

УДК 519.688, 622.4
PACS 44.35.+c

Моделирование тепломассообменных процессов в горных выработках глубоких рудников в условиях частичной теплоизоляции стенок

М. А. Семин^{1,2†}, А. В. Зайцев¹, С. А. Бублик¹, М. О. Пересторонин¹,
Р. Р. Сафин^{1,2}

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

† seminma@inbox.ru

Исследовано влияние различных режимов теплоизоляции (полной, частичной и отсутствия изоляции) на тепломассообменные процессы в горных выработках глубоких рудников. В численном моделировании в ANSYS Fluent решалась стационарная задача сопряжённого тепло-массообмена в турбулентном потоке воздуха и прилегающем породном массиве; турбулентность моделировалась с использованием SST $k-\omega$. На внутренней границе задавалось условие теплообмена между воздухом и стенкой выработки; для учёта различных стадий эксплуатации рассматривались области породного массива различной толщины, имитирующие рост зоны теплового влияния. Получено, что частичная теплоизоляция без покрытия почвы снижает коэффициент теплоотдачи на 64% по сравнению с неизолированной выработкой, а разница между полной и частичной изоляцией со временем уменьшается до 14%. Показано также, что для достоверного определения эффективного коэффициента теплоотдачи требуется учитывать длину выработки порядка 500 м (≈ 100 поперечных размеров). Полученные данные полезны при проектировании мер по регулированию температурного режима выработок.

Ключевые слова: численное моделирование; тепломассоперенос; теплоизоляция; горные выработки; коэффициент теплоотдачи; модель турбулентности SST $k-\omega$

Поступила в редакцию 05.02.2026; после рецензии 28.02.2026; принята к опубликованию 02.03.2026

Modeling of heat and mass transfer processes in deep mine workings under conditions of partial wall insulation

M. A. Semin^{1,2†}, A. V. Zaitsev¹, S. A. Bublik¹, M. O. Perestoronin¹,
R. R. Safin^{1,2}

¹ Mining Institute UB RAS, Perm, Russia

² Perm State University, Perm, Russia

† seminma@inbox.ru

We investigate the influence of different insulation regimes (full insulation, partial insulation, and no insulation) on heat and mass transfer processes in deep mine workings. A steady-state conjugate heat and mass transfer problem was solved in ANSYS Fluent for a turbulent airflow and the surrounding rock mass, with turbulence modeled using the SST $k-\omega$ approach. Thermal interaction between the air and the wall surface was specified at the inner boundary; domains of varying rock thickness were considered to simulate different stages of mine working operation and the growth of the thermal influence zone. The results show that partial insulation without floor coverage reduces

the heat transfer coefficient by 64 % compared with the uninsulated case, while the difference between full and partial insulation decreases to 14 % over time. It is also shown that reliable estimation of the effective heat transfer coefficient requires considering a working length of about 500 m (≈ 100 cross-sectional dimensions). The findings are useful in designing thermal control measures for deep mine workings.

Keywords: numerical simulation; heat and mass transfer; thermal insulation; mine workings; heat transfer coefficient; SST $k-\omega$ model

Received 05 February 2026; revised 28 February 2026; accepted 02 March 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-23-32

1. Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых на глубинах свыше 1500 м связана с ухудшением тепловых условий в горных выработках. Естественная температура породного массива на таких глубинах может достигать значений 35–52 °С, что обуславливает интенсивный теплоперенос от массива к воздушному потоку [1]. Это приводит к повышению температуры воздуха в выработках выше допустимых значений, угрожает здоровью персонала, снижает эффективность вентиляции и увеличивает энергозатраты на охлаждение.

Одним из наиболее распространённых методов снижения теплоотдачи является теплоизоляция стенок горных выработок, которая направлена на искусственное увеличение термического сопротивления на границе «породный массив – воздух». Применение теплоизоляционных материалов позволяет не только снизить тепловой поток, но и уменьшить испарение влаги из со стенок породного массива, положительно влияя на микроклимат [1].

В работе [1] приведён обзор конструктивных решений по теплоизоляции горных выработок (пенополиуретан, вермикулитобетон, эластичные воздушные ёмкости). Показано, что применение теплоизоляции наиболее эффективно в свежeproйдённых выработках и на участках с искусственным охлаждением воздуха, где важно ограничить тепловой приток на ранних стадиях эксплуатации.

В [2] предложена методика расчёта теплоизоляции переменной толщины по длине выработки с учётом сезонных колебаний температуры воздуха. Обоснована целесообразность дифференцированного покрытия поверхности вместо равномерной изоляции по всему периметру. В работе [3] исследовано применение набрызг бетонных теплозащитных покрытий, подтвердившее возможность регулирования теплового потока за счёт частичного покрытия выработки. Таким образом, результаты [2, 3] указывают на перспективность изменения схемы и степени теплоизоляции.

Наряду с этим сегодня разрабатываются локальные технические решения для снижения теплового воздействия в рабочих зонах. В [4] показано, что применение экранов и установок локального охлаждения позволяет уменьшить размеры зон повышенной температуры на 20–35 %. Экспериментальные исследования [5] также подтверждают, что

частичная теплоизоляция может снижать тепловой поток на 30–40 % по сравнению с отсутствием изоляции, особенно при невозможности покрытия почвы выработки.

Современные исследования акцентируют внимание на энергоэффективности подземных сооружений. В [6] показано, что оптимизация схемы теплоизоляции позволяет сократить затраты на вентиляцию и кондиционирование, причём частичные и адаптивные решения рассматриваются как экономически целесообразная альтернатива полной изоляции.

Комплексные системы кондиционирования воздуха применяются на глубоких рудниках [7–9], однако их эффективность снижается с увеличением длины вентиляционного пути. При протяжённости выработок свыше 1–2 км охлаждённая воздушная струя интенсивно нагревается от контакта с разогретыми стенками, что делает кондиционирование малоэффективным без дополнительных мер по теплоизоляции.

