ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Оценка влияния суточных колебаний термодинамических параметров атмосферного воздуха на распределение его температуры в воздухоподающих стволах калийных рудников

М.А.Семин, Е.В.Колесов✉, Р.Р.Газизуллин, С.В.Мальцев
Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Семин М.А., Колесов Е.В., Газизуллин Р.Р., Мальцев С.В. Оценка влияния суточных колебаний термодинамических параметров атмосферного воздуха на распределение его температуры в воздухоподающих стволах калийных рудников // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 94-106. EDN LBZMTO

Аннотация
Амплитуда суточных колебаний температуры атмосферного воздуха в зависимости от климатической зоны и времени года может превышать 25 °С. Это приводит к развитию нестационарных теплообменных процессов в воздухоподающих стволах рудников и последующих горных выработках по тракту движения воздушной струи. Исследование направлено на изучение эффекта демпфирования амплитуды суточных колебаний термодинамических параметров атмосферного воздуха в воздухоподающих стволах калийных рудников. Суть эффекта теплового демпфирования заключается в нивелировании амплитуды колебаний температуры воздуха по мере продвижения воздушного потока по воздухоподающему стволу вследствие теплообмена с крепью ствола и массообменных процессов. Представлен теоретико-экспериментальный подход для прогнозирования микроклиматических параметров воздуха на сопряжении воздухоподающего ствола с подземным горизонтом с помощью модели сопряженного конвективно-диффузионного тепломассопереноса в пространстве ствола, крепи и окружающем породном массиве. Описана методика проведения натурных измерений на объекте исследования, приведены необходимые сведения для проведения экспериментов и расчетов, представлены данные натурных исследований для двух воздухоподающих стволов калийных рудников различной глубины. Данные экспериментальных измерений использованы для валидации предложенной модели. Полученное соответствие измеренных и расчетных данных подтвердило корректность выбранной модели для прогнозирования температуры на сопряжении ствола с подземным горизонтом. Определены эффективные коэффициенты теплоотдачи между воздушным потоком и стенкой для обоих воздухоподающих стволов, а также эффективные температуропроводности горных пород, окружающих стволы. Установлена эмпирическая зависимость температуры в околоствольном дворе подземного горизонта как функция среднесуточной температуры, амплитуды колебаний температуры на поверхности и сопряжении ствола с подземным горизонтом.

Ключевые слова
рудничная вентиляция; суточные колебания температуры; тепловой режим горных выработок; воздухоподающий ствол; моделирование; эффект теплового демпфирования; сопряженный тепломассоперенос; коэффициент теплоотдачи; температуропроводность пород

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания «Мониторинг, моделирование и управление аэрологическими и теплофизическими процессами в сложных горно-технических системах».

Поступила: 12.08.2024 ***Принята: 09.12.2025*** ***Онлайн: 11.02.2026*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

Поступающий в шахтный ствол атмосферный воздух подвержен суточным и сезонным вариациям температуры. Сезонные колебания температуры активно исследовались еще с середины XX в. применительно к рудникам Севера с естественным тепловым режимом [1]. Сезонные колебания температуры оказывают существенное влияние на тепловой режим горных выработок вплоть до удаленных рабочих зон [2-4]. Суточные колебания температуры влияют на тепловой режим горных выработок в сравнительно меньшей степени [5], а особый интерес к ним возник

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

только в последние десятилетия, когда развитие технологий нормализации микроклимата и математические методы анализа их эффективности достигли достаточно высокого уровня, при котором для точного расчета параметров систем вентиляции и кондиционирования [6-8] требуется учитывать дополнительные тепловые факторы, имеющие нестационарный характер [9-11].

Амплитуда суточных колебаний температуры атмосферного воздуха зависит от климатической зоны и времени года и может превышать 25 °С [12]. Это приводит к развитию нестационарных теплообменных процессов в воздухоподающих стволах и последующих горных выработках по тракту движения воздушной струи [13]. Большая часть амплитуды колебаний температуры демпфируется воздухподающими стволами [14]. По мнению исследователей [15], амплитуда колебаний температуры у сопряжения воздухоподающего ствола с подземными горизонтами весьма незначительна. Однако другие исследования [12, 16] указывают на то, что эта амплитуда может быть значительна и порой превышать 10 °С. Как справедливо отмечено в статье [17], выраженность данного явления зависит от параметров ствола. В этой же работе выделены основные параметры, которые влияют на вариацию температуры воздушного потока на сопряжении воздухоподающего ствола и выработок околоствольного двора (табл.1). По нашему мнению, данная классификация является несовершенной, поскольку представленные факторы порой взаимосвязаны или зависимы друг от друга.

Таблица 1

Основные факторы, определяющие влияние суточной вариации температуры на подземном горизонте [17]

Атмосферные факторы	Физические факторы	Динамические факторы
Температура атмосферного воздуха Относительная влажность атмосферного воздуха Барометрическое давление Наличие водопроявлений в стволе Плотность воздуха	Диаметр ствола Форма ствола Шероховатость стенок ствола Увлажненность стенок ствола Оборудование ствола	Расход воздуха Время движения воздуха Время контакта с поверхностью

Важно отметить, что при современных производственных мощностях возрастает потребность рудников в свежем воздухе [18]. Эта задача еще больше усложняется при освоении глубокозалегающих горизонтов [19-21]. Вследствие этого увеличиваются характерный размер проектируемых стволов и отношение площади поперечного сечения ствола к его периметру, что уменьшает влияние теплообмена со стенками ствола [22, 23] и усиливает эффект теплового демпфирования [24, 25]. По этой причине указанный феномен требует дальнейшего изучения.

С практической стороны исследование эффекта теплового демпфирования важно по ряду причин. Во-первых, точное прогнозирование температуры по сухому и влажному термометрам на сопряжении воздухоподающего ствола с подземным горизонтом имеет решающее значение при оценке микроклиматических условий в рудничной вентиляционной сети и принятии решения о том, необходима ли система охлаждения для обеспечения комфортных условий труда в руднике [26-28]. Во-вторых, для расчета естественной тяги в нормальном и реверсивном режимах проветривания рудников, поскольку указанная суточная вариация температуры способна дать суточную вариацию естественной тяги для ствола глубиной 1 км более 500 Па. В-третьих, для повышения точности расчета аварийных режимов проветривания рудников [29]. Как известно, воздухораспределение в реверсивном режиме проветривания меняется в том числе и по причине изменения эффекта естественной тяги. Из-за смены направления движения воздушного потока температура воздуха в стволах меняется, что приводит к развитию процессов нестационарного теплообмена [11].

