. А., Агеева К. М. Исследование температуры массива горных пород березовского рудника ОАО «Беларуськалий» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 7. — С. 76–85.

16. Zhang X., He M., Li Z., Jia Y., Gao W. Study on the influence of temperature and water content on the static mechanical properties of sandstone // *Materials*. 2024, vol. 17, no. 14, article 3399. DOI: 10.3390/ma17143399.
17. Zhang X., Xu M., Liu L., Liu L., Wang M., Ji H., Song K.-I. The concept, technical system and heat transfer analysis on phase-change heat storage backfill for exploitation of geothermal energy // *Energies*. 2020, no. 13, article 4755.
18. Ольховский Д. В. Нормализация микроклиматических параметров тупиковых горных выработок глубоких рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2024. — 21 с.
19. Zaitsev A., Parshakov O., Semin M. Heat emissions from mining machinery: implications for microclimatic conditions in underground workings // *Mining*. 2024, vol. 4, no. 4, pp. 1075—1092. DOI: 10.3390/mining4040059.
20. Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A. Numerical analysis of the impact of variable borer miner operating modes on the microclimate in potash mine working areas // *Computation*. 2025, no. 13, article 85. DOI: 10.3390/computation13040085.
21. Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Исаевич А. Г., Козунин И. И. Экспериментальные исследования зависимости пылевой обстановки в тупиковой выработке от применяемого способа проветривания при механизированной добыче калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 10. — С. 35—50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_35.
22. Sukhanov A., Maltsev S., Semin M., Isaevich A., Starikov A. Optimization of the combined ventilation system for dust reduction in blind headings of potash mines // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024, vol. 11, no. 5, pp. 1236—1244. DOI: 10.18280/mmep.110512. **ТИАБ**

REFERENCES

1. Shilov V. V. The history of discovery and the role of the world's largest deposit of potassium and magnesium salts in Verkhnekamsk. *Bulletin of Prikamsky social institute*. 2023, no. 2(95), pp. 140—159. [In Russ].
2. Baryakh A. A., Smirnov E. V., Kvitkin S. Yu., Tenison L. O. Potassium industry of Russia: Problems of rational and safe subsoil use. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 1, pp. 41—50. [In Russ].
3. Kudryashov A. I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley* [Verkhnekamskoye salt deposit], Moscow, 2013, 429 p.
4. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *Razvitie mekhanizirovannoy razrabotki kaliynykh rud* [Development of mechanized mining of potash ores], Perm, 2007, 522 p.
5. Ranjith P. G., Zhao J., Ju M., De Silva R. V. S., Rathnaweera T. D., Bandara A. K. M. S. Opportunities and challenges in deep mining: a brief review. *Engineering*. 2017, vol. 3, no. 4, pp. 546—551.
6. Semin M. A., Isaevich A. G., Zhikharev S. Ya. Investigation of dust deposition of potassium salt in mining. *Journal of Mining Sciences*. 2021, no. 2, pp. 178—191. [In Russ].
7. Zaytsev A. V., Borodavkin D. A., Polyakov I. V. Ensuring safe working conditions based on the microclimate factor for the conditions of a deep potash mine. *Gornoye ekho*. 2020, no. 1(78), pp. 72—79. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16.
8. Li N., Shu H., Sun D. Human thermal comfort indicator in high-temperature environments in deep mining. *Journal of Safety and Sustainability*. 2025, vol. 2, no. 2, pp. 134—141. DOI: 10.1016/j.jsasus.2025.03.001.
9. Bullard E. C. Historical introduction to terrestrial heat flow. *Terr Heat Flow*. 1965, vol. 8, pp. 1—6.
10. Bullard E. C. Heat flow in South Africa. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1939, vol. 173, no. 955, pp. 474—502.
11. Liu Dw., Gu Ds., Dai Tg. Analysis and calculation of thermal conductivity of rock in deep strata. *Journal of Central South University of Technology*. 2005, no. 12 (Suppl. 1), pp. 114—119.
12. Cho W. J., Kwon S., Choi J. W. The thermal conductivity for granite with various water contents. *Engineering Geology*. 2009, vol. 107, no. 3-4, pp. 167—171.
13. Gao J., Li S., Wu F., Ma L. Heat transfer model and thermal insulation characteristics of surrounding rock of thermal insulation roadway in a high-temperature mine. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 16, article 12555. DOI: 10.3390/su151612555.
14. Ryan A., Eluer D. S. Heat stress management in underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 651—655. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.020.
15. Zaytsev A. V., Borodavkin D. A., Bublik S. A., Ageeva K. M. Study of the rock mass temperature of the Berezovsky mine of JSC «Belaruskali». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 76—85. [In Russ].

16. Zhang X., He M., Li Z., Jia Y., Gao W. Study on the influence of temperature and water content on the static mechanical properties of sandstone. *Materials*. 2024, vol. 17, no. 14, article 3399. DOI: 10.3390/ma17143399.

17. Zhang X., Xu M., Liu L., Liu L., Wang M., Ji H., Song K.-I. The concept, technical system and heat transfer analysis on phase-change heat storage backfill for exploitation of geothermal energy. *Energies*. 2020, no. 13, article 4755.

18. Ol'khovskiy D. V. *Normalizatsiya mikroklimaticheskikh parametrov tupikovykh gornykh vyrabotok glubokikh rudnikov* [Normalization of microclimatic parameters of dead-end mine workings in deep mines], Candidate's thesis, Perm, 2024, 21 p.

19. Zaitsev A., Parshakov O., Semin M. Heat emissions from mining machinery: implications for microclimatic conditions in underground workings. *Mining*. 2024, vol. 4, no. 4, pp. 1075 – 1092. DOI: 10.3390/mining4040059.

20. Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A. Numerical analysis of the impact of variable borer miner operating modes on the microclimate in potash mine working areas. *Computation*. 2025, no. 13, article 85. DOI: 10.3390/computation13040085.

21. Levin L. Y., Sukhanov A. E., Isaevich A. G., Kozunin I. I. Experimental research of dust condition in blind drift versus applied ventilation method in machine mining of potash. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 10, pp. 35 – 50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_35.

22. Sukhanov A., Maltsev S., Semin M., Isaevich A., Starikov A. Optimization of the combined ventilation system for dust reduction in blind headings of potash mines. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024, vol. 11, no. 5, pp. 1236 – 1244. DOI: 10.18280/mmp.110512.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Лев Юрьевич¹ — д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделом, e-mail: aerolog_lev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,

Суханов Андрей Евгеньевич¹ — младший научный сотрудник, e-mail: asukhanov@aerologist.ru, ORCID ID: 0009-0002-7960-8344,

Мальцев Станислав Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором, e-mail: stasmalcev32@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,

Пересторонин Максим Олегович¹ — инженер, e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-0203-9304,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Суханов А.Е., e-mail: asukhanov@aerologist.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L. Y. Levin¹, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Head of Department, e-mail: aerolog_lev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,

A. E. Sukhanov¹, Junior Researcher, e-mail: asukhanov@aerologist.ru, ORCID ID: 0009-0002-7960-8344,

S. V. Maltsev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Sector, e-mail: stasmalcev32@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,

M. O. Perestoronin¹, Engineer, e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-0203-9304,

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: A. E. Sukhanov, e-mail: asukhanov@aerologist.ru.

Получена редакцией 17.02.2026; получена после рецензии 27.04.2026; принята к печати 10.08.2026.

Received by the editors 17.02.2026; received after the review 27.04.2026; accepted for printing 10.08.2026.