Тем не менее, большинство исследований ограничивались рассмотрением лишь полной теплоизоляции выработки. При этом вопросы частичной теплоизоляции, особенно в сложных условиях, а именно при невозможности изолировать почву выработки (например, из-за постоянного движения техники), не освещены. Кроме того, вопросы моделирования теплоизоляции в выработках обычно основываются на упрощённых численных или аналитических моделях. Такие модели не учитывают в полной мере геометрию выработки и теплообмен в сопряжённой постановке в системе «выработка–теплоизоляция–породный массив».

На основе вышесказанного, целью настоящей работы являлось исследование процессов тепло- и массопереноса в протяжённой горной выработке при различных параметрах теплоизоляции и степени покрытия поверхности выработки. Для достижения данной цели было проведено многопараметрическое трёхмерное численное моделирование в системе «породный массив–теплоизоляция–горная выработка».

Здесь важно отметить, что на сегодня численное моделирование с использованием методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD) является популярным и эффективным инструментом анализа аэрогазодинамических и тепловых процессов в подземных условиях. Оно позволяет учитывать

турбулентность потока, неоднородность материалов и сложную геометрию выработки, обеспечивая расчёт температурных полей и коэффициентов теплоотдачи. Несмотря на широкое применение CFD в задачах шахтной вентиляции и теплообмена [10, 11], вопросы детального моделирования теплоизоляции выработок остаются недостаточно проработанными.

2. Постановка задачи

Для количественной оценки теплового взаимодействия между воздухом, теплоизоляцией и окружающим породным массивом в условиях глубоких горных выработок была разработана трёхмерная вычислительная модель. Это моделирование проводится с использованием сопряжённой постановки, позволяющей одновременно учитывать нестационарный теплообмен, влияние теплоизоляции и динамику воздушного потока. Такой подход обеспечивает необходимую точность в задачах с выраженной геометрической сложностью и переменными тепловыми условиями, характерными для подземных объектов.

Расчётная область представляла собой горную выработку длиной 500 м, шириной 4.9 м и высотой 4.4 м (рис. 1–3). Было рассмотрено два варианта толщины окружающего породного массива – 0.5 м и 15 м, что соответствует сценариям краткосрочной и длительной эксплуатации горной выработки. В рамках принятой модельной постановки толщина слоя породного массива характеризовала то, насколько сильно вглубь массива успело распространиться тепловое воздействие от воздуха, движущегося по горной выработке.

Основным показателем, использованным в исследовании для оценки эффекта теплоизоляции, являлся средний коэффициент теплоотдачи на стенке горной выработки. Представляло интерес исследование величины этого коэффициента как при различных глубинах распространения теплового воздействия в породном массиве, так и при различных длинах горной выработки и различных режимах теплоизоляции.

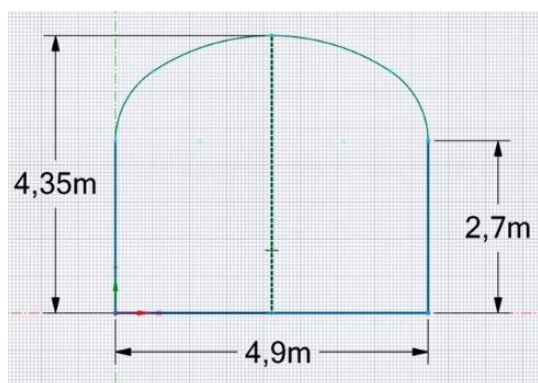


Рис. 1. Основные геометрические параметры выработки в поперечном сечении

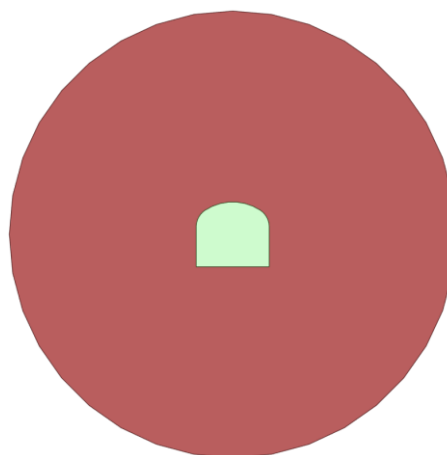


Рис. 2. Геометрическая модель горной выработки с толщиной породы 15 м

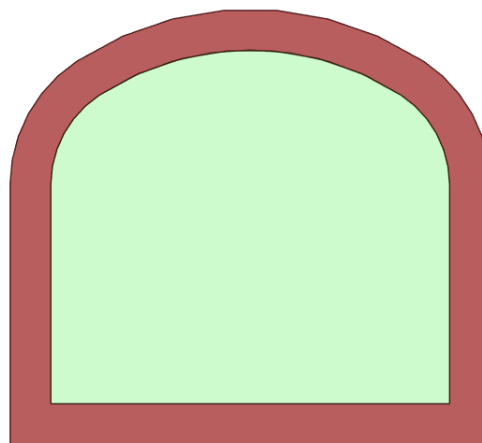


Рис. 3. Геометрическая модель горной выработки с толщиной породы 0.5 м

Физические свойства породного массива принимались следующими: теплопроводность – 5.2 Вт/(м·°С), плотность – 4760 кг/м³, удельная теплоёмкость – 539 Дж/(кг·°С). Данные свойства соответствуют скальной породе. Температура породы на внешней границе принималась равной 35 °С. Поток воздуха на входе в горную выработку задавался с температурой 20 °С и средней скоростью 1 м/с.