Первые натурные измерения, подтверждающие явление сглаживания амплитуды температурных колебаний в воздухоподающих стволах, выполнены в работе [16]. Введено понятие эффекта теплового демпфирования и сделано предположение о том, что он будет по-разному влиять на тепловой режим горных выработок околоствольного двора для разных стволов [26]. Разработаны аналитические решения по учету влияния температурного демпфирования на основе нестационарных процессов тепломассопереноса, которые в настоящее время внедрены в симулятор шахтной вентиляции. Представлены результаты экспериментальных наблюдений за эффектом теплового

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

демпфирования на полиметаллических рудниках Канады и показано, что в течение лета и зимы меняется фаза периодических изменений температуры воздуха. В исследовании [30] получены и проанализированы данные непрерывного мониторинга температуры в различных точках золото-медного рудника в течение недели с целью выявления и количественной оценки поведения эффекта теплового маховика. Показана невозможность корректного описания данного эффекта с помощью стационарных тепловых моделей.

В работах [12, 17] теоретическая интерпретация измерений суточной вариации температуры в воздухоподающих стволах осуществлена с использованием нейросетевых подходов. В [12, 17] для прогнозирования температуры в околоствольном дворе использован нейросетевой алгоритм NARX. В [31, 32] для прогнозирования направления теплового потока предложена модель на основе множественной логистической регрессии. Несмотря на эффективность указанных нейросетевых методов, они обладают основным недостатком, заключающимся в непрозрачности расчета с точки зрения физических законов.

В настоящей работе предлагается другой подход, основанный на прогнозировании микроклиматических параметров воздуха на сопряжении воздухоподающих стволов с подземными горизонтами с помощью конвективно-диффузионной модели тепломассопереноса в атмосфере ствола, крепи и окружающем породном массиве. Предлагается посредством физического анализа выделить основные безразмерные комплексы задачи и определить параметры, от которых зависит уменьшение амплитуды суточных колебаний температуры по тракту движения воздуха.

Методология. Экспериментальные измерения

Для исследования эффекта теплового демпфирования проведен ряд натурных экспериментов в условиях калийных рудников. В качестве объектов исследования выбраны воздухоподающий ствол рудника, разрабатывающего Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ствол № 1), и воздухоподающий ствол рудника, разрабатывающего Гремячинское месторождение калийных солей (ствол № 2). На обоих рудниках применяется центральная схема проветривания, при которой свежий воздух подается в рудник по воздухоподающим стволам и удаляется через вентиляционные стволы под действием депрессии, создаваемой главной вентиляторной установкой, размещенной на поверхности. На формирование и поддержание требуемой температуры воздуха в воздухоподающих стволах в холодный период года существенное влияние оказывают системы воздухоподготовки, которые определяют тепловой режим эксплуатации шахтных стволов [33]. В теплый период года системы воздухоподготовки отключены.

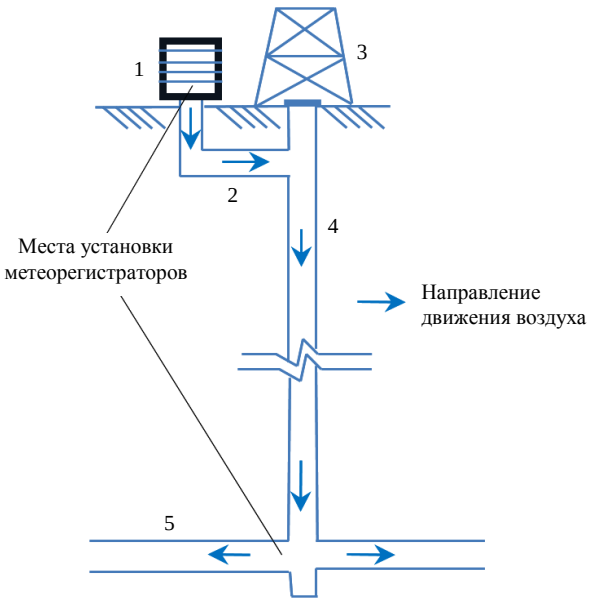


Рис.1. Схема установки метеорегистраторов в воздухоподающем стволе
1 – узел летнего воздухозабора калориферной установки; 2 – воздухоподающий канал; 3 – надшахтное здание; 4 – воздухоподающий ствол; 5 – транспортный горизонт

В ходе натурных исследований в теплый период года измерены суточные колебания температуры и влажности поступающей в рудник по воздухоподающему стволу воздушной массы. Для этого в узле летнего воздухозабора воздухоподающего ствола и в подземной части на сопряжении воздухоподающего ствола с транспортным горизонтом были установлены портативные метеорегистраторы Kestrel Drop D3, регистрирующие показания температуры и относительной влажности поступающего в рудник воздуха. Метеорегистраторы имеют возможность записывать данные в память в течение длительного времени с заданным интервалом. При проведении наблюдений показания температуры и относительной влажности измерялись с интервалом 5 мин. Точность измерений метеорегистраторов составляет по каналам регистрации температуры ±0,9 °С, относительной влажности ±2 %. Схема установки метеорегистраторов в воздухоподающем стволе представлена на рис.1.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Расход воздуха определен на основании прямых измерений скорости воздушного потока и площади поперечного сечения выработки в вентиляционных выработках околоствольного двора. Скорость воздушного потока измерена с помощью анемометра АПР-2 с точностью измерений ±0,10 + 0,05V м/с, где V – измеренная скорость. Площадь поперечного сечения выработки установлена путем прямых измерений отдельных участков сечения выработки и дальнейшего вычисления площади сечения на основании измеренных параметров лазерным дальномером Leica Disto X3 с точностью ±2 $(1{,}0 + 0{,}1\cdot 10^{-3}X)$ мм, где X – измеренное расстояние.

Воздухоподающий ствол № 1 имеет диаметр 7 м в свету, оборудован скипо-клетевым подъемом, длина от воздухоприемника до сопряжения с транспортным горизонтом составляет 381 м. Объемный расход воздуха, проходящий по стволу, достигает 9500 м^3/мин, при этом средняя скорость движения воздушной массы по стволу – 4,1 м/с.

Воздухоподающий ствол № 2 имеет диаметр 8 м в свету, оборудован скиповым подъемом. Глубина залегания сопряжения с транспортным горизонтом составляет 1094 м. Объемный расход воздуха, проходящий по стволу, 19000 м^3/мин, при этом средняя скорость движения воздушного потока по стволу составляет 6,3 м/с.

В качестве крепления на обоих стволах применяется чугунная тюбинговая крепь с толщиной спинки тюбингов 30-70 мм с затюбинговым бетоном толщиной 600-750 мм.

