

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РУДНИЧНОГО МИКРОКЛИМАТА

М.О. Пересторонин¹, А.В. Зайцев^{1,2}, О.С. Паршаков¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН (ГИ УрО РАН), Пермь, Россия,
e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследования условий эффективного применения теплоизоляции горных выработок для улучшения параметров рудничного микроклимата. На основе многовариантного математического моделирования теплового режима в АК «АэроСеть» проанализировано влияние ключевых факторов на эффективность теплоизоляции: времени проветривания, расхода воздуха, разности температур «массив – воздух» и термического сопротивления теплоизоляции. Установлено, что максимальная эффективность теплоизоляции достигается в первые 4–5 месяцев существования выработки, а через 4–5 лет ее влияние становится незначительным. Определены критерии выбора выработок для теплоизоляции: расход воздуха не более 60 м³/с, разность температур между массивом и воздухом не менее 7–10 °С, температура воздуха на входе в выработку не более допустимой. Выявлено критическое значение термического сопротивления теплоизоляции 5,2 м²·°С/Вт, превышение которого экономически нецелесообразно ввиду достижения пика эффективности. Разработан инженерный алгоритм выбора участков для теплоизоляции и расчета ее параметров (длины теплоизолируемого участка и термического сопротивления). Предложенные решения позволяют оптимизировать затраты на снижение температуры воздуха в горных выработках и повысить безопасность горных работ в условиях высоких температур и интенсивного тепловыделения от массива.

Ключевые слова: теплоизоляция горных выработок, рудничный микроклимат, термическое сопротивление, теплопритоки от массива, алгоритм выбора участков, условия применения, математическое моделирование, «АэроСеть».

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2).

Для цитирования: Пересторонин М.О., Зайцев А.В., Паршаков О.С. Определение условий эффективного применения теплоизоляции горных выработок для улучшения параметров рудничного микроклимата // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 84–100. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_84.

Efficient application conditions for heat insulation of underground openings to improve microclimate in mines

M.O. Perestoronin¹, A.V. Zaitsev^{1,2}, O.S. Parshakov¹

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract: The article describes research findings on application conditions of heat insulation of underground openings toward improvement of mine microclimate. Using the multivariate mathematical modeling of thermal conditions in AeroSet, the influence of the key factors on the heat insulation efficiency is analyzed: ventilation time, air flow rate, air–rock mass temperature difference and heat resistance of heat insulation. It is found that the maximal efficiency of heat insulation is achieved in the first 4–5 months of service life of an underground opening, and then the heat insulation becomes inefficient in 4–5 years. The criteria of a mine opening to be heat insulated are determined: air flow rate is not more than 60 m³/s, temperature difference between air and rock mass is not less than 7–10 °C, air temperature at the inlet of an opening is not higher than the allowable value. The critical heat resistance of thermal insulation is 5.2 m²·°C/W, and the exceedance of this value is economically inexpedient in view of the attained peak of efficiency. An engineering algorithm is developed for selecting sites for heat insulation and for calculating the heat insulation parameters (heat insulation site length and heat resistance). The proposed solutions allow optimization of expenditures connected with air temperature reduction in mine openings and enable enhancement of mining safety in the conditions of high temperature and intense heat liberation from rock mass.

Key words: heat insulation of underground openings, mine microclimate, heat resistance, heat gain from rock mass, site selection algorithm, application conditions, mathematical modeling, AeroSet.

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 State Registration No. 126012716039-2.

For citation: Perestoronin M. O., Zaitsev A. V., Parshakov O. S. Efficient application conditions for heat insulation of underground openings to improve microclimate in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):84-100. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_84.

Введение

Создание безопасных условий труда под землей является одним из ключевых требований к современным горнодобывающим предприятиям. Одним из наиболее значимых негативных факторов, снижающих уровень безопасности ведения горных работ, является повышенная температура воздуха в выработках. Данная проблема в наибольшей степени характерна для глубоких рудников, где основным источником теплоты, определяющим температуру воздуха, выступа-

ет массив горных пород [1]. В России такая проблема актуальна для ряда предприятий: «Норильский никель» (полиметаллы, глубина до 2 км, температура пород до 45 °C), «ЕвроХим-ВолгаКалий» (калий, глубина до 1,1 км, температура до 35 °C), а также шахты Донбасса (уголь, глубина до 1,3 км, температура до 40 °C) [2–4].

Продолжительная работа в условиях повышенных температур негативно сказывается на состоянии горнорабочих: в лучшем случае это приводит к сниже-

нию производительности труда, в худшем — к нарушению функций организма и развитию профессиональных заболеваний [5].

Традиционно основным способом нормализации рудничного микроклимата остается использование систем кондиционирования (СКВ). Однако в условиях постоянного роста глубины ведения горных работ и протяженности сети выработок использование исключительно холодильных машин зачастую перестает быть экономически целесообразным [6].

В связи с этим в мировой практике активно разрабатываются решения, направленные на замену систем кондиционирования или повышение их эффективности. Одним из таких перспективных решений, позволяющих снизить теплопритоки от массива и тем самым увеличить зону безопасных температур воздуха, является применение теплоизоляционных покрытий для горных выработок.

В научной литературе вопросы применения теплоизоляции рассматриваются в двух основных направлениях: для снижения температуры воздуха в выработках [7–9] и для защиты вечномерзлых пород от оттаивания [10–13].

Однако вопросы, связанные с применением теплоизоляции именно для охлаждения рудничного воздуха, изучены недостаточно. Например, в работе [14] рассматривалась изоляция переменной толщины для оптимизации затрат и обеспечения устойчивости выработок в мерзлых грунтах, а в статье [15] анализировалась частичная теплоизоляция (стены и кровля) в сравнении с полной (стены, кровля, почва). В исследованиях [9, 10] оценивалось влияние срока службы на эффективность теплоизоляции.

При этом остаются малоизученными следующие аспекты:

- оптимальная разность температур между породой и воздухом для использования теплоизоляции;

- влияние расхода воздуха на эффективность теплоизоляции;
- критерии выбора участков рудника для теплоизоляции;
- определение оптимальной длины и термического сопротивления теплоизоляции.

Исследованию этих вопросов и посвящена настоящая работа.