Теплоизоляция в модели рассматривалась в трёх конфигурациях, отличающихся степенью охвата поверхности выработки (см. рис. 4). В первом варианте применялась полная изоляция – все внутренние поверхности (кровля, боковые стенки и почва) были покрыты теплоизоляционным материалом одинаковой толщины. Во втором случае реализована частичная изоляция, при которой почва оставалась неизолированной, а кровля и боковые стенки были изолированы. В третьем варианте теплоизоляционный материал отсутствовал полностью. В качестве материала использовался вермикулитобетон толщиной 0.1 м, с теплопроводностью 0.2 Вт/(м·°С), плотностью 800 кг/м³ и удельной теплоёмкостью 840 Дж/(кг·°С).

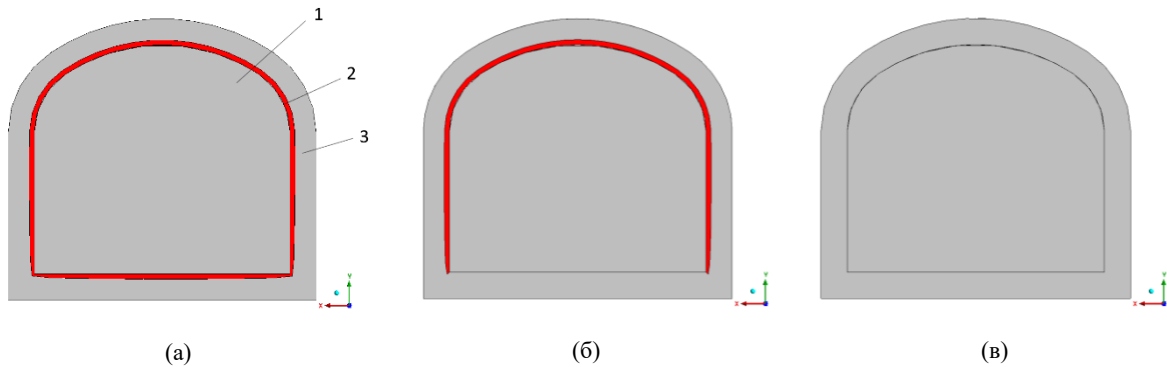


Рис. 4. Разные типы изоляции: полная (а), частичная (б), отсутствие (в); 1 – воздушное пространство горной выработки, 2 – изоляция, 3 – породный массив

Для численного моделирования была построена расчётная сетка (см. рис. 5, 6), состоящая из трёх доменов: внутренней области выработки, теплоизоляционного слоя и породного массива. Внутри выработки использовалась преимущественно структурированная сетка с гексаэдрическими элементами, обеспечивающая высокую точность расчета турбулентного потока. Для адекватного моделирования пограничного слоя было выполнено локальное сгущение ячеек в пристеночной зоне, что позволяло повысить точность расчёта температурных и скоростных градиентов в приповерхностных зонах.

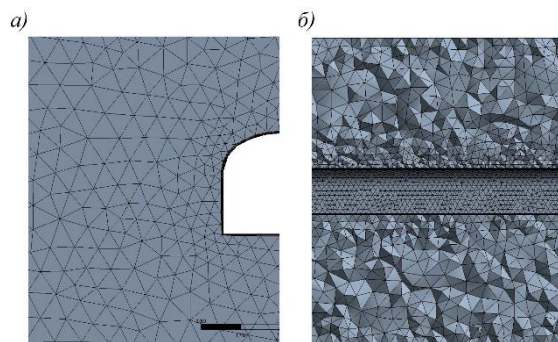


Рис. 5. Численная сетка для толщины породы 15 метров, поперечный (а) и продольный (б) разрезы расчётной области

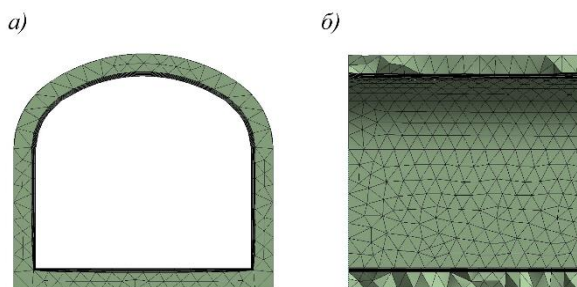


Рис. 6. Численная сетка для толщины породы 0.5 метра, поперечный (а) и продольный (б) разрезы расчётной области

В области теплоизоляционного слоя сетка дополнительно сгущалась, чтобы обеспечить отражения возможных нелинейностей в распределении температуры и тепловых потоков по толщине теплоизоляции. Общее количество ячеек в расчётной модели составило 2.7 млн для тонкого породного массива и 3.1 млн для породного массива увеличенной толщины, что обеспечило необходимую точность при сохранении вычислительной устойчивости.

3. Описание математической модели

Для исследования теплообмена в горных выработках с различными вариантами теплоизоляции были применены методы вычислительной гидродинамики. Моделирование проводилось в стационарной постановке, так как основной интерес представлял установившийся тепловой режим выработки, который определяет долгосрочные условия микроклимата и является ключевым для практического применения результатов. Расчёты проводились в программной среде ANSYS Fluent, позволяющей одновременно описывать теплообмен в воздухе, горном массиве и теплоизоляционном слое. Число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру выработки, составляет порядка 10^5 , что соответствует развитому турбулентному режиму течения. В связи с этим течение воздушного потока принималось турбулентным.

Математическая модель основывалась на усреднённых по Рейнольдсу уравнениях неразрывности, Навье–Стокса и энергии: [12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot \{(\mu + \mu_t)[\nabla V + (\nabla V)^T]\}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [V(\rho E + p)] = \nabla \cdot [(\lambda + \lambda_t)\nabla T], \quad (3)$$

где t – время, с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – вектор скорости воздушного потока, м/с; p – давление, Па; μ – молекулярная вязкость, Па·с; μ_t – турбулентная вязкость, Па·с; E – удельная энергия воздушного потока, Дж/кг; λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, Вт/(м·°C); λ_t – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·°C); T – температура, °C; τ – тензор турбулентных напряжений, Па.