Математическая модель

Процесс нестационарного сопряженного теплообмена между воздушным потоком, крепью ствола и породным массивом с учетом переноса влаги описывается системой дифференциальных уравнений конвективного теплопереноса в воздушном пространстве ствола

$$\rho_a c_v \frac{dT}{dx} = \frac{P}{\rho_a}\frac{d\rho_a}{dx} - \rho_a L\frac{dm}{dx} + \frac{4}{D}\frac{\alpha}{V}\left(T_m\left(t, D/2, x\right) - T\right) \tag{1}$$

и переноса теплоты в крепи ствола и окружающем ствол породном массиве

$$\frac{\partial T_m\left(t,r,x\right)}{\partial t} = a_m \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_m\left(t,r,x\right)}{\partial r}\right). \tag{2}$$

Уравнение (1) дополняется уравнениями состояния влажного воздуха:

$$\rho_a = \frac{29P - 0{,}11\varphi\left[479 + \left(11{,}52 + 1{,}62T\right)^2\right]}{8{,}314\left(T + 273\right)}; \tag{3}$$

$$\varphi = \frac{Pm}{611\left(0{,}622 + m\right)\exp\left(\dfrac{17{,}5T}{T + 241{,}5}\right)}; \tag{4}$$

$$P = P_0 + \rho_0 g x. \tag{5}$$

Граничное условие для температуры воздушного потока на входе в ствол задается на основе экспериментальных измерений:

$$T\left(t,0\right) = T_0\left(t\right). \tag{6}$$

В начальный момент температура массива на глубине x принимается однородной вдоль радиальной координаты r:

$$T_m\left(0,r,x\right) = T_{m0}\left(x\right). \tag{7}$$

Граничные условия для уравнения (2) вдали от контура ствола представляют собой температуру непотревоженного массива на данной глубине:

$$T_m\left(t, R_{out}, x\right) = T_{m0}\left(x\right). \tag{8}$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Внешний радиус теплового влияния выработки из равенства (8) можно оценить согласно источнику [34]:

$$R_{out} = \sqrt{4a_m \tau Ln\left(\frac{s\Delta T_0}{4\pi a_m \tau \delta}\right)}. \quad (9)$$

На контуре ствола для уравнения (2) задается граничное условие согласно закону Ньютона – Рихмана:

$$\lambda \frac{\partial T_m}{\partial r}\bigg|_{r \to D/2} = \alpha\left(T - T_m\right)\big|_{r \to D/2}. \quad (10)$$

Эффективный коэффициент теплоотдачи между воздушным потоком и крепью шахтного ствола определен следующим образом [11]:

$$\alpha = k \cdot 3{,}6 \frac{V^{0,8}}{D^{0,2}}. \quad (11)$$

В системе уравнений (1)-(11) введены следующие обозначения: ρ_a – плотность воздуха в стволе, кг/м^3; c_v – удельная изохорная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); T – температура воздуха в стволе, °С; P – барометрическое давление воздуха на глубине x, Па; L – скрытая теплота конденсации воды, Дж/кг; m – влагосодержание воздуха, заданное в модели на основе экспериментальных измерений, кг/кг; D – диаметр ствола, м; V – скорость воздушной струи в стволе, м/с; s – площадь поверхности теплообмена, м^2; τ – общее время процесса теплообмена, с; ΔT_0 – начальное рассогласование температуры воздушной струи и крепи ствола, °С; δ – температурное возмущение на границе тепловыравнивающего слоя, принимается равным 0,1 °С; α – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С); k – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий шероховатость и увлажненность стенок ствола; $T_m(t, r, x)$ – температура стенки ствола, °С; a_m – эффективный коэффициент температуропроводности системы «крепь ствола – массив», м^2/с [35].

Введем безразмерные переменные в следующем виде:

$$\hat{x} = \frac{x}{H}; \quad \hat{T} = \frac{T}{\Delta T_A}; \quad \hat{P} = \frac{P}{P_0}; \quad \hat{T}_m = \frac{T_m}{\Delta T_A}; \quad \hat{t} = \frac{t}{\Delta t_{сут}}; \quad \hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}; \quad \hat{r} = \frac{r}{D},$$

где H – глубина ствола, м; ΔT_A – перепад температуры атмосферного воздуха на поверхности, °С; $\Delta t_{сут}$ = 24 ч = 86400 с – период изменения температуры атмосферного воздуха.

Приведем уравнения (1) и (2) к безразмерной форме:

$$\hat{\rho}\frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}} = \mathrm{K_c}\frac{\hat{P}}{\hat{\rho}}\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{x}} - \frac{1}{\mathrm{Ste}}\hat{\rho}\frac{\partial m}{\partial \hat{x}} + \mathrm{K_h}\left(\hat{T}_m - \hat{T}\right);$$

$$\frac{\partial \hat{T}_m}{\partial \hat{t}} = \mathrm{Fo}\frac{1}{\hat{r}}\frac{\partial}{\partial \hat{r}}\left(\hat{r}\frac{\partial \hat{T}_m}{\partial \hat{r}}\right);$$

граничное условие (10) в безразмерной форме будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \hat{T}_m}{\partial \hat{t}}\bigg| = \mathrm{Bi}\left(\hat{T} - \hat{T}_m\right)\big|_{\hat{r} \to 1/2};$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha D}{\lambda}, \quad \mathrm{Fo} = \frac{a_m \Delta t_{сут}}{D^2}; \quad \mathrm{Ste} = \frac{c_v \Delta T_A}{L}; \quad \mathrm{K_c} = \frac{P_0}{\rho_0 c_v \Delta T_A}; \quad \mathrm{K_h} = \frac{4\alpha H}{\rho_0 c_v D V},$$

где Bi, Fo, Ste – безразмерные комплексы, представляющие собой числа (критерии) подобия Био, Фурье, Стефана соответственно; $\mathrm{K_c}$, $\mathrm{K_h}$ – безразмерные комплексы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В случае моделирования окружающего массива как многослойной структуры «тюбинг – бетонная крепь – породы» в модели будут присутствовать дополнительные безразмерные комплексы – отношения температуропроводностей различных слоев.

Число Био характеризует отношение теплопередачи внутри массива к теплопередаче на границе с воздухом. Число Фурье характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей воздушной среде и скоростью перестройки поля температуры внутри системы «крепь – массив». Число Стефана определяется как отношение характерного изменения явной теплоты воздушного потока к изменению скрытой теплоты вследствие фазовых переходов влаги в воздушном потоке. Числа K_c и K_h характеризуют соответственно интенсивность нагрева воздуха вследствие его опускания вниз по стволу и вследствие его взаимодействия со стенками ствола.