Методы исследования

Согласно работам [16, 17], нагрев воздуха в горных выработках на пути движения от воздухоподающего до вентиляционного ствола определяется главным образом тремя факторами: адиабатическим сжатием, теплообменом с породным массивом и техногенными источниками тепла. При моделировании теплораспределения в вентиляционной сети рудника, представленной в виде ориентированного графа с m узлами и n ветвями, где каждая j -я ветвь разбивается на ячеек, температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в произвольный момент времени описывается следующим уравнением [3]:

$$T_{ij}^{t+1} = T_{i-1j}^t + \frac{W_{ij}^t \Delta t}{c_a \rho_{ij} S_j \Delta x_{ij}} + \frac{a_j P_j (\tau_{0,ij}^t - T_{ij}^t) \Delta t}{c_a \rho_{ij} S_j \Delta x_{ij}} + \frac{g \Delta x_{ij} \sin \alpha_j}{\left(c_a + \frac{R}{M} \right)} \quad (1)$$

где T_{ij}^{t+1} — температура воздуха в i -й ячейке j -й ветви в рассчитываемый момент времени, $^{\circ}\text{C}$; T_{i-1j}^t — температура воздуха на входе в i -ю ячейку j -й ветви, $^{\circ}\text{C}$; W_{ij}^t — количество теплоты, выделяющееся от техногенных источников в i -й ячейке j -й ветви в момент времени t , Вт; Δt — шаг по времени, с; c_a — теплоемкость воздуха, Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$; ρ_{ij} — плотность воздуха в i -й ячейке j -й ветви, кг/м 3 ; S_j — площадь поперечного сечения j -й ветви, м 2 ; $\Delta x_{ij} = v_j \Delta t$ — шаг по расстоянию (длина i -й ячейки j -й ветви), м;

v_j — скорость воздуха в данной ветви, м/с; a_j — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — массив», Вт/(м²·°С); $\tau_{0,ij}^t$ — температура массива горных пород на границе «воздух — массив» на участке i -й ячейки j -й ветви, °С; P_j — периметр j -й ветви, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\sin \alpha_j$ — синус угла наклона j -й ветви; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·°С); M — молярная масса воздуха, моль.

В данном уравнении второе слагаемое соответствует нагреву за счет адиабатического сжатия, третье описывает нагрев вследствие теплообмена с породным массивом, а четвертое учитывает влияние техногенных источников тепла.

В привязке к горным выработкам и с учетом перечисленных факторов динамика нагрева воздуха в рудниках имеет вид, представленный на рис. 1.

Таким образом, при движении в руднике температура воздуха изменяется следующим образом:

- в подающих стволах: повышается в основном за счет адиабатического сжатия;
- в главных, панельных и участковых подающих выработках: повышается за счет теплообмена с породным массивом;
- в рабочих зонах (очистные и подготовительные забои): повышается за счет тепловыделений от техники и оборудования;

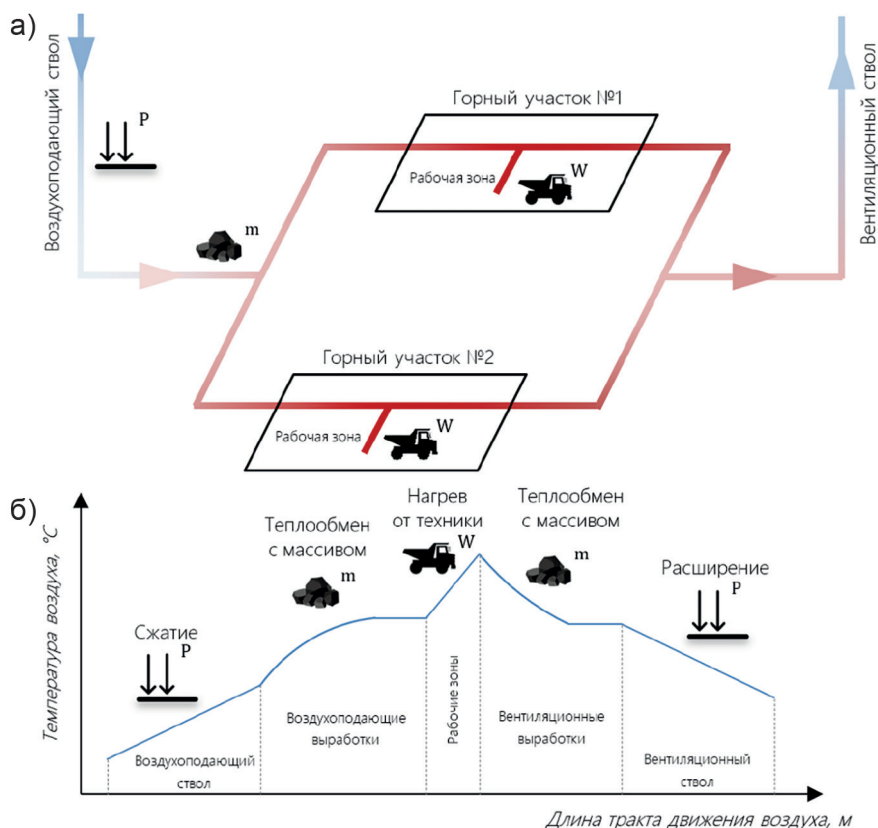


Рис. 1. Динамика нагрева воздуха в рудниках: схема расположения определяющих источников тепла в руднике (а); изменение температуры воздуха в руднике (б)

Fig. 1. Dynamics of air heating in mines: the layout of the determining heat sources in the mine (a); the change in air temperature in the mine (b)

- в вентиляционных выработках: часто понижается за счет теплообмена с менее нагретым массивом пород;

- в вентиляционных стволах: понижается за счет адиабатического расширения.

Численная реализация представленной математической модели (1), учитывающая сопряженный теплообмен воздуха с породным массивом, осуществлена в аналитическом комплексе «АэроСеть» [18], предназначенном для моделирования задач рудничной аэрологии и теплофизики.

Для исследования влияния отдельных факторов (время проветривания, расход и температура входящего воздуха, температурный градиент между воздухом и горным массивом, термическое сопротивление теплоизоляции и др.) на тепловой режим горных выработок проведена серия расчетов в программном комплексе «АэроСеть». Целью данного исследования является анализ условий эффективного применения теплоизоляции горных выработок для снижения теплопритоков от породного массива.

Анализ влияния факторов на эффективность теплоизоляции

В соответствии с третьим слагаемым зависимости (1), к ключевым факторам, определяющим эффективность теплоизоляции, относятся:

- время проветривания выработки;
- расход (скорость) воздуха;
- разность температур между поступающим воздухом и горным массивом;
- термическое сопротивление теплоизоляции, определяющее коэффициент теплоотдачи.

Далее представлен детальный анализ каждого из перечисленных параметров.

Анализ влияющих параметров выполнен на примере условий полиметаллических рудников «Норильского никеля». Однако исследуемый диапазон гор-

но-геологических и теплофизических условий (расход воздуха 20–60 м³/с, температура пород 30–45 °С, термическое сопротивление теплоизоляции 0,4–5,2 м²·°С/Вт), а также оценка критериев на относительных величинах (по отношению прироста эффекта к изменению параметра) обеспечивают репрезентативность полученных результатов для большинства глубоких рудников России, включая калийные и угольные. Это позволяет распространить установленные критерии на другие горнодобывающие предприятия.

Оценка эффективности теплоизоляции выработки в зависимости от времени ее проветривания выполнена в программном комплексе «АэроСеть». Моделирование проведено для случая отсутствия изоляции и для вариантов с теплоизоляцией, имеющей термическое сопротивление, равное 0,38; 0,63; 1,25 и 2,5 м²·°С/Вт. Выбор данных значений обусловлен их соответствием диапазону термических сопротивлений материалов, применяемых в строительстве, в том числе в рудниках [19].

Для каждого варианта рассчитано распределение температуры воздуха по длине выработки протяженностью 2 км при следующих условиях: расход воздуха — 60 м³/с, начальная температура воздуха — 20 °С, температура породного массива — 45 °С. Период моделирования — 2520 суток (7 лет). Приняты следующие теплофизические свойства горных пород: удельная теплоемкость — 540 Дж/(кг·°С), коэффициент теплопроводности — 5,2 Вт/(м·°С), плотность — 4000 кг/м³.