Уравнение неразрывности (1) выражает фундаментальный закон сохранения массы для несжимаемого потока и утверждает, что масса, входящая в элементарный объём, равна массе, выходящей из него, при условии отсутствия источников и стоков внутри рассматриваемого объёма.

В уравнении Навье–Стокса (2), описывающем закон сохранения импульса, левая часть описывает инерционные силы, а правая – градиент давления и вязкостные напряжения. Эти компоненты позволяют учитывать сопротивление воздуха, возникающее при его движении вдоль изолированных и неизолированных стенок выработки.

Уравнение энергии (3) описывает теплообмен с учётом как конвективного переноса энергии воздушным потоком, так и теплопроводности в твёрдых телах (изоляция и порода), где движение потока отсутствует ($u = 0$). Коэффициент турбулентной теплопроводности принимается пропорциональным турбулентной вязкости, где в качестве коэффициента пропорциональности используется величина c_p/Pr_t c_p – удельная теплоёмкость воздуха, Pr_t – турбулентное число Прандтля (равно 0.85).

Замыкание системы уравнений (1)–(3) производилось посредством двухпараметрической модели турбулентности SST k - ω , которая обеспечивает корректное описание течения вблизи стенок и применима для задач со сложной геометрией и неравномерным тепловым полем [13]. При этом турбулентная вязкость, входящая в состав эффективной вязкости, рассчитывалась по формуле [14]:

$$\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}, \quad (4)$$

где μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $\alpha_1 = 0.31$ – безразмерная эмпирическая константа; k – турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ω – удельная скорость диссипации, 1/с; $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ – модуль тензора скоростей деформации, 1/с; F_2 – безразмерная функция.

В области породного массива решалось уравнение тепловой диффузии в стационарной постановке. На внешней границе задавалась температура непо потревоженного массива, на внутренней – граничное условие четвёртого рода, описывающее тепловое взаимодействие с воздушным потоком.

Следует отметить, что в действительности температурное поле в массиве носит нестационарный

характер, а скорость его изменения убывает со временем по экспоненциальному закону. Однако в рамках настоящего исследования распределение температур по времени не являлось предметом рассмотрения; был важен лишь радиальный градиент температурного поля, определяющий тепловой поток к выработке. Влияние длительности эксплуатации и роста зоны теплового влияния учитывалось упрощённо – через анализ двух различных толщин домена, соответствующих породному массиву. При необходимости возможно сопоставить конкретные времена эксплуатации выработки с градиентами температур, создаваемыми на стенке выработки в рассматриваемой постановке, однако это не являлось предметом настоящего исследования.

4. Анализ результатов моделирования

В ходе моделирования в первую очередь была определена интенсивность теплоотдачи между воздухом в выработке и породным массивом при различной теплоизоляции выработки. Для этого был произведён расчёт коэффициента теплоотдачи с помощью известной формулы для плотности теплового потока [15]:

$$q = \alpha(T_c - T_{ave}), \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи (предполагается постоянство в длине выработки), Вт/(м²·°C); T_c – температура между теплоизоляцией и породой, °C; T_{ave} – средняя температура воздуха по поперечному сечению выработки, °C.

На основании данных численного моделирования и формулы (5) были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи для случаев полной и частичной теплоизоляции при толщине породы 15 м:

- α (полная теплоизоляция): 1.575 Вт/(м²·°C).
- α (частичная теплоизоляция): 1.445 Вт/(м²·°C).

На рис. 7 представлены модельная и рассчитанная по формуле (5) плотность теплового потока в зависимости от пространственной координаты вдоль оси выработки. Длина выработки была равна 500 м, при этой участок гидродинамической и тепловой стабилизации потока в начале выработки исключён из анализа (отсчёт по оси абсцисс x начинается от входного сечения горной выработки “inlet”). Из данного рисунка видно, что формула (5) способна с достаточно хорошей точностью описать изменение плотности теплового потока по длине выработки.

Модельная плотность теплового потока получена путём подстановки в (5) решения аналитического уравнения теплового баланса:

$$\rho c_p \frac{dT}{dx} = \frac{\alpha P}{S} (T_c - T), \quad (6)$$

с граничным условием в начале выработки

$$T(0) = 20^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; x – координата вдоль оси выработки, м; $T = T(x)$ – средняя по поперечному сечению температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; P – периметр поперечного сечения выработки, м; S – площадь поперечного сечения выработки, м^2 .

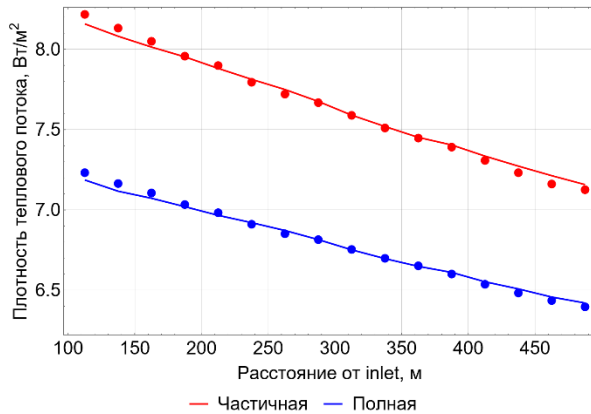


Рис. 7. Зависимость плотности теплового потока от типа изоляции для толщины породы 15 м (точками обозначены данные численного моделирования, сплошной – аналитический расчёт по формуле (5), с подобранным коэффициентом теплоотдачи)