Результаты и дискуссия

В результате проведения экспериментов получены графики изменения температуры и относительной влажности воздуха на поверхности рудников, а также на сопряжении воздухоподающих стволов с транспортными горизонтами. На графиках рис.2 представлены результаты наблюдения в стволе № 1, измерения проводились в течение 78 ч. Из графика на рис.2, *а* видно, что на глубине транспортного горизонта происходит сдвиг фазы суточных колебаний (суточное «отставание») температуры на 20-65 мин относительно суточных колебаний температуры на поверхности рудника. При этом средняя вариация суточных колебаний температуры воздуха на поверхности составила 5,8 °С за исследуемый период, а на подземном горизонте 2,6 °С, что говорит о существенном проявлении эффекта теплового демпфирования. Влажность воздуха также испытывает суточные колебания (рис.2, *б*), при этом средняя вариация относительной влажности атмосферного воздуха за исследуемый период достигла 23 %, а на транспортном горизонте средняя вариация составила 17 %, что свидетельствует о нивелировании амплитуды колебаний не только температуры, но и относительной влажности воздушного потока при движении по воздухоподающему стволу.

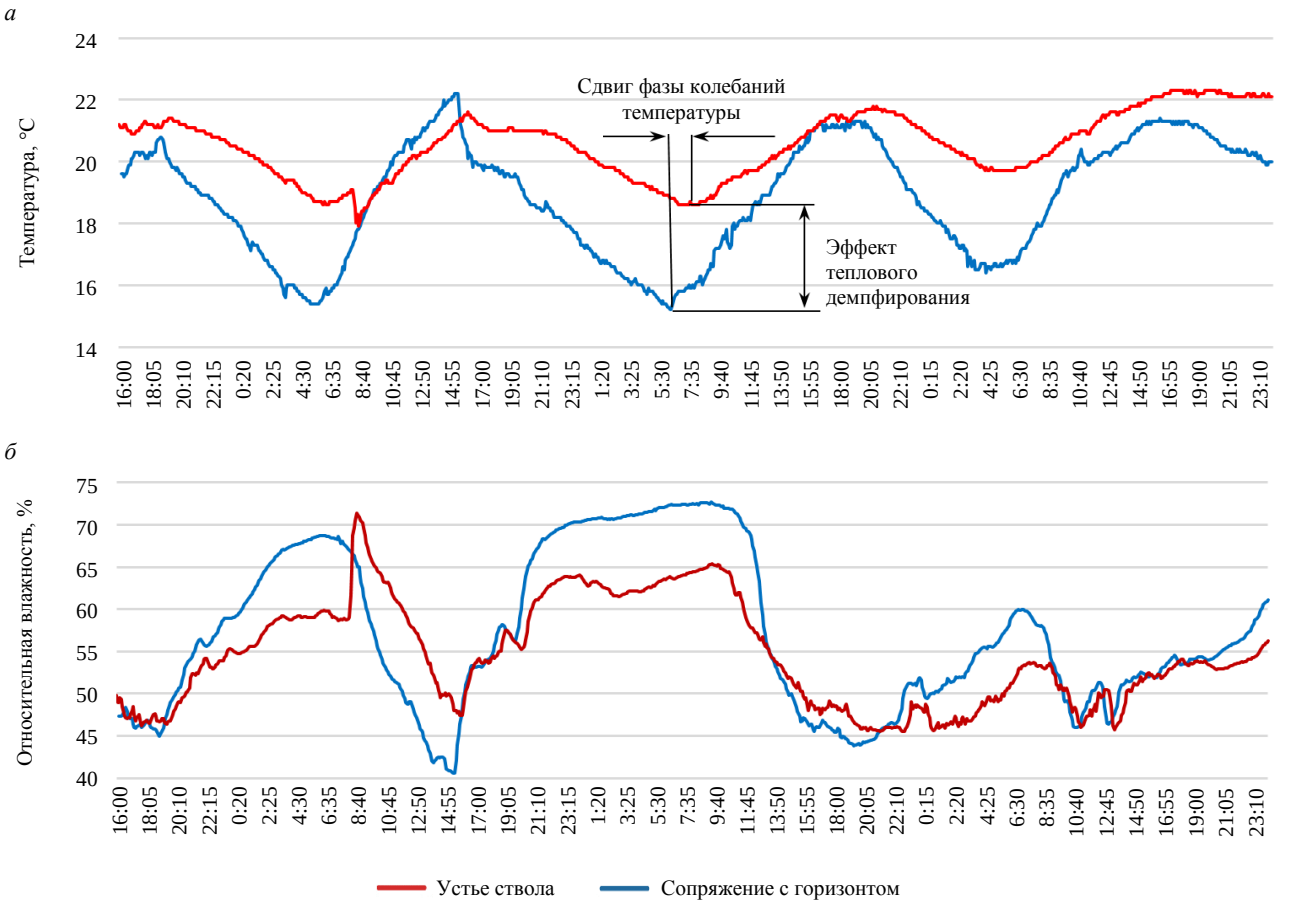


Рис.2. Суточные изменения температуры (*а*) и относительной влажности (*б*) воздуха в стволе № 1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