Эффективность теплоизоляции определялась как разность температур воздуха в конце выработки в разные моменты времени для вариантов без изоляции и с ее применением. В качестве критерия утраты эффективности принято снижение температурного эффекта

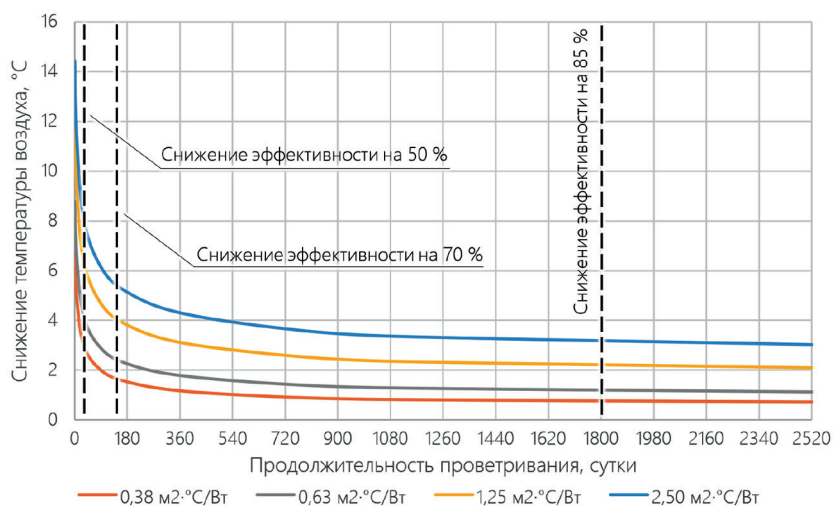


Рис. 2. Зависимость снижения температуры воздуха за счет применения теплоизоляции разной толщины от времени

Fig. 2. Dependence of air temperature reduction due to the use of insulation of different thickness on time

на 85% от значения, наблюдавшегося в первые сутки. Снижение эффективности теплоизоляции с течением времени объясняется уменьшением температурного градиента между породой и воздухом вследствие растепления горных пород [20]. Деградация теплоизоляционных свойств материала в оценке не учитывается.

Зависимость снижения температуры воздуха за счет применения теплоизоляции разной толщины от времени представлена на рис. 2.

Периоды времени, за которые эффективность теплоизоляции снижается на 50%, 70% и 85% от начального значе-

ния, а также эквивалентные им материалы и толщины представлены в таблице.

Согласно расчетам, в среднем через 1 месяц эффективность теплоизоляции снижается в 2 раза, через 6–7 месяцев — на 70%, а через 4–5 лет приближается к минимуму (снижение на 85%).

Важно отметить, что даже при снижении эффективности теплоизоляции на 50–70% она продолжает существенно снижать температуру воздуха в выработке. Однако достижение 85%-ного порога (когда абсолютный температурный эффект не превышает 1–2 °C) свидетельствует о практической утрате необходимости в дополнительном термиче-

Время, за которое эффективность теплоизоляции снижается на 50%, 70% и 85% от начального значения

Time during which the thermal insulation efficiency decreases by 50%, 70%, and 85% of the initial value

Теплоизоляция	Термическое сопротивление	Снижение эффективности		
		на 50 %	на 70 %	на 85 %
Минеральные маты (10 см)	2,50 м²·°C/Вт	58 сут	360 сут	2520 сут
Полимерное покрытие (0,3 см)	1,25 м²·°C/Вт	42 сут	218 сут	2060 сут
Раствор с вермикулитом (5 см)	0,63 м²·°C/Вт	29 сут	125 сут	1080 сут
Раствор с керамзитом (5 см)	0,38 м²·°C/Вт	27 сут	90 сут	588 сут

ском сопротивлении. Это объясняется тем, что за срок около 5 лет, соответствующий данному порогу, в породном массиве формируется развитая тепловыравнивающая рубашка, создающая естественное термическое сопротивление, соизмеримое с эффектом от искусственной теплоизоляции.

Таким образом, максимальная эффективность теплоизоляции наблюдается в первые 4–5 месяцев, тогда как через 4–5 лет ее влияние становится незначительным. В связи с этим теплоизоляцию целесообразно применять в свежепройдённых выработках, а при наличии технической возможности — выполнять ее перемонтаж в другое место через 5 лет эксплуатации.

Для оценки влияния расхода воздуха на эффективность теплоизоляции анализируется третье слагаемое в выражении (1), качественно описывающее нагрев воздуха от породного массива (°C):

$$\Delta T^m \equiv \frac{a(T_m - T_0)P}{c\rho Q} \quad (2)$$

Для получения зависимости температуры воздуха от расхода в выражении (2)

коэффициент теплоотдачи α описывается через формулу Щербаня (Вт/(м²·°C)) [21]:

$$\alpha = 3,4 \frac{v^{0,8}}{d^{0,2}}, \quad (3)$$

где v — скорость движения воздуха, м/с; d — эквивалентный диаметр выработки, м.

Подстановка выражения (3) в (2) и замена диаметра на площадь сечения выработки ($d \approx 4S/P$, где P — периметр, м) позволяют получить зависимость

$$\Delta T^m \equiv \frac{11,77(T_m - T_0)}{c\rho v^{0,2}S^{0,6}} \quad (4)$$

Для анализа вводится параметр k , прямо пропорциональный величине нагрева:

$$k = \frac{1}{v^{0,2}S^{0,6}}, \quad (5)$$

Чем выше значение k , тем интенсивнее нагрев воздуха в выработке.

На рис. 3 представлена зависимость параметра k от расхода воздуха для выработок с площадью поперечного сечения 10, 20 и 30 м², что охватывает типичный для горных выработок диапазон.

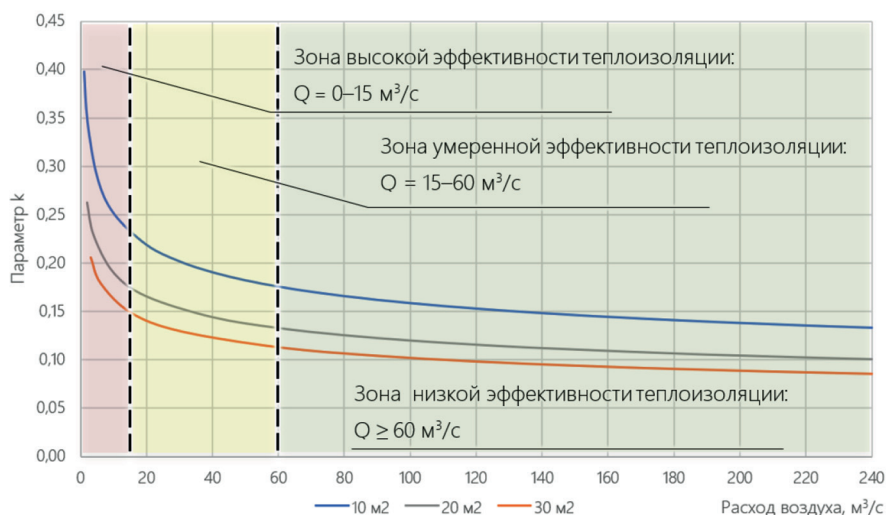


Рис. 3. Зависимость параметра k от расхода воздуха при различном сечении выработки
Fig. 3. Dependence of the k -parameter on the air flow rate at different cross-sections of the mine

Согласно расчетам, максимальный нагрев наблюдается при расходах до $15 \text{ м}^3/\text{с}$ (зона высокой эффективности теплоизоляции), значительный — до $60 \text{ м}^3/\text{с}$ (зона умеренной эффективности). При больших расходах нагрев минимален (зона низкой эффективности теплоизоляции), что объясняется законом сохранения энергии: постоянный теплоприток от породы распределяется на возросшую массу воздуха, а время контакта потока с породой сокращается.