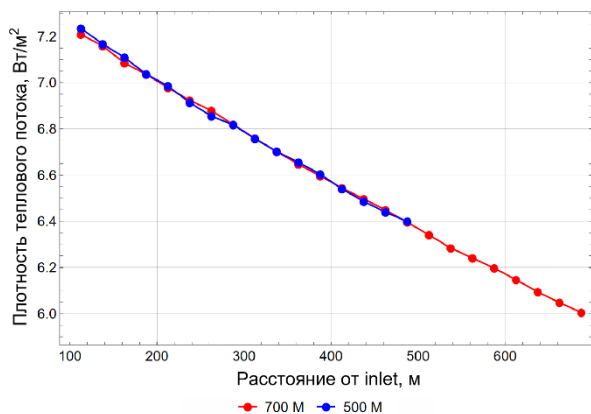


Рис. 8. Сравнение коэффициентов теплоотдачи между выработками разной длины при толщине породы 15 м (точками обозначены данные численного моделирования, сплошной – аналитический расчёт по формуле (5), с подобранным коэффициентом теплоотдачи)

Соответствие численно рассчитанных точек с аналитической кривой $q(x)$ указывает на то, что одномерная модель (6)–(7) с предположением о постоянстве коэффициента теплоотдачи по длине выработки обосновано для дальнейшего анализа и может применяться для теоретической интерпретации модельной плотности теплового потока.

Для проверки влияния длины выработки на результаты расчётов коэффициента теплоотдачи, был проведён сравнительный анализ выработок длиной 500 и 700 м в условиях полной теплоизоляции (см. рис. 8). Были получены следующие результаты:

- α (700 метров): $1.237 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.
- α (500 метров): $1.238 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Сравнение коэффициентов теплоотдачи показывает, что разница между моделями составляет около 0.1 %, что является несущественным отклонением и не оказывает влияния на выводы исследования. При одинаковых условиях, различия в теплоотдаче между этими вариантами практически отсутствуют, а значит изначально выбранной длины 500 м достаточно для модельного определения коэффициента теплоотдачи. Вариант длины 500 м был принят для дальнейших расчётов.

Для оценки влияния толщины породы и типа теплоизоляции на изменение плотности теплового потока в выработке, был проведён сравнительный анализ численных результатов (см. рис. 9).

Табл. 1. Зависимость α от толщины породного массива и типа теплоизоляции

| Теплоизоляция | Толщина породы 0.5 м | Толщина породы 15 м |
|---------------|----------------------|---------------------|
| Полная | 1.16 | 1.24 |
| Частичная | 1.45 | 1.46 |
| Без | 4.03 | 4.09 |

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о высокой эффективности частичной теплоизоляции стенок горных выработок в условиях глубоких рудников. При толщине породного массива 0.5 м применение частичной теплоизоляции приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на 64% по сравнению с отсутствием теплоизоляции. При этом дополнительное применение теплоизоляции на почве выработки (полная теплоизоляция) обеспечивает лишь дополнительное снижение коэффициента теплоотдачи на 20–30% (до $1.157 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$).

Также представляется результат для случая толщины породного массива 15 м, где частичная теплоизоляция также снижает коэффициент теплоотдачи на 64% (с 4.089 до $1.455 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$). Однако разница между частичной и полной теплоизоляцией становится незначительной – всего 14%.

Для понимания того, как будет влиять толщина породы на охлаждение выработки, проведено сравнение результатов средних температур по сечению выработок (рис. 10).

Из табл. 2 видно, что при толщине породы 0.5 м, полная теплоизоляция снижает температуру воздуха на $3.14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с отсутствием изоляции, а частичная – на $1.93 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При толщине породы 15 м, разница между отсутствием изоляции и частичной составляет $0.66 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а между отсутствием изоляции и полной – $0.96 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Это показывает, что эффективность теплоизоляции уменьшается с течением времени по мере охлаждения породного массива, увеличения зоны теплового возмущения в породном массиве. Однако различия между полной и частичной изоляцией на поздних этапах эксплуатации горной выработки по-прежнему являются незначительными.

Табл. 2. Средняя температура воздуха в поперечном сечении на конце горной выработки как функция толщины слоя породного массива и типа теплоизоляции

| Теплоизоляция | Толщина породы 0.5 м | Толщина породы 15 м |
|---------------|----------------------|---------------------|
| Полная | 23.80 | 22.26 |
| Частичная | 25.01 | 22.56 |
| Без | 26.94 | 23.22 |

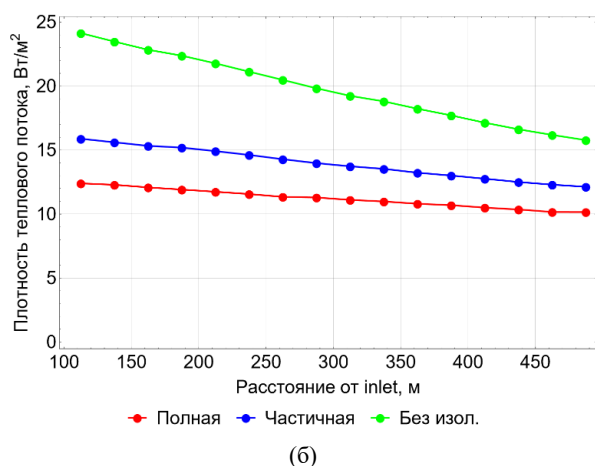
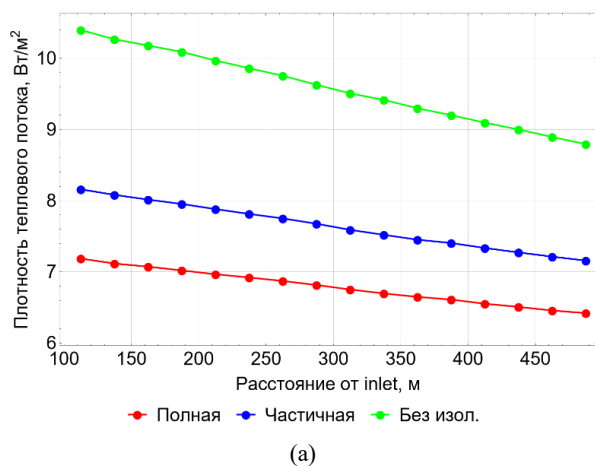