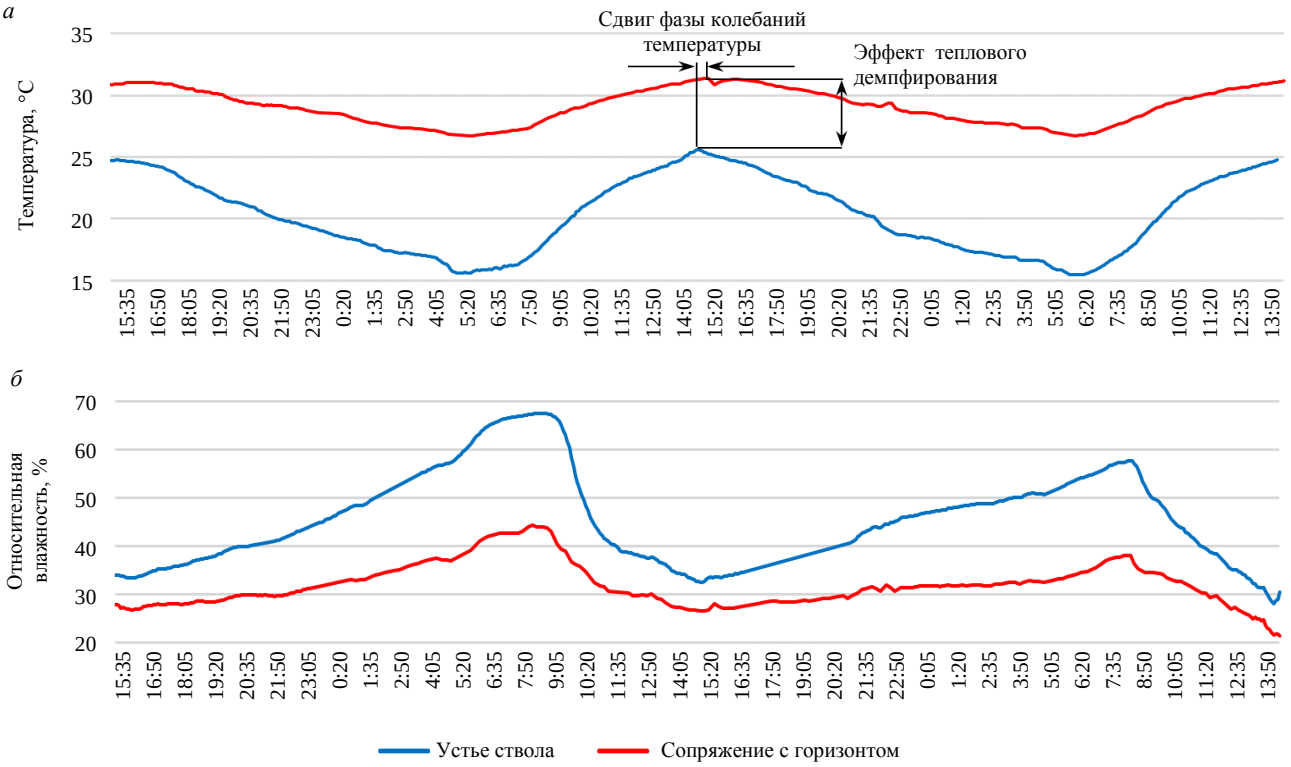


Рис.3. Суточные изменения температуры (*а*) и относительной влажности (*б*) воздуха в стволе № 2

В стволе № 2 измерения проводились в течение 46 ч. На графике (рис.3, *а*) показан сдвиг фазы суточных колебаний температуры на глубине транспортного горизонта на 10-15 мин относительно суточных колебаний температуры на поверхности рудника. За этот временной промежуток воздушная масса, проходя по стволу, остывала с 31,3 до 25,6 °С в дневное время. В ночное (холодное) время суток за такой же интервал времени температура воздуха, проходящего по стволу, снижалась с 26,7 до 15,6 °С. Средняя вариация суточных колебаний температуры атмосферного воздуха составила 9,7 °С, при этом средняя вариация суточных колебаний температуры воздуха на сопряжении с подземным горизонтом составила 4,5 °С вследствие проявления эффекта теплового демпфирования.

Средняя вариация относительной влажности воздуха за исследуемый период достигла 32 % на поверхности рудника, 17 % на транспортном горизонте, что так же свидетельствует о нивелировании амплитуды колебаний относительной влажности воздушного потока при движении по воздухоподающему стволу.

При подстановке характерных для исследуемых шахтных стволов значений величин получим порядки чисел подобия: Bi ~10^1-10^2; Fo ~10^{-3}-10^{-2}; Ste ~10^{-3}; K_c ~10^1; K_h ~10^0. Полученные значения чисел Bi и Fo говорят о том, что основное изменение температуры будет происходить вблизи поверхности ствола, при этом внутри массива температура изменится незначительно, так как теплопередача внутрь бетона происходит медленно. Малые значения числа Ste говорят о том, что для фазового перехода (конденсации или испарения влаги в воздушном потоке) требуется значительно больше теплоты по сравнению с теплотой, необходимой для изменения температуры. Порядки величин чисел K_c и K_h свидетельствуют о существенном влиянии на нагрев воздуха как его сжатия при движении по стволу, так и его взаимодействия со стенками ствола.

Для предварительной оценки вклада каждого из учтенных в уравнении (1) процессов тепломассопереноса в увеличение температуры воздуха на сопряжении с подземным горизонтом подставим характерные значения величин (табл.2). В качестве среднего барометрического давления, средней температуры и средней плотности воздуха в стволах принимались величины, равные среднему арифметическому соответствующих физических параметров воздуха в устье и на сопряжении ствола с подземным горизонтом.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Свойства воздуха и параметры стволов

Параметр	Ствол № 1	Ствол № 2
Средняя плотность воздуха в стволе, кг/м^3	1,235	1,26
Среднее барометрическое давление воздуха в стволе, Па	103570	107593
Средний прирост температуры воздуха в стволе, °С	1,6	9,0
Средний прирост влагосодержания в стволе, кг/кг	0,83	0,41
Средняя температура крепи, °С	20,1	27,3
Глубина ствола, м	381	1094
Диаметр ствола, м	7	8
Скорость воздуха в стволе, м/с	4,1	6,3
Удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С)	1005	1005
Скрытая теплота конденсации воды, кДж/кг	2260	2260
Коэффициент теплоотдачи между воздушным потоком и стенкой ствола, Вт/(м^2·°С)	16,6	13,5

В табл.3 представлены соотношения влияния различных процессов тепломассопереноса I_i, происходящих в исследуемых стволах, на формирование конечной температуры воздуха на сопряжении с подземным горизонтом. Влияние рассчитывалось как отношение теплоты, привносимой или отводимой от воздушного потока рассматриваемым фактором, к изменению внутренней энергии воздушного потока:

$$I_i = \frac{W_i}{\rho_a c_a \Delta T} \cdot 100\ \%,$$

где W_i – теплота от i-го теплового фактора.

Суммарное влияние всех процессов тепломассопереноса для каждого из стволов составляет 100 %, т.е. изменение температуры воздуха в стволе полностью происходит за счет этих процессов.

Таблица 3

Соотношение влияния процессов тепломассопереноса на температуру воздуха на сопряжении ствола с подземным горизонтом, %

Фактор	Ствол № 1	Ствол № 2
Гидростатический нагрев воздуха за счет сжатия	+196,9	+84,8
Испарение влаги с поверхности ствола	–116,6	–10,2
Теплообмен с крепью ствола	+19,7	+25,4

Примечание. Плюс означает, что рассматриваемый фактор способствует повышению температуры воздуха с глубиной, минус означает, что фактор способствует охлаждению воздуха.

Из табл.3 следует, что для ствола № 1 ключевым фактором увеличения температуры воздуха является гидростатический нагрев за счет адиабатического сжатия (в 10 раз больше, чем влияние теплообмена с крепью ствола), при этом на испарение влаги с поверхности крепи тратится существенное количество энергии воздушного потока. Для ствола № 2 фактор гидростатического нагрева за счет адиабатического сжатия также превалирует над фактором теплообмена с крепью ствола (в 3,3 раза больше), однако за счет меньшего количества влаги в стволе потери энергии на испарение составляют незначительную часть.