С целью оценки влияния разности температур между воздухом T_0 и горными породами T_m на эффективность теплоизоляции проведен анализ зависимости (1). Согласно зависимости, для диапазона температур воздуха $20\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$, характерного для рудников, интенсивность теплопритока от массива к воздуху прямо пропорциональна величине температурного градиента $(T_m - T_0)$. Таким образом, полезный эффект от теплоизоляции, заключающийся в снижении этих теплопритоков, возрастает с увеличением разности температур.

Поскольку теплоизоляция горных выработок направлена на снижение нагрева воздуха от массива пород, ключевым условием ее эффективности является соблюдение следующего условия:

$$T_0 + \frac{g\Delta z}{\left(c + \frac{R}{M}\right)} + \frac{W}{c\rho Q} < T_m. \quad (6)$$

Данное условие означает, что расчетная температура воздуха с учетом нагрева от адиабатического сжатия и стационарных (постоянных) техногенных тепловыделений должна оставаться ниже естественной температуры породного массива независимо от сезонных и суточных колебаний. В противном случае, когда неравенство не выполняется, теплоизоляция препятствует естественному охлаждению воздуха массивом,

что может привести к ухудшению температурных условий в выработке.

Для определения оптимальной разности температур $(T_m - T_0)$, при которой применение теплоизоляции является целесообразным, проведен сравнительный анализ эффекта снижения температуры воздуха и эквивалентной холодильной мощности, сэкономленной за счет теплоизоляции.

Для этого в аналитическом комплексе «АэроСеть» проведено многовариантное моделирование температуры воздуха по длине выработки 2 км с учетом использования теплоизоляции и без ее применения. В расчетах приняты следующие исходные данные:

- термическое сопротивление теплоизоляции — $1,25 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (соответствует среднему значению для теплоизоляций, применяемых в рудниках);
- время проветривания — 1 год ;
- начальная температура воздуха — $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- естественная температура горных пород — $25, 35, 45, 55\text{ }^\circ\text{C}$ (разность температур между воздухом и породами ΔT : $5, 15, 25, 35\text{ }^\circ\text{C}$);
- расход воздуха — $20, 40, 60 \text{ м}^3/\text{с}$ (диапазон расходов, соответствующий наиболее эффективному использованию теплоизоляции).

Расчет сэкономленной холодильной мощности (Вт) выполнен по следующей формуле:

$$W_{\text{эк}} = \rho Q (I_{\text{б/т}} - I_{\text{с/т}}) p, \quad (7)$$

где $I_{\text{б/т}}$ — удельная энтальпия воздуха без теплоизоляции, $\text{кДж}/\text{кг}$; $I_{\text{с/т}}$ — удельная энтальпия воздуха с теплоизоляцией, $\text{кДж}/\text{кг}$; p — поправочный коэффициент, учитывающий потерю холодильной мощности по длине выработки (определяется в ходе моделирования).

В рамках данной статьи не приводится экономическая оценка пороговых значений разности температур $(T_m - T_0)$.

Хотя экономическая эффективность является основополагающим критерием в реальных условиях, ее достоверная оценка затруднена ввиду неопределенности таких факторов, как капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение системы кондиционирования и теплоизоляции выработок; срок эксплуатации выработок и, соответственно, период использования технических решений и другое.

В качестве альтернативы предлагается общая оценка эффективности теплоизоляции на основе следующей градации в зависимости от доли сэкономленной холодильной мощности СКВ, принятой как мощность, требуемая для охлаждения воздуха на 15 °С (например, с 35 до 20 °С):

- экономия менее 5% — теплоизоляция нецелесообразна;

- экономия от 5% до 10% — теплоизоляция умеренно целесообразна;
- экономия от 10% до 15% — теплоизоляция целесообразна;
- экономия свыше 15% — теплоизоляция высокоцелесообразна.

На основании выполненных расчетов получены графики экономии холодильной мощности при использовании теплоизоляции, представленные на рис. 4 с учетом предложенной градации эффективности.

Таким образом, на основании предложенной градации можно сделать вывод, что использование теплоизоляции является наиболее эффективным при разности температур между массивом и воздухом ($T_m - T_0$) не менее 25 °С.

В то же время при разности температур ($T_m - T_0$) до 7–10 °С применение теплоизоляции в общем случае является

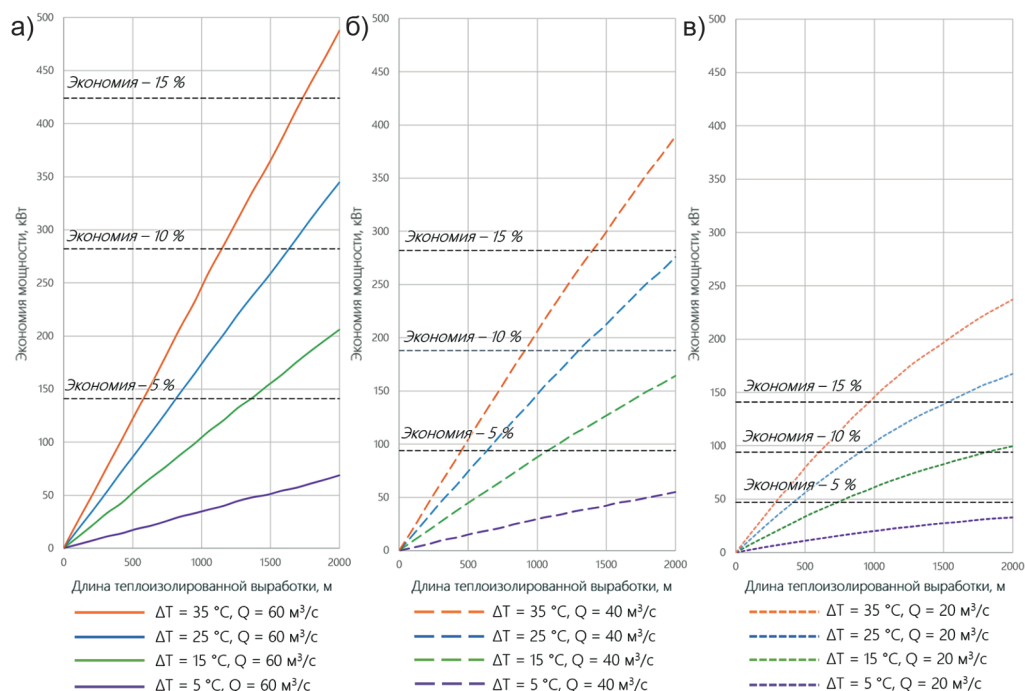


Рис. 4. Графики экономии холодильной мощности при использовании теплоизоляции, расход воздуха: 60 м³/с (а); 40 м³/с (б); 20 м³/с (в)