Рис.9. Зависимости плотности теплового потока от толщины породы и типа теплоизоляции (а – результаты для выработок со слоем породы толщиной 15 м, б – результаты для выработок со слоем породы толщиной 0.5 м)

Также был проведен анализ распределения температуры в поперечном сечении на конце горной выработки. Для этого были построены поля температуры при различных условиях теплоизоляции и толщины породы (см. рис. 11 и 12). Анализ проводился для сечения на выходе из выработки, поскольку там неоднородность и перепад температурного поля достигает наибольших значений. Длина выработки в данном случае также принималась равной 500 м.

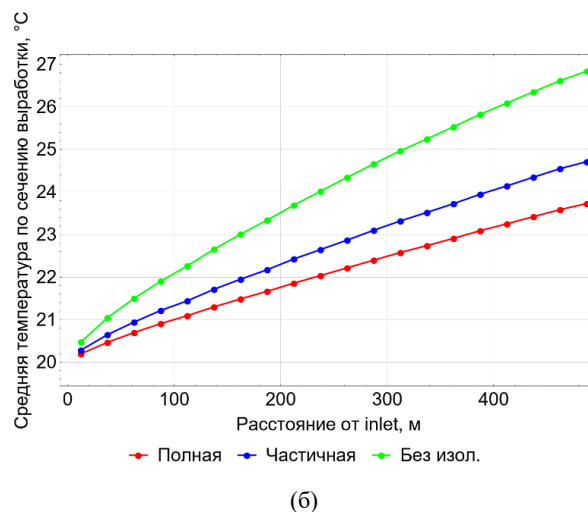
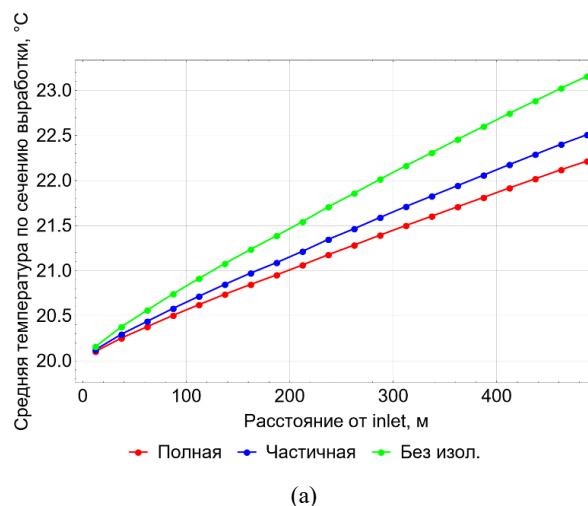


Рис.10. Зависимости средней температуры по сечению от толщины породы и типа изоляции (а – результаты для выработок с породой толщиной 15 м, б – результаты для выработок с породой толщиной 0.5 м)

Из рис. 11, 12 можно увидеть, что при малой толщине зоны теплового влияния породного массива разница между рассмотренными вариантами теплоизоляции выражена наиболее отчетливо: в случае отсутствия теплоизоляции наблюдается относительно однородный прогрев всех стенок выработки, а область минимальных температур локализуется в ядре потока (в центре поперечного сечения выработки). При частичной теплоизоляции, напротив, вследствие более интенсивного нагрева почвы, происходит дополнительный подогрев прилегающих стенок, что приводит к перераспределению температурного поля: зона наименьших температур смещается вверх – к кровле выработки. С увеличением толщины породного массива влияние теплоизоляции ослабевает, температурные поля выравниваются, и различия между вариантами становятся менее заметными.

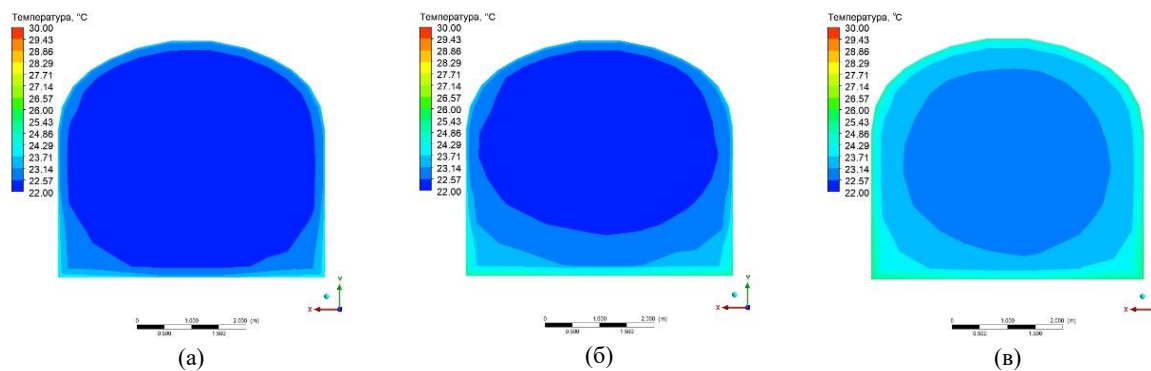


Рис. 11. Поля температуры на расстоянии 500 метров от начала выработки с разными типами теплоизоляции с толщиной породы 15м (а – полная, б – частичная, в – без теплоизоляции).