Система уравнений (1)-(11) решалась методом конечных разностей согласно явной схеме по времени первого порядка и центральной схеме по пространству второго порядка. В результате получены временные зависимости температуры воздушного потока в околоствольном дворе подземного горизонта. В качестве варьируемых параметров принимались a_m и k, которые методом последовательных приближений подбирались так, чтобы результаты экспериментальных измерений температуры воздушного потока $\tilde{T}(t_i)$ были как можно ближе к соответствующим температурам, полученным в результате моделирования, т.е. чтобы выполнялось условие

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© М.А.Семин, Е.В.Колесов, Р.Р.Газизуллин, С.В.Мальцев, 2026

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\tilde{T}(t_i)-T(t_i)\right)^2}{n}} \to \min. \qquad (12)$$

На рис.4 представлены контурные линии корня из средней квадратичной ошибки (12) в фазовой плоскости «коэффициент k – температуропроводность массива» для условий ствола № 2. Минимум функционала (12) достигается при значениях параметров $k = 1{,}3$; эффективная температуропроводность массива $a_m = 2{,}2 \cdot 10^{-7}$ м^2/с. На рис.5 показан график временной динамики температуры воздушного потока на поверхности и на сопряжении с подземным горизонтом. Кривая 3 на рис.5 построена в результате решения системы уравнений (1)-(11) при значениях параметров $k = 1{,}3$; $a_m = 2{,}2 \cdot 10^{-7}$ м^2/с.

На рис.6 представлены контурные линии корня из средней квадратичной ошибки (12) в фазовой плоскости «коэффициент k – температуропроводность массива» для условий ствола № 1. Минимум функционала (12) достигается при значениях параметров $k = 2{,}2$; эффективная температуропроводность массива $a_m = 150 \cdot 10^{-7}$ м^2/с. На рис.7 представлен график временной динамики температуры воздушного потока на поверхности и на сопряжении с подземным горизонтом. Кривая 3 на рис.7 построена в результате решения системы уравнений (1)-(11) при значениях параметров $k = 2{,}2$; $a_m = 150 \cdot 10^{-7}$ м^2/с.

Таким образом, математическая модель процесса нестационарного сопряженного теплообмена между воздушным потоком, крепью ствола и породным массивом с учетом переноса влаги, настроенная по данным экспериментальных измерений, может быть использована для прогнозирования динамики температуры воздушного потока на подземном горизонте с достаточной для инженерных расчетов точностью, при этом малые отклонения модельных кривых от экспериментальных точек связаны в основном с приборной погрешностью.

Полученные модели для обоих исследуемых стволов далее были использованы для определения функциональной зависимости температуры $T_{\text{гор}}(t)$ на подземном горизонте от температуры на поверхности $T_{\text{А}}(t)$ и глубины H. Для этого в качестве граничного условия (6) задавалось гармоническое изменение температуры на поверхности:

$$T_{\text{А}}(t) = \bar{T}_{\text{А}} + \frac{\Delta T_{\text{А}}}{2}\cos\left(\frac{2\pi t}{1440}\right),$$

где $\bar{T}_{\text{А}}$ – среднее значение температуры на поверхности за сутки, °С; $\Delta T_{\text{А}}$ – вариация суточных колебаний температуры атмосферного воздуха, °С; t – время, мин. Варьируемыми параметрами были $\bar{T}_{\text{А}}$, $\Delta T_{\text{А}}$, H.

Результаты многопараметрического моделирования позволили определить зависимости температуры воздуха на подземном горизонте от варьируемых параметров. Зависимости подбирались в виде суперпозиции усредненной по времени температуры воздуха и нестационарной компоненты, характеризующей гармонические колебания около этого среднего значения с некоторыми фазовыми сдвигами, обусловленными инерционностью процесса теплопроводности. В результате многопараметрического моделирования получены следующие выражения для прогноза температуры на подземном горизонте для исследуемых стволов:

$$T_{\text{гор}}(t)_2 = \bar{T}_{\text{А}} + 0{,}0073H + \frac{18{,}3\Delta T_{\text{А}}}{H^{0{,}6}}\cos\left(0{,}048 + \frac{2\pi t}{1440}\right);$$

$$T_{\text{гор}}(t)_1 = \bar{T}_{\text{А}} + 0{,}0056H + \frac{9{,}3\Delta T_{\text{А}}}{H^{0{,}6}}\cos\left(0{,}109 + \frac{2\pi t}{1440}\right).$$

Вторые слагаемые в полученных выражениях характеризуют влияние температурного градиента вследствие совокупного воздействия гидростатического сжатия и усредненного по времени эффекта теплообмена с породным массивом.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

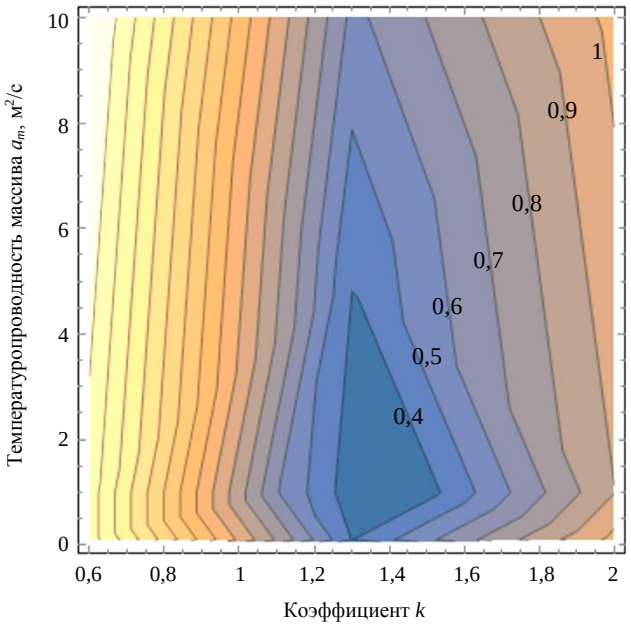


Рис.4. Контурные линии корня из средней квадратичной ошибки (12) в фазовой плоскости «коэффициент k – температуропроводность массива a_m» в стволе № 2

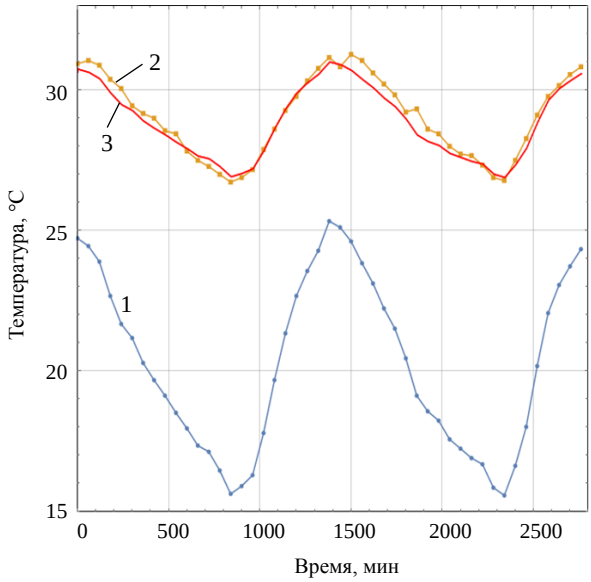


Рис.5. Временная динамика температуры воздуха в стволе № 2

1 – данные натурных измерений в устье ствола; 2 – данные натурных измерений на сопряжении ствола с подземным горизонтом; 3 – рассчитанная динамика температуры на сопряжении ствола с подземным горизонтом

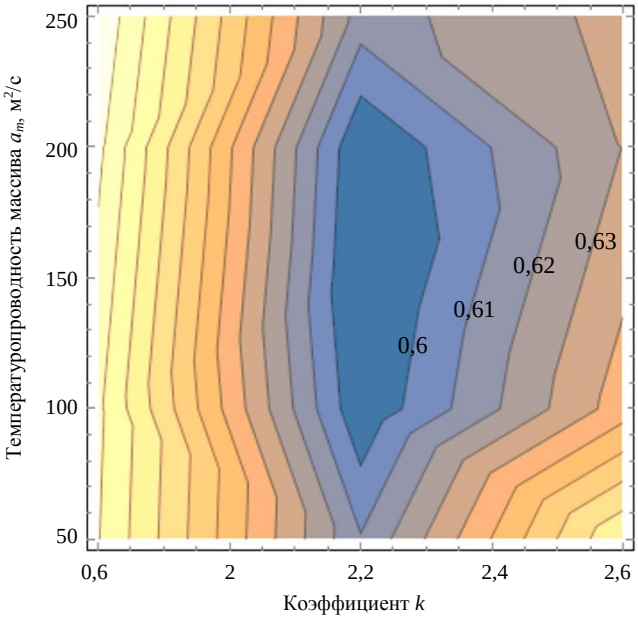


Рис.6. Контурные линии корня из средней квадратичной ошибки (12) в фазовой плоскости «коэффициент k – температуропроводность массива a_m» в стволе № 1

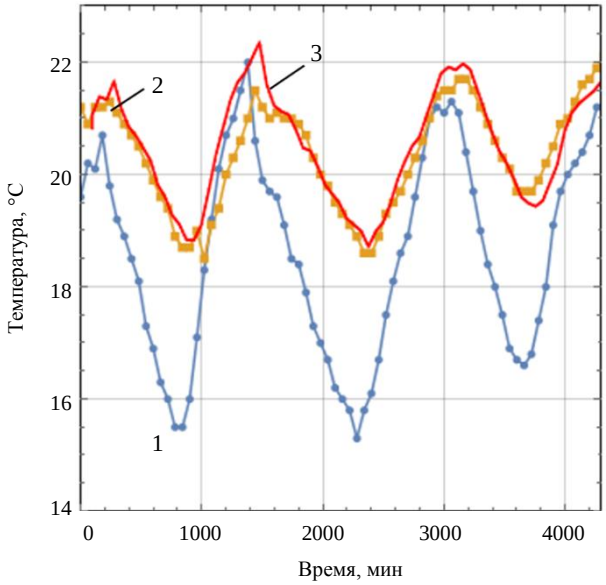


Рис.7. Временная динамика температуры воздуха в стволе № 1

1 – данные натурных измерений в устье ствола; 2 – данные натурных измерений на сопряжении ствола с подземным горизонтом; 3 – рассчитанная в модели динамика температуры на сопряжении ствола с подземным горизонтом

Общий вид расчетных формул для определения средней температуры воздуха в околоствольном дворе воздухоподающего ствола $\overline{T}_{\text{гор}}$, суточной вариации температуры $\Delta T_{\text{гор}}$ и сдвига фазы колебаний температуры φ:

$$\overline{T}_{\text{гор}} = \overline{T}_{\text{А}} + aH;$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$\Delta T_{\text{гор}} = b\frac{\Delta T_{\text{A}}}{H^{0,6}};$$

$$\varphi = 2\pi\frac{\Delta t}{1440},$$

где Δt – суточное «отставание» колебаний температуры на сопряжении ствола с подземным горизонтом относительно суточных колебаний температуры на поверхности рудника, мин; a, b – эмпирические коэффициенты, в общем случае зависящие от чисел подобия Bi, Fo, Ste, а также K_c, K_h.

Заключение

Представлены результаты изучения эффекта демпфирования амплитуды суточных колебаний температуры и влажности атмосферного воздуха в воздухоподающих стволах калийных рудников на основе теоретико-экспериментального подхода, подразумевающего как проведение натурных измерений микроклиматических параметров воздуха в шахтных условиях, так и применение математической модели сопряженного конвективно-диффузионного тепломассопереноса в пространстве ствола, крепи и окружающем породном массиве, для прогнозирования температуры воздуха на сопряжении ствола с подземным горизонтом.

Описана методика проведения натурных измерений в шахтных условиях и представлены полученные данные для двух воздухоподающих стволов калийных рудников различной глубины, которые использовались далее для параметризации и валидации предложенной модели процесса нестационарного сопряженного теплообмена между воздушным потоком, крепью ствола и породным массивом.

Определены эффективные коэффициенты теплоотдачи α между воздушным потоком и стенкой для исследуемых стволов, а также эффективные температуропроводности породных массивов a_m, окружающих стволы: для ствола № 2 $\alpha = 4{,}68(V^{0,8}/D^{0,2})$ Вт/(м$^2\cdot$°С), $a_m = 2{,}2\cdot10^{-7}$ м^2/с; для ствола № 1 $\alpha = 7{,}92(V^{0,8}/D^{0,2})$ Вт/(м$^2\cdot$°С), $a_m = 150\cdot10^{-7}$ м^2/с.

Далее полученные модели для обоих исследуемых стволов использовались для многопараметрического моделирования с целью определения эмпирической зависимости температуры в околоствольном дворе подземного горизонта как функция среднесуточной температуры и амплитуды колебаний температуры на поверхности и в глубине ствола. В результате получены расчетные формулы для определения средней температуры воздуха в околоствольном дворе воздухоподающего ствола, суточной вариации температуры и сдвига фазы колебаний температуры. Показано, что амплитуда колебаний температуры воздуха в околоствольном дворе зависит от глубины его расположения по степенному закону с показателем –0,6.