Fig. 4. Refrigeration capacity savings charts when using insulation, air consumption: 60 m³/s (a); 40 m³/s (b); 20 m³/s (v)

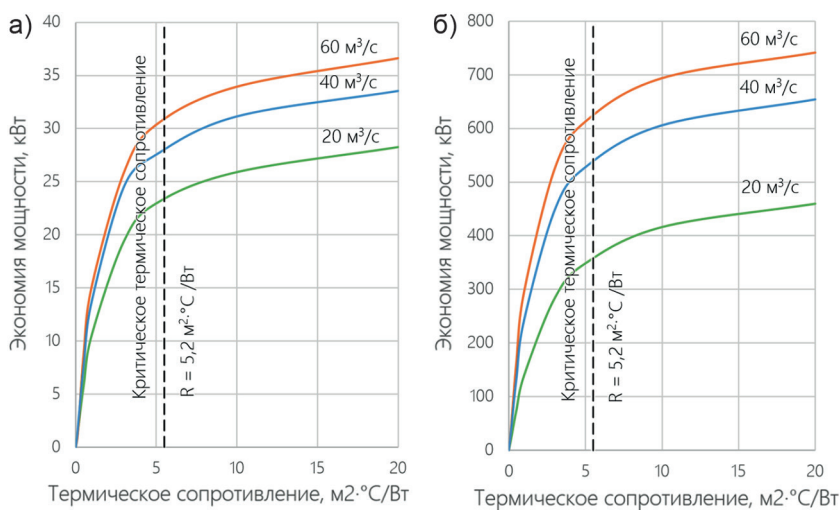


Рис. 5. Графики зависимости экономии холодильной мощности от термического сопротивления теплоизоляции, участок теплоизолирования: 100 м (а); 2000 м (б)

Fig. 5. Graphs of the dependence of refrigeration capacity savings on thermal resistance of thermal insulation, thermal insulation section: 100 m (a); 2000 m (b)

нецелесообразным ввиду ее низкой эффективности. В данном диапазоне разностей температур использование теплоизоляции может рассматриваться лишь как локальное решение, независимое от применения СКВ, для увеличения протяженности участка с допустимой температурой воздуха до рабочих зон.

Критическое термическое сопротивление представляет собой такое сопротивление теплоизоляции, при котором дальнейшее его увеличение не приводит к значимому приросту полезного эффекта и становится экономически нецелесообразным. В качестве критерия принято значение, при котором увеличение сопротивления на 20% дает прирост эффективности менее 5%. Эффективность оценивается по величине сэкономленной холодильной мощности, рассчитываемой по формуле (7).

Для определения критического термического сопротивления в аналитическом комплексе «АэроСеть» проведено многовариантное моделирование температуры воздуха по длине выработки 2 км с применением теплоизоляции и

без нее. В расчетах приняты следующие исходные данные:

- время проветривания — 1 год;
- начальная температура воздуха — 20 °С;
- естественная температура горных пород — 45 °С;
- расход воздуха — 20, 40, 60 м³/с.

На основании выполненных расчетов получены графики зависимости экономии холодильной мощности от термического сопротивления теплоизоляции для участков длиной 100 м и 2000 м, представленные на рис. 5.

Таким образом, критическое термическое сопротивление составляет 5,2 м²·°С/Вт. Дальнейшее увеличение сопротивления теплоизоляции признано нецелесообразным. Указанному значению, например, соответствует слой минеральной ваты толщиной 20 см.

Алгоритм выбора участка в руднике для теплоизоляции и расчет ее параметров

На основании проведенного анализа установлено, что применение теплоизо-

ляции является наиболее целесообразным в тупиковых свежепройдённых или сквозных выработках со следующими условиями:

- расход воздуха не превышает $60 \text{ м}^3/\text{с}$;
- разность температур между породным массивом и воздухом составляет не менее $7 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

При этом рекомендуется использование такого слоя теплоизоляции, термическое сопротивление которого не превышает $5,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (критическое значение). Также с учетом срока эффективного применения теплоизоляции экономически оправданным считается период окупаемости проекта, не превышающий 5 лет.

При проектировании теплоизоляции, применяемой в комплексе с системой кондиционирования, ключевым критерием является температура воздуха на входе в рабочую зону, которая не должна превышать предельно допустимого значения (как правило, $+26 \text{ }^\circ\text{C}$). Если в рабочей зоне присутствуют техногенные источники тепла, необходимо закладывать температурный запас подаваемого воздуха для компенсации последующего нагрева.

Теплоизоляцию как самостоятельную меру (без использования воздухоохладителя) рекомендуется рассматривать при превышении допустимой температуры более чем на $2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$. При меньших превышениях первоочередной задачей является реализация организационно-технических мероприятий, таких как оптимизация проветривания и перераспределение воздуха [22]. Эти меры позволяют нормализовать микроклимат с минимальными затратами. Теплоизоляция же рассматривается как следующая ступень технических решений, экономически оправданная при более существенных теплопритоках или когда возможности вентиляции исчерпаны.

Для выбранных на основании указанных критериев участков требуется определение оптимальных параметров теплоизоляции, а именно — длины изолируемого участка и его термического сопротивления. С этой целью рекомендуется применять следующую инженерную методику, основанную на решении обратной задачи теплообмена: по заданному требуемому снижению температуры в рабочей зоне определяются необходимая длина теплоизолированного участка и его термическое сопротивление [23]. Расчет базируется на уравнении теплового баланса с итерационной корректировкой усредненной разности температур между массивом и воздухом с учетом сопряженного теплообмена.

Шаг 1. Определяются фактические теплопритоки (Вт) в воздухоподающую выработку, рассматриваемую для теплоизоляции:

$$W_{\text{факт}} = c_p Q (T_{\text{в}}^{\text{вых}} - T_{\text{в}}^{\text{вх}}), \quad (8)$$

где $T_{\text{в}}^{\text{вх}}$ — температура воздуха в начале выработки, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{в}}^{\text{вых}}$ — температура воздуха в конце выработки (перед рабочей зоной), $^\circ\text{C}$.

Шаг 2. Определяется среднелогарифмическая разность температур ($^\circ\text{C}$) с учетом сопряженного теплообмена [24]:

$$(T_m - T_{\text{в}})_{\text{ср}} = \frac{(T_m - T_{\text{в}})_{\text{вх}} - (T_m - T_{\text{в}})_{\text{вых}}}{\text{Ln} \left(\frac{(T_m - T_{\text{в}})_{\text{вх}}}{(T_m - T_{\text{в}})_{\text{вых}}} \right)}, \quad (9)$$

где $(T_m - T_{\text{в}})_{\text{вх}}$ — разность между температурой воздуха и массива на входе в воздухоподающую выработку, $^\circ\text{C}$; $(T_m - T_{\text{в}})_{\text{вых}}$ — разность между температурой воздуха и массива на выходе из воздухоподающей выработки, $^\circ\text{C}$.

Температура воздуха принимается фактической (для существующих выработок) или прогнозной (для проектных). В первом приближении температура мас-

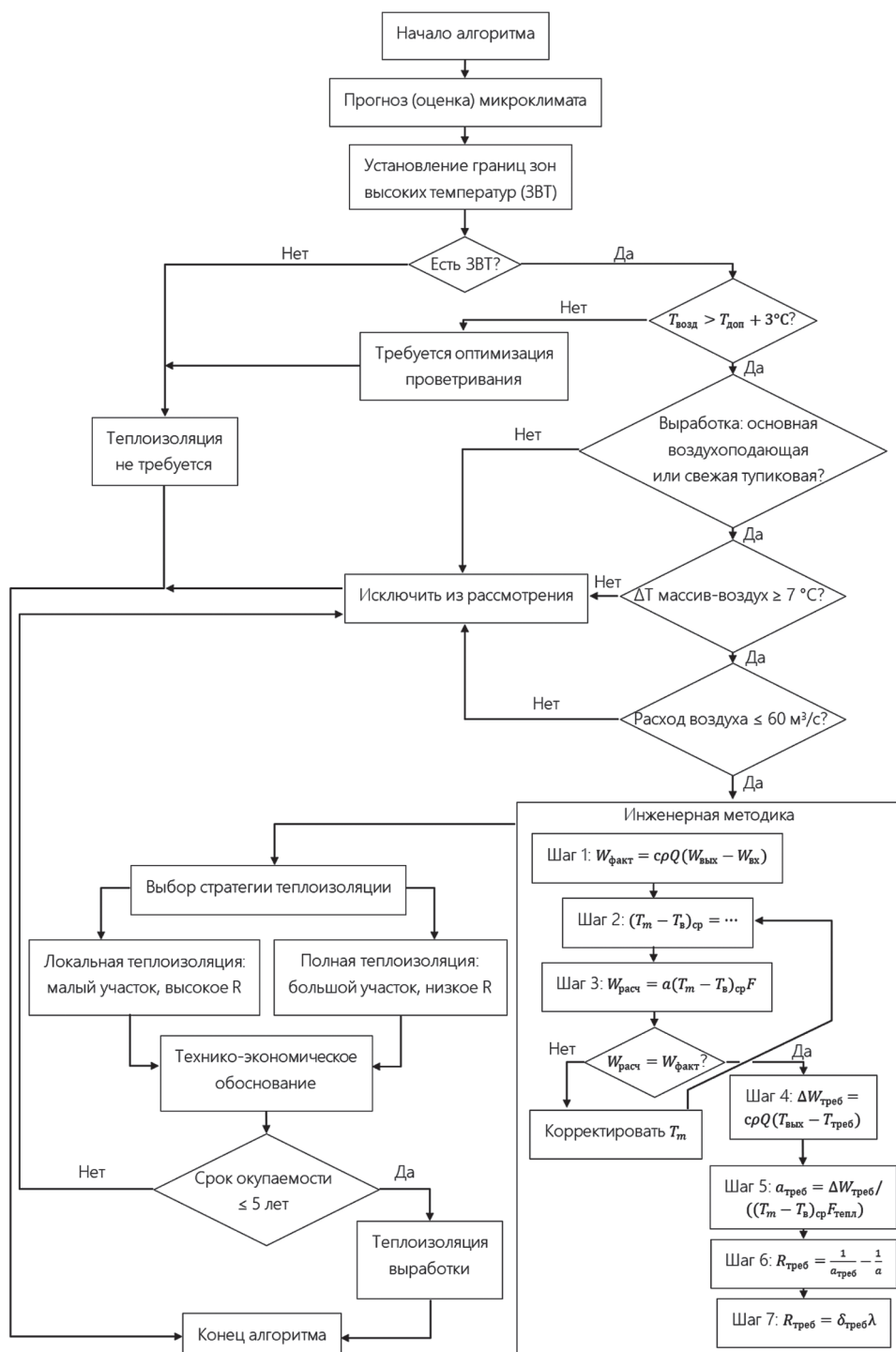


Рис. 6. Алгоритм выбора участков для теплоизоляции и расчета ее параметров

Fig. 6. Algorithm for selecting areas for thermal insulation and calculating its parameters

сива принимается равной естественной температуре непо потревоженного массива.

Шаг 3. Для проверки правильности принятой разности температур $(T_m - T_{в\text{,}cp})$ определяются характерные теплопри токи (Вт) от массива к воздуху:

$$W_{расч} = a(T_m - T_{в\text{,}cp}) F, \quad (10)$$

где a — коэффициент теплообмена, определяемый по формуле (3), Вт/(м²·°C); F — площадь поверхности теплообмена в выработке, м², определяемая как PL , где P — периметр выработки, м, L — длина выработки, м.

Если $W_{расч} \neq W_{факт}$, требуется скор ректировать температуру массива T_m в выражении (10), после чего повторить шаги 2 и 3 до тех пор, пока не выпол нится равенство $W_{расч} = W_{факт}$. В последующих расчетах слагаемое $(T_m - T_{в\text{,}cp})$ принимать с учетом данной коррек тировки.

Шаг 4. Определяется требуемое сни жение теплопритоков (Вт) в воздухопо дающей выработке, рассматриваемой для теплоизоляции:

$$\Delta W_{треб} = c p Q (T_{в\text{,}вых} - T_{в\text{,}треб}), \quad (11)$$

где $T_{в\text{,}треб}$ — требуемая температура воз духа в конце выработки (перед рабочей зоной), °C.

Шаг 5. Требуемый коэффициент теп плоотдачи для снижения температуры воздуха до требуемого значения опре деляется по формуле

$$a_{треб} = \frac{\Delta W_{треб}}{(T_m - T_{в\text{,}cp}) F_{тепл}}, \quad (12)$$

где $F_{тепл}$ — площадь поверхности, по крытая теплоизоляцией, м².

Шаг 6. Требуемое термическое со противление рассчитывается по формуле

$$R_{треб} = 1/a_{треб} - 1/a. \quad (13)$$

Шаг 7. Требуемая толщина слоя те плоизоляции определяется по формуле

$$\delta_{треб} = R_{треб} \lambda, \quad (14)$$

где λ — коэффициент теплопровод но сти теплоизоляционного материала, Вт//(м·°C).

Необходимо отметить, что предла гаемая методика позволяет сравнивать различные стратегии теплоизоляции за счет варьирования площади изолируемой поверхности $F_{тепл}$, определяемой дли ной участка. На основе расчета могут быть оценены как стратегия локальной теплоизоляции на ограниченном участ ке (требующая большего термического сопротивления), так и стратегия полной теплоизоляции по всей длине выработки (требующая меньшего сопротивления). Выбор оптимальной стратегии опреде ляется технико-экономическим расче том, учитывающим баланс между стои мостью материалов и объемом монтаж ных работ [25].

Таким образом, на основании урав нений (12) — (14) длина изолируемого участка для теплоизоляции с коэффи циентом теплопроводности λ и толщи ной слоя δ определяется по формуле

$$L = \frac{\Delta W_{треб} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a} \right)}{(T_m - T_{в\text{,}cp}) P_{тепл}}, \quad (15)$$

где $P_{тепл}$ — периметр выработки, покры тый теплоизоляцией, м.

Алгоритм выбора участков теплоизо лации и расчета ее параметров, разра ботанный на основе предложенной ме тодики, приведен на рис. 6.

Заключение

Проведенное исследование позволи ло разработать научно обоснованный подход к решению проблемы нормали зации микроклимата рудников за счет теплоизоляции горных выработок. В рам ках работы сформулирован комплекс ный алгоритм выбора участков в руд нике для теплоизоляции и расчета ее

ключевых параметров (протяженности и термического сопротивления).

В ходе анализа было установлено, что применение теплоизоляции является наиболее целесообразным в тупиковых свежeproйденных или сквозных выработках при одновременном выполнении ряда условий:

- расход воздуха $\leq 60 \text{ м}^3/\text{с}$;
- разность температур между воздухом и породой $\geq 7 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
- превышение температуры в рабочей зоне над допустимой $> 2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$;
- период окупаемости ≤ 5 лет.

При этом рекомендуется использование такого слоя теплоизоляции, термическое сопротивление которого не превышает $5,2 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (критическое значение).

Таким образом, разработанный алгоритм (см. рис. 6) представляет собой

комплексный инструмент для обоснованного принятия решений в области нормализации микроклимата посредством теплоизоляции. Он систематизирует процесс отбора выработок, нуждающихся в теплоизоляции, и предоставляет математическую основу для определения ее оптимальных параметров, что в конечном счете способствует созданию безопасных и комфортных условий труда в рудниках с неблагоприятным тепловым режимом.

В рамках продолжения настоящей работы планируется разработка детализированных рекомендаций по выбору теплоизоляционных материалов для различных условий эксплуатации, а также создание программного обеспечения, автоматизирующего процесс расчета параметров теплоизоляции по предложенному алгоритму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Б. П., Зайцев А. В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2014. — Т. 13. — № 10. — С. 91–97.
2. Кирсанов А. К., Вохмин С. А., Бархатов Д. Б. Оценка рисков при подготовке к разработке месторождения на глубоких горизонтах (на примере шахты «Глубокая» рудника «Скалистый») // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2025. — № 1. — С. 66–77.
3. Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Моделирование, расчет и управление тепловым режимом шахт и рудников при освоении месторождений полезных ископаемых на больших глубинах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 507. — № 2. — С. 363–372. DOI: 10.31857/S2686739722601636.
4. Плаксиенко О. В., Тишин Р. А., Яковенко Е. А., Мащенко А. В., Лотоцкая О. М. О влиянии горнотехнических параметров разработки на тепловые условия в горных выработках антрацитовых шахт Донбасса // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. — 2020. — № 1(48). — С. 34–39.
5. Taggart S. M., Girard O., Landers G. J., Wallman K. E. Heat exposure as a cause of injury and illness in mine industry workers // Annals of Work Exposures and Health. 2024, vol. 68, no. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1093/annweh/wxae011.
6. Mapeta T. A. Review of ventilation and cooling systems applied in deep and ultra-deep mines to improve safety and productivity: A case study of South African gold mines: Master's thesis. Johannesburg: University of Johannesburg, 2020, 120 p.
7. Плотникова Ю. А., Майбенко Н. И., Мартынов А. А. Теплоизоляция стенок горных выработок как способ регулирования тепловых условий в глубоких шахтах // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». — 2019. — № 3. — С. 421–430.
8. Подвигин К. А., Подвигина Е. В. Комплексная защита шахтера от воздействия нагревающего микроклимата в локальной рабочей зоне / Актуальные проблемы недропользования: Тези-

сы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Т. 1. — СПб.: СПбГУ, 2023. — С. 190—192.

9. *Qin Y., Hou H., Guo M., Liu Q., Tang F.* Simulated and experimental study on effect of thermal insulation layer on temperature field and heat dissipation of roadway surrounding rock // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024, vol. 53, article 103960. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103960.

10. *Галкин А. Ф.* Эффективность применения теплоизоляции в подземных сооружениях криолитозоны // *Энергобезопасность и энергосбережение*. — 2021. — № 4. — С. 18—21. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-4-18-21.

11. *Курилко А. С., Соловьев 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.

12. *Местников А. Е.* Метод оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в горных выработках криолитозоны // *Современные наукоемкие технологии*. — 2021. — № 5. — С. 75—80. DOI: 10.17513/snt.38661.

13. *Гендлер С. Г.* Теплофизические аспекты безопасности и эффективности при добыче полезных ископаемых и эксплуатации подземных сооружений в суровых климатических условиях // *Записки Горного института*. — 2006. — Т. 168. — С. 64—67.

14. *Соловьев Д. Е.* Программа расчета неравномерной толщины теплоизоляции методом дихотомии при знакопеременном тепловом режиме в горной выработке криолитозоны. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: свид. № 2025688550; заявитель и правообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН, заявл. 10.10.2025; опубл. 21.10.2025.

15. *Gilani S. B. U. H.* Insulation of deep and hot mines as a means of reducing heat loads // *Masters Abstracts International*. 2010, vol. 48, no. 05.

16. *Xiao Y., Deng H., Xie Z., He W.* Application of nanoporous super thermal insulation material in the prevention and control of thermal hazards in deep mining of metal mines // *Journal of Nanomaterials*. 2022, 10 p. DOI: 10.1155/2022/2390616.

17. *Sridharan S. J., Ghimire U., Bheemasetti T., Tukkaraja P.* Application of thermal insulation wall surface coatings in underground mines // *Journal of Industrial Safety*. 2026, vol. 3, no. 1, pp. 1—8. DOI: 10.1016/j.jinse.2025.06.001.

18. *Зайцев А. В., Казаков Б. П., Кашников А. В., Кормщиков Д. С., Круглов Ю. В., Мальков П. С., Шалимов А. В.* Аналитический комплекс «АэроСеть». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: свид. № 2015610589; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН № 2014613790, заявл. 24.04.2014; опубл. 14.01.2015.

19. *Тарасюк П. Н., Ващенко Д. А., Трубаев П. А., Радченко В. В.* Анализ термического сопротивления ограждающих конструкций различного типа по результатам инструментальных измерений // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. — 2015. — № 2. — С. 152—158.

20. *Li Y., Wan Z., Yu Z., Shi P., Zhang B., Zhang Y.* Numerical simulation research on thermal insulation performance of composite heat-insulation zone structure in hydrothermal high-temperature mine // *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 14096. DOI: 10.1038/s41598-024-64702-4.

21. *Шалимов А. В.* Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: автореферат дис. ... докт. техн. наук. — Пермь, 2012. — 34 с.

22. *Лискова М. Ю., Воронкова Ю. А., Голик В. И.* Основные способы нормализации теплового режима рудника // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2018. — № 4. — С. 85—94.

23. *Mesenev P. R.* Optimization method for solving the inverse problem of complex heat transfer // *Far Eastern Mathematical Journal*. 2023, vol. 23, no. 1, pp. 81—84. DOI: 10.47910/FEMJ202307.

24. *Лысцев С. А.* Принципы и подходы к расчету тепловых параметров воздушных завес и тепловентиляторов с водяными теплообменниками с использованием параметра Ск // *Вестник УКЦ АПИК*. — 2014. — № 1. — С. 153—156.

25. *Галкин А. Ф., Железняк М. Н., Жирков А. Ф., Панков В. Ю., Балута В. И.* Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. — 2025. — Т. 30. — № 3. — С. 404—415. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kazakov B. P., Zaitsev A. V. Research of the processes of forming the thermal regime of deep mines. *Perm journal of petroleum and mining engineering*. 2014, vol. 13, no. 10, pp. 91 – 97. [In Russ].
2. Kirsanov A. K., Vokhmin S. A., Barkhatov D. B. Assessment of risks in preparing for the development of a deposit at deep horizons (on the Example of the Glubokaya Mine of the Skalisty Mine). *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2025, no. 1, pp. 66 – 77. [In Russ].
3. Levin L. Yu., Zaitsev A. V. Modeling, calculation, and control of the thermal regime of mines and deposits during the development of mineral deposits at great depths. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022, vol. 507, no. 2, pp. 363 – 372. [In Russ]. DOI: 10.31857/S2686739722601636.
4. Plaksienko O. V., Tishin R. A., Yakovenko E. A., Mashchenko A. V., Lototskaya O. M. On the influence of mining and technical parameters of development on thermal conditions in mine workings of anthracite mines in the Donbas. *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh i zdorovykh usloviy truda v ugol'nykh shakhtakh*. 2020, no. 1(48), pp. 34 – 39. [In Russ].
5. Taggart S. M., Girard O., Landers G. J., Wallman K. E. Heat exposure as a cause of injury and illness in mine industry workers. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024, vol. 68, no. 3, pp. 325 – 331. DOI: 10.1093/annweh/wxae011.
6. Mapeta T. A. *Review of ventilation and cooling systems applied in deep and ultra-deep mines to improve safety and productivity: A case study of South African gold mines*: Master's thesis. Johannesburg: University of Johannesburg, 2020, 120 p.
7. Plotnikova Yu. A., Maybenko N. I., Martynov A. A. Thermal Insulation of Mine Workings Walls as a Method of Regulating Thermal Conditions in Deep Mines. *Electronic Network Polytematic Journal «Scientific Works of KubSTU»*. 2019, no. 3, pp. 421 – 430. [In Russ].
8. Podvigin K. A., Podvigina E. V. Comprehensive protection of a miner from the effects of heating microclimate in a local working area. *Aktual'nye problemy nedropol'zovaniya: Tezisy dokladov uchastnikov XIX Mezhdunarodnogo foruma-konkursa studentov i molodykh uchenykh*, t.1 [Current Problems of Subsoil Use: Abstracts of the XIX International Forum-Competition of Students and Young Scientists, vol. 1], Saint-Petersburg, 2023, pp. 190 – 192. [In Russ].
9. Qin Y., Hou H., Guo M., Liu Q., Tang F. Simulated and experimental study on effect of thermal insulation layer on temperature field and heat dissipation of roadway surrounding rock. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024, vol. 53, article 103960. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103960.
10. Galkin A. F. Thermal insulation efficiency for underground structures in permafrost. *Energy Safety and Energy Economy*. 2021, no. 4, pp. 18 – 21. [In Russ]. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-4-18-21.
11. Kurilko A. S., Solovyev D. E., Kiselev V. V., Alekseev K. N. Prediction of thermal regime of mine workings of a deep gold placer mine in the cryolithozone, supported by metal and combined heat-insulating shotcrete support. *Advances in current natural sciences*. 2023, no. 11, pp. 147 – 154. [In Russ]. DOI: 10.17513/use.38156.
12. Mestnikov A. E. Method for evaluating the operational efficiency of thermal insulation materials in mine workings of cryolithozone. *Modern high technologies*. 2021, no. 5, pp. 75 – 80. [In Russ]. DOI: 10.17513/snt.38661.
13. Gendler S. G. Thermophysical aspects of safety and efficiency in the extraction of minerals and the operation of underground structures in harsh climatic conditions. *Journal of Mining Institute*. 2006, vol. 168, pp. 64 – 67. [In Russ].
14. Solovyev D. E. *Certificate of state registration of computer program no. 2025688550*, 21.10.2025. [In Russ].
15. Gilani S. B. U. H. Insulation of deep and hot mines as a means of reducing heat loads. *Masters Abstracts International*. 2010, vol. 48, no. 05.
16. Xiao Y., Deng H., Xie Z., He W. Application of nanoporous super thermal insulation material in the prevention and control of thermal hazards in deep mining of metal mines. *Journal of Nanomaterials*. 2022, 10 p. DOI: 10.1155/2022/2390616.
17. Sridharan S. J., Ghimire U., Bheemasetti T., Tukkaraja P. Application of thermal insulation wall surface coatings in underground mines. *Journal of Industrial Safety*. 2026, vol. 3, no. 1, pp. 1 – 8. DOI: 10.1016/j.jinse.2025.06.001.
18. Zaitsev A. V., Kazakov B. P., Kashnikov A. V., Kormshchikov D. S., Kormshchikov D. S., Kruglov Yu. V., Mal'kov P. S., Shalimov A. V. *Computer software registration certificate No. 2015610589*, 14.01.2015. [In Russ].

19. Tarasyuk P. N., Vashchenko D. A., Trubaev P. A., Radchenko V. V. Analysis of thermal resistance of various types of enclosing structures based on instrumental measurements. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2015, no. 2, pp. 152 – 158. [In Russ].
20. Li Y., Wan Z., Yu Z., Shi P., Zhang B., Zhang Y. Numerical simulation research on thermal insulation performance of composite heat-insulation zone structure in hydrothermal high-temperature mine. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 14096. DOI: 10.1038/s41598-024-64702-4.
21. Shalimov A. V. *Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya, profilaktiki i bor'by s avariynymi narusheniyami provetrivaniya rudnikov* [Theoretical foundations of forecasting, prevention and control of emergency ventilation disturbances in mines], Doctor's thesis, Perm, 2012, 34 p.
22. Liskova M. Yu., Voronkova Yu. A., Golik V. I. The main methods of normalizing the thermal regime of a mine. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 4, pp. 85 – 94. [In Russ].
23. Mesenev P. R. Optimization method for solving the inverse problem of complex heat transfer. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2023, vol. 23, no. 1, pp. 81 – 84. DOI: 10.47910/FEMJ202307.
24. Lystsev S. A. Principles and approaches to the calculation of thermal parameters of air curtains and fan heaters with water heat exchangers using the Ck parameter. *Bulletin of the UCK APIK*. 2014, no. 1, pp. 153 – 156. [In Russ].
25. Galkin A. F., Zheleznyak M. N., Zhirkov A. F., Pankov V. Yu., Baluta V. I. The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025, vol. 30, no. 3, pp. 404 – 415. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Зайцев Артем Вячеславович¹ — д-р техн. наук, профессор,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет;
зав. лабораторией, e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,

Паршаков Олег Сергеевич¹ — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: olegparshakov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН,
лаборатория Развития горного производства.

Для контактов: Пересторонин М.О., e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.O. Perestoronin¹, Graduate Student, Engineer,
e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0003-0203-9304,
A.V. Zaitsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
Head of Laboratory, e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2314-0482,
O.S. Parshakov¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: olegparshakov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-5545-442X,

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory for the Development of Mining Industrial, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: M.O. Perestoronin, e-mail: maksim.o.perestoronin@yandex.ru.

Получена редакцией 01.04.2026; получена после рецензии 28.04.2026; принята к печати 10.09.2026.
Received by the editors 01.04.2026; received after the review 28.04.2026; accepted for printing 10.09.2026.