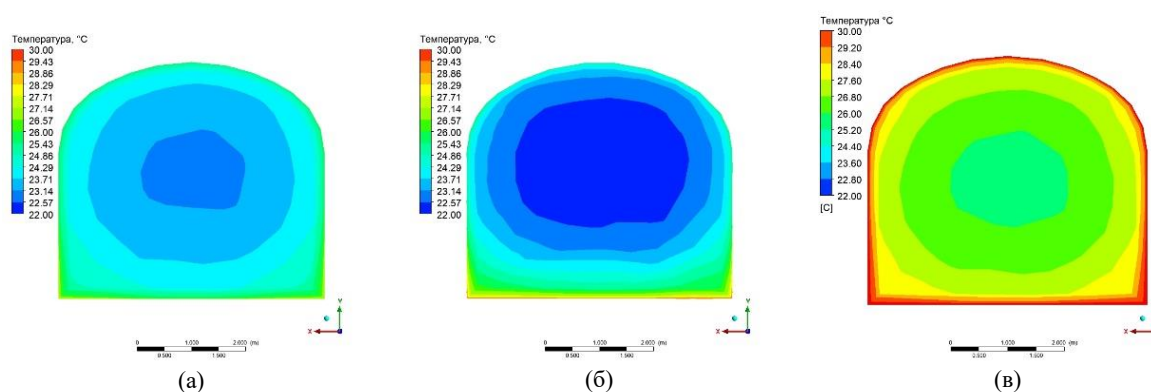


Рис. 12. Поля температуры на расстоянии 500 метров от начала выработки с разными типами теплоизоляции с толщиной породы 0.5м (а – полная, б – частичная, в – без теплоизоляции).

Таким образом, частичная теплоизоляция выработок представляет собой технологически обоснованное решение для регулирования микроклимата в выработках глубоких рудников в первые годы их эксплуатации. Крайне важным является применение частичной теплоизоляции сразу после проходки выработки, так как в первые месяцы эксплуатации наблюдается максимальный тепловой поток между воздухом и свежесоблаженной горной породой. Применение теплоизоляции в длительное время эксплуатируемых выработках малоэффективно, поскольку горная порода вокруг выработки к этому моменту уже существенно охладится, и теплообмен между породой и выработкой станет незначительным.

Ещё раз отметим, что идея применения теплоизоляции стенок выработок здесь заключается в перераспределении теплового потока во времени: избежать избыточных и интенсивных тепловыделений от породного массива к воздуху на начальном временном промежутке проветривания горной выработки, а распределить её на продолжительный период времени. За счёт этого на начальных стадиях эксплуатации выработки, когда разница температур «порода–воздух» максимальна, прирост температуры воздуха существенно умень-

шается, что приводит к более благоприятным микроклиматическим условиям. При этом в предельном же случае (при больших временах, десятки лет) температурное состояние системы стремится к одной и той же картине независимо от режима теплоизоляции.

5. Выводы

В работе выполнено численное моделирование теплообмена между воздушным потоком и стенкой горной выработки с различными вариантами ее теплоизоляции. Построенная трёхмерная модель учитывала движение воздуха, теплоизоляционный слой, и теплоперенос в породном массиве. Рассмотрены два варианта толщины слоя породного массива, охлажденного в результате взаимодействия с воздушным потоком (0.5 и 15 метров), что позволило рассмотреть как краткосрочный, так и долгосрочный периоды эксплуатацию горной выработки.

Из результатов моделирования теплопереноса в турбулентном воздушном потоке в горной выработке и теплообмена с окружающим породным массивом определены коэффициенты теплоотдачи. Это позволило количественно оценить эффективность различных схем

теплоизоляции горной выработки. Показано, что теплоизоляция уменьшает интенсивность теплоотдачи по сравнению с неизолированной выработкой. При этом частичная теплоизоляция обеспечивает существенный эффект, выраженный в снижении теплоотдачи и может рассматриваться как эффективное решение для регулирования теплового режима горных выработок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, рег. номер 126012716039-2.

Список литературы

1. Плотникова Ю. А., Майбенко Н. И., Мартынов А. А. Теплоизоляция стенок горных выработок как способ регулирования тепловых условий в глубоких шахтах // Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С. 421–430.
2. Соловьев Д. Е. Расчет неравномерной теплоизоляции при знакопеременном тепловом режиме в горной выработке криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 10. С. 263–267.
3. Курилко А. С. Применение набрызгбетонных теплозащитных покрытий в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 12. С. 147–152.
4. Подвигин К. А., Подвигина Е. В. Комплексная защита шахтера от воздействия нагревающего микроклимата в локальной рабочей зоне // Безопасность жизнедеятельности. 2023. № 3. С. 190–192.
5. Мартынов А. А., Малеев Н. В., Яковенко А. К. Комплексный подход в решении проблемы высоких температур воздуха в выработках глубоких шахт // Матер. VI межд. науч.-пр. конф. «Школа подземной разработки» 2012. С. 39–47.
6. Sridharan S. J. et al. Application of thermal insulation wall surface coatings in underground mines // Journal of Industrial Safety. 2026. Vol. 3, № 1. DOI: 10.1016/j.jinse.2025.06.001
7. Круглов Ю. В. Методы борьбы с повышенными температурами шахтной атмосферы в рабочих зонах нефтяных шахт Ярегского нефтяного месторождения // Горное эхо. 2019. № 4. С. 120–127. DOI: 10.7242/echo.2019.4.26
8. Зайцев А. В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников. дисс. ... д.т.н., Пермь: ПНИПУ, 2019. 247 с.
9. 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. С. 72–79. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16
10. Yi H. et al. Applications of computational fluid dynamics for mine ventilation in mineral development // Energies. 2022. Vol. 15. № 22, 8405.
11. Xu G. et al. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. Vol. 31, № 4. P. 251–275.
12. Versteeg H. K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Hoboken: Pearson Prentice Hall, 2007. 520 p.
13. Москвичев А. В. Применимость моделей турбулентности, реализованных в Ansys CFX, для исследования газодинамики в щелевом канале ТНА ЖРД // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9, № 5–1. С. 82–85.
14. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003. Vol. 4, № 1. С. 625–632.
15. Толстова Ю. И., Шумилов Р. Н. Основы строительной теплофизики. Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2014. 104 с.