Результаты работы будут полезны при количественной оценке микроклиматических условий в рудничной вентиляционной сети и принятии решения о необходимости системы охлаждения для обеспечения комфортных условий труда в руднике. Предложенный подход к оценке вариации суточной температуры воздуха на подземном горизонте позволит также уточнить расчет временной динамики естественной тяги как в нормальном, так и в реверсивном режимах проветривания рудников, что в свою очередь позволит повысить точность расчета аварийных режимов проветривания рудников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим рудников криолитозоны // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 377-381. DOI: 10.18454/PMI.2016.3.377

2. *Зайцев А.В., Семин М.А., Паршаков О.С.* Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 562-568. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9

3. *Habibi A., Kramer R.B., Gillies A.D.S.* Investigating the effects of heat changes in an underground mine // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. P. 1164-1171. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.066

4. *Hongbin Zhao, Shihao Tu, Xun Liu et al.* Study of energy-efficient heat resistance and cooling technology for high temperature working face with multiple heat sources in deep mine // International Journal of Coal Science & Technology. 2023. Vol. 10. № 35. DOI: 10.1007/s40789-023-00590-9

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

5. *Fair R., van Laar J.H., Nell K. et al.* Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering. 2021. Vol. 32. № 3. P. 42-51. DOI: 10.7166/32-3-2616

6. *Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С.* Особенности проектирования вентиляции и кондиционирования воздуха глубоких рудников // Горный журнал. 2023. № 11. С. 57-63. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.09

7. *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

8. *Алабьев В.Р., Новиков В.В., Пашинян Л.А., Бажина Т.П.* Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 251-258. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.251

9. *Maurya T., Karena K., Vardhan H. et al.* Potential Sources of Heat in Underground Mines – A Review // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 11. P. 463-468. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.046

10. *Zaitsev A., Shalimov A., Borodavkin D.* Unsteady Coupled Heat Transfer in the Air and Surrounding Rock Mass for Mine Excavations with Distributed Heat Sources // Fluids. 2023. Vol. 8. Iss. 2. № 67. DOI: 10.3390/fluids8020067

11. *Колесов Е.В., Семин М.А., Казаков Б.П., Князев Н.А.* Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 3. С. 57-71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57

12. *Scalise K.A., Teixeira M.B., Kocsis K.C.* Managing Heat in Underground Mines: the Importance of Incorporating the Thermal Flywheel Effect into Climatic Modeling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021. Vol. 38. Iss. 1. P. 575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5

13. *Tu Q., Yu C., Li Z. et al.* Computer simulation study on heat transfer of surrounding rock in mine roadway of coal mine enterprises // Thermal Science. 2020. Vol. 24. Iss. 5. Part B. P. 3049-3058. DOI: 10.2298/TSCI191020079T

14. *Pandey A., Sridharan S.J., Sastry B.S.* A transient model for predicting psychrometric properties of air at an intake shaft bottom of shallow depth working // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15. Iss. 16. № 1396. DOI: 10.1007/s12517-022-10679-1

15. *Дуганов Г.В., Баратов Э.И.* Тепловой режим рудников. М.: Госгортехиздат, 1963. 144 с.

16. *Stroh R.M.* A Note on the Downcast Shaft as a Thermal Flywheel // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa. 1979. Vol. 32. P. 77-80.

17. *Roghanchi P., Kocsis K.C.* Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear auto-regressive with external input (NARX) algorithm // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 2. P. 255-262. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.002

18. *Кобылкин С.С.* Системное проектирование вентиляции горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1. С. 150-156.

19. *Tingting Sun, Zhiwen Luo, Tim Chay.* An analytical model to predict the temperature in subway-tunnels by coupling thermal mass and ventilation // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. № 102564. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102564

20. *Лискова М.Ю., Вишневская Н.Л., Плахова Л.В.* Влияние микроклиматических условий на горнорабочих в выработках глубоких горизонтов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 9. С. 219-230. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-219-230

21. *Вишневская Н.Л., Лискова М.Ю., Плахова Л.В.* Современные физиолого-гигиенические проблемы работников глубоких шахт (рудников) и обоснование профилактических мероприятий в области охраны труда, способствующих их решению // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 163-176. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-163-176

22. *Shuai Zhu, Jianwei Cheng, Zui Wang, Borowski M.* Physical simulation experiment of factors affecting temperature field of heat adjustment circle in rock surrounding mine roadway // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023. Vol. 45. Iss. 4. P. 11278-11295. DOI: 10.1080/15567036.2020.1760969

23. *Menglong Bian, Wencai Wang.* Prediction model of vertical shaft air temperature and its application // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 384. № 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012016

24. *Verbeke S., Audenaert A.* Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 2300-2318. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.083

25. *Heier J., Bales C., Martin V.* Combining thermal energy storage with buildings – a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1305-1325. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.031

26. *Бородавкин Д.А.* Расчет и управление нестационарным тепловым режимом рабочих зон длинных очистных забоев (на примере Старобинского месторождения калийных солей): Автореф. дис. … канд. техн. наук. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2024. 23 с.

27. *Рудаков М.Л., Степанов И.С.* Оценка профессионального риска при воздействии нагревающего микроклимата при ведении подземных горных работ // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 364-368.

28. *Паршаков О.С.* Результаты исследования шахтной вентиляционной сети рудника Норильского промышленного района // Горное эхо. 2021. № 4 (85). С. 119-128. DOI: 10.7242/echo.2021.4.23

29. *Semin M., Levin L.* Mathematical Modeling of Air Distribution in Mines Considering Different Ventilation Modes // Mathematics. 2023. Vol. 11. Iss. 4. № 989. DOI: 10.3390/math11040989

30. *Stewart C., Aminossadati S.M., Kizil M.S., Andreatidis T.* Diurnal Thermal Flywheel Influence on Ventilation Temperatures in Large Underground Mines // Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium, 17-22 June 2017, Golden, CO, USA. Colorado School of Mines, 2017. P. 9-1 – 9-8.

31. *Pandey A., Mondal C., Sastry B.S.* Multiple logistic regression based prediction of heat flow direction in an intake incline of shallow depth by integrating thermal flywheel effect: A case study // Applied Thermal Engineering. 2022. Vol. 213. № 118765. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118765

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Scalise K.A., Kocsis K.* Utilizing Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input Neural Networks to Evaluate the Thermal Flywheel Effect Along Intake Shafts at Nevada Mines // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021. Vol. 38. Iss. 3. P. 1395-1410. DOI: 10.1007/s42461-021-00411-0

33. *Anderson R., De Souza E.* Heat stress management in underground mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27. Iss. 4. P. 651-655. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.020

34. *Зайцев А.В.* Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2013. 20 с.

35. *Колесов Е.В.* Разработка способов управления капельной влагой в вентиляционных стволах рудников: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2023. 24 с.

***Авторы*: Михаил Александрович Семин,** *д-р техн. наук, заведующий лабораторией* (*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-5200-7931, **Евгений Викторович Колесов,** *канд. техн. наук, научный сотрудник* (*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*), *kolesovev@gmail.com*, https://orcid.org/0000-0002-0755-7405, **Руслан Рафаилович Газизуллин,** *ведущий инженер* (*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*), https://orcid.org/0009-0004-3122-1647, **Станислав Владимирович Мальцев,** *канд. техн. наук, заведующий сектором* (*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*), https://orcid.org/0009-0002-9887-1455.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0