References

1. Plotnikova Yu. A., Maybenko N. I., Martynov A. A. Thermal insulation of roadway walls as a method for thermal conditions control in deep mines. *Scientific Papers of Kuban State Technological University*, 2019, no. 3, pp. 421–430. (In Russian).
2. Soloviev D. E. Raschet neravnomernoi teploizolitsii pri znakoperemennom teplovom rezhime v gornoi vyrabotke kriolitozony [Calculation of uneven thermal insulation under alternating thermal conditions in a mine working in the cryolitozone]. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2008, no. 10, pp. 263–267 (In Russian).
3. Kurilko A. S. Primenenie nabryzgbetonnnykh teplozashchitnykh pokrytii v usloviakh kriolitozony [Application of shotcrete thermal insulation coatings in cryolitic zone conditions]. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2005, no. 12, pp. 147–152 (In Russian).
4. Podvigin K. A., Podvigina E. V. Kompleksnaia zashchita shakhtera ot vozdeistviia nagrevaishchego mikroklimate v lokal'noi rabochei zone [Comprehensive protection of miners from the effects of a heating microclimate in a local working area]. *Life Safety*, 2023, no. 3, pp. 190–192 (In Russian).
5. Martynov A. A., Maleev N. V., Yakovenko A. K. Kompleksnyi podkhod v reshenii problemy vysokikh temperatur vozdukha v vyrabotkakh glubokikh shakht [An integrated approach to solving the problem of high air temperatures in deep

- mine workings]. *Proc. of the VI Int. Conf. "Mining School"*, 2012, pp. 39–47 (In Russian).
6. Sridharan S. J. et al. Application of thermal insulation wall surface coatings in underground mines. *Journal of Industrial Safety*, 2026, vol. 3, no. 1. DOI: 10.1016/j.jinse.2025.06.001
 7. Kruglov Yu. V. Metody bor'by s povyshennymi temperaturami shakhtnoi atmosfery v rabochikh zonakh neftianykh shakht Iaregskogo neftianogo mestorozhdeniia [Methods of combating elevated temperatures of the mine atmosphere in the working areas of the oil mines of the Yarega oil field]. *Gornoe ekho* [Mountain Echo], 2019, no. 4, pp. 120–127. DOI: 10.7242/echo.2019.4.26 (In Russian)
 8. Zaitsev A. V. *Nauchnye osnovy rascheta i upravleniia teplovym rezhimom podzemnykh rudnikov* [Scientific principles of the calculation and management of thermal regime of underground mines]. Diss. of Doctor of Engineering Sciences. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2019. 247 p. (In Russian)
 9. Zaitsev A. V., Borodavkin D. A., Polyakov I. V. Obespechenie bezopasnykh uslovii truda po faktoru mikroklimata dlia uslovii glubokogo kaliinogo rudnika [Ensuring safe working conditions based on microclimate factors for deep potash mine conditions]. *Gornoe ekho* [Mountain Echo], 2020, no. 1, pp. 72–79. DOI: 10.7242/echo.2020.1.16 (In Russian).
 10. Yi H. et al. Applications of computational fluid dynamics for mine ventilation in mineral development. *Energies*. 2022. Vol. 15. N. 22, 8405.
 11. Xu G. et al. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017, vol. 31, no. 4, pp. 251–275.
 12. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Hoboken: Pearson Prentice Hall, 2007. 520 p.
 13. Moskvichev A. V. Applicability of models of the turbulence, realized in ANSYS CFX, for gas dynamics research in the slit channels TNA LRE. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, vol. 9, no. 5–1, pp. 82–85 (In Russian).
 14. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, vol. 4, no. 1, pp. 625–632.
 15. Tosltova Yu. I., Shumilov R. N. *Osnovy stroitel'noi teplofiziki* [Fundamentals of Building Thermal Physics]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2014. 104 p. (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сёмин М. А., Зайцев А. В., Бублик С. А., Пересторонин М. О., Сафин Р. Р. Моделирование тепломассообменных процессов в горных выработках глубоких рудников в условиях частичной теплоизоляции стенок // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 1. С. 23–32. doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-23-32

Please cite this article in English as:

Semin M. A., Zaitsev A. V., Bublik S. A., Perestoronin M. O., Safin R. R. Modeling of heat and mass transfer processes in deep mine workings under conditions of partial wall insulation. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 1, pp. 23–32. doi: 10.17072/1994-3598-2026-1-23-32

Сведения об авторах

1. Сёмин Михаил Александрович, д-р техн. наук, научный секретарь, Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская 78А, Пермь, 614007; заведующий лабораторией Математического моделирования геотехнических процессов, профессор кафедры ВиЭМ, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068.
2. Зайцев Артём Вячеславович, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская 78А, Пермь, 614007.
3. Бублик Сергей Анатольевич, м.н.с., Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская 78А, Пермь, 614007.
4. Пересторонин Максим Олегович, м.н.с., Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская 78А, Пермь, 614007.
5. Сафин Роман Рустамович, инженер, Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская 78А, Пермь, 614007.

Author information

1. Mikhail A. Semin, Doctor of Engineering Sciences, Scientific Secretary, Mining Institute UB RAS; 78a, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia; Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Geotechnical Processes, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia.
2. Artem V. Zaitsev, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director for Research, Mining Institute UB RAS; 78a, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia.
3. Sergey A. Bublik, Junior Researcher, Mining Institute UB RAS; 78a, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia.
4. Maksim O. Perestoronin, Junior Researcher, Mining Institute UB RAS; 78a, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia.
5. Roman R. Safin, Engineer, Mining Institute UB RAS; 78a, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia.