ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(3):57-71
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ШАХТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО СТВОЛА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕВЕРСИВНОМ РЕЖИМЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ

Е.В. Колесов[1], М.А. Семин[1], Б.П. Казаков[1], Н.А. Князев[1]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: kolesovev@gmail.com

Аннотация: Представлен усовершенствованный метод расчета эффективного коэффициента теплоотдачи между крепью обводненного вентиляционного ствола и воздушным потоком по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания на основе численного решения системы уравнений сопряженного тепломассообмена между воздушным потоком и стенками ствола с учетом влагопереноса. Прямой модельный учет меняющегося влагосодержания воздушной струи позволил более точно оценить изменение температуры воздуха в стволе вследствие массообменных процессов. Эффективный коэффициент теплоотдачи, входящий в математическую модель сопряженного тепломассопереноса в воздухе, крепи ствола и породном массиве, определялся путем минимизации рассогласования измеренных и рассчитанных температур воздушной струи в стволе и в примыкающих к нему горных выработках, а также измеренных и рассчитанных температур поверхности крепи на сопряжениях горных выработок со стволом. Установлено, что значение коэффициента теплоотдачи для рассмотренного вентиляционного ствола неоднородно по высоте ствола вследствие различной степени обводненности его участков. Для трех рассмотренных участков ствола получены расчетные формулы для определения значений эффективного коэффициента теплоотдачи, при этом полученные значения оказались существенно больше значений, рассчитанных по классическим формулам для сухих выработок. Также определены значения эффективной температуропроводности крепи ствола на трех исследованных участках.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, вентиляционный ствол, сопряженный тепломассоперенос, влагоперенос в стволе, эффективный коэффициент теплоотдачи, эффективная температуропроводность крепи, реверсивный режим вентиляции

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90076, а также при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000396-6).

Для цитирования: *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.

© Е.В. Колесов, М.А. Семин, Б.П. Казаков, Н.А. Князев. 2023.

Improvement of calculation method for heat transfer coefficient in air shaft based on experimental measurements in reversal ventilation mode

E.V. Kolesov[1], M.A. Semin[1], B.P. Kazakov[1], N.A. Knjazev[1]

[1] Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: kolesovev@gmail.com

Abstract: The article describes an improved calculation method for the effective heat transfer between a wet air shaft and air flow based on experimental measurements in the mode of reversal ventilation using the numerical solution of an equation system of joint heat and mass exchange between air flow and the shaft walls with regard to moisture transfer. The direct model analysis of varying moisture content of air flow allowed more accurate estimation of the air temperature change in the shaft because of the mass exchange processes. The effective heat transfer coefficient included in the mathematical model of joint heat and mass transfer in the air, shaft lining and rock mass was determined by minimization of disagreement between the measured and calculated temperatures in air flow in the shaft and in adjoining roadways, as well as between the measured and calculated temperatures of the shaft lining at the junctions of the shaft and roadways. It is found that the value of the heat transfer coefficient in the test air shaft is nonuniform along the shaft height due to different moisture contents of the shaft areas. For three test shaft areas, the formulas are obtained to evaluate the effective heat transfer coefficients. The obtained values were much higher than the calculations using classical formulas for dry roadways. The effective temperature conductivity was also determined for three test areas of the shaft lining.

Key words: mine ventilation, air shaft, joint heat and mass transfer, moisture transfer, effective heat transfer coefficient, effective temperature conductivity of lining, reversal ventilation.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-35-90076, and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Contract No. 075-03-2021-374 dated 29 December 2020, RN 122012000396-6.

For citation: Kolesov E. V., Semin M. A., Kazakov B. P., Knjazev N. A. Improvement of calculation method for heat transfer coefficient in air shaft based on experimental measurements in reversal ventilation mode. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):57-71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57.

Введение

Шахтные вентиляционные стволы являются важнейшими элементами систем вентиляции шахт и рудников, при этом они часто служат для организации технологических процессов спуска-подъема людей, горной массы и различных материалов. Обеспечение безаварийной эксплуатации вентиляционных стволов в течение всего срока службы горного предприятия является необходимым условием безопасного и энергоэффективного ведения горных работ.

При реверсировании главной вентиляторной установки (ГВУ) без вспомогательной системы воздухоподготовки в зимнее время года существует опасность снижения температуры воздуха в вентиляционном стволе ниже +2 °С, вследствие чего может произойти охлаждение крепи ствола, которое может вызвать критические температурные деформа-

ции тюбинговой колонны, нарушение герметичности и разрушение крепи [1]. Кроме того, низкая температура воздуха в стволе может негативно повлиять на здоровье горнорабочих, эвакуация которых проводится через вентиляционный ствол [2], а также на технологическое оборудование, находящееся в стволе [3]. Таким образом, прогнозирование динамики нестационарных аэротермодинамических процессов в вентиляционном стволе и окружающих его крепи и массиве горных пород во время реверсирования ГВУ имеют большое значение. Успешное решение этой задачи во многом зависит от корректной параметризации модели теплообмена в стволе по данным экспериментальных исследований.

Нестационарные теплообменные процессы между окружающим ствол породным массивом, крепью ствола и проходящим по стволу воздушным потоком в шахтных воздухоподающих стволах имеют место в течение всего срока их эксплуатации вследствие сезонных и суточных изменений теплофизических параметров входящего воздуха [4—7]. Однако в вентиляционных стволах, эксплуатируемых длительное время, эти теплообменные процессы пренебрежимо малы вследствие двух факторов: во-первых, из-за малого изменения теплофизических параметров воздушного потока, приходящего к стволу, во-вторых, из-за формирования в приконтурном породном массиве тепловыравнивающего слоя [8].

Иная ситуация имеет место при реверсировании ГВУ: воздушная струя меняет свое направление, и через вентиляционный ствол в шахту начинает поступать воздух с поверхности. При этом активизируется процесс теплообмена между воздушным потоком, идущим по стволу, крепью ствола и приконтурным массивом вследствие того, что в данном случае температура воздуха будет существенно отличаться от температуры стенки ствола [9, 10].

Корректная формулировка процесса теплообмена между окружающим ствол породным массивом, крепью ствола и проходящим по стволу воздушным потоком в случае быстрого изменения теплофизических параметров воздушной струи требует учета сопряженности полей температуры массива, крепи и воздуха в каждый момент времени по всей глубине ствола [11].

Передача тепла между поверхностью ствола и воздушным потоком осуществляется согласно эмпирическому закону Ньютона-Рихмана [12]:

$$q = \alpha(T_{ст} - T_{в}), \qquad (1)$$

где q — плотность теплового потока через пограничный слой Вт/м^2; $T_{в}$ — средняя по сечению ствола температура воздуха, °С; $T_{ст}$ — температура стенки ствола, °С; α — коэффициент теплоотдачи Ньютона между стенкой ствола и воздушным потоком, характеризующий интенсивность теплоотдачи, Вт/(м^2·°С).

При расчете конвективной теплоотдачи наибольшую трудность представляет определение коэффициента теплоотдачи α, поскольку он зависит от большого количества параметров, характеризующих состояние и перемещение исследуемой среды, формы и размеров тела [11]:

$$\alpha = f(\rho, \mu, \lambda, \beta, c_p, L, v, ...), \qquad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3; μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; λ — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·°С); β — коэффициент объемного расширения жидкости, °С$^{-1}$; c_p — удельная массовая изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°С); L — характерный линейный размер поверхности обтекаемого тела, м.

Определить функциональную зависимость (2) аналитически в явном виде крайне затруднительно, и в большинстве

случаев не представляется возможным, поэтому коэффициенты теплоотдачи, как правило, определяют экспериментально, и далее при помощи методов теории подобия результаты одиночных экспериментов распространяют на большее число случаев по формулам для числа Нуссельта. Авторы работы [13] на основании обширных исследований на физических моделях сухих выработок разных форм и степени шероховатости стенок вывели формулу:

$$Nu = 0{,}0195\varepsilon \mathrm{Re}^{0{,}8}, \qquad (3)$$

где ε — коэффициент шероховатости, значения которого для разных типов выработок приведены в таблицах [13, 14], при этом его величина варьируется от 1 до 3,1; Re — критерий Рейнольдса, рассчитываемый по формуле:

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{\nu}, \qquad (4)$$

где V — средняя скорость движения воздуха в выработке, м/с; D — эквивалентный диаметр выработки, м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м^2/с.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{D}, \qquad (5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С).

После подстановки (3) и (4) в (5) коэффициенты теплоотдачи можно выразить в виде:

$$\alpha = \varepsilon\kappa\frac{V^{0{,}8}}{D^{0{,}2}}, \qquad (6)$$

где $\kappa = 0{,}0195\lambda/\nu^{0{,}8}$ для температуры воздуха от +10 °С до +25 °С варьируется от 3,71 до 3,60. Таким образом, произведение коэффициентов $\varepsilon\cdot\kappa$ варьируется от 3,60 до 11,16. Однако в выработках с влажными стенками вследствие процесса испарения влаги отвод тепла с поверхности стенок воздухом интенсифицируется, и в этом случае эффективное значение коэффициента теплоотдачи может быть существенно больше [8, 14]. К примеру, в работе [15] для учета влияния испарения влаги вводится приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{пр} = \alpha + \beta\left(\frac{P_{ст} - P_{в}}{T_{ст} - T_{в}}\right)r, \qquad (7)$$

$P_{ст}$ и $P_{в}$ — парциальное давление водяного пара вблизи стенки выработки и в воздухе соответственно, Па; $T_{ст}$ и $T_{в}$ — температура стенки выработки и воздуха соответственно, °С ; β — коэффициент массоотдачи, кг/(м^2·Па); r — скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг. Существуют расчетные формулы для определения β, однако они являются сугубо приближенными и не дают точной количественной оценки при расчете теплоотдачи в шахтных вентиляционных стволах [15, 16].

Исследованию теплоотдачи в шахтных вентиляционных стволах при реверсировании воздушной струи посвящены работы [17—19]. В статье [17] приведены оценки теплоотдачи от металла армирования и от стенок ствола во время реверса и показано, что на температуру воздуха в стволе теплоотдача от стенки оказывает более существенное влияние по сравнению с теплоотдачей от армирования. В этой же работе на основе применения приближенного выражения для коэффициента нестационарного теплообмена рассчитана временная динамика температуры воздуха в стволе на разных глубинах. Следует отметить, что в данной работе отсутствует валидация разработанной модели на основе экспериментальных измерений теплофизических параметров воздушного потока.

В статье [18] представлены результаты расчета модели сопряженного теплообмена между воздушным потоком, имеющим отрицательную температуру, и крепью вентиляционного ствола во время проведения планового реверса в руднике. Проведено сравнение результа-

тов моделирования с экспериментальными данными, в результате которого выявлено существенное расхождение между ними, указывающее на неучтенные при моделировании источники тепла и механизмы дополнительного нагрева воздуха. В частности, в модели не учтено наличие участков с тюбинговой крепью, температуропроводность которой существенно больше, чем у бетонной крепи; также в работе не учтено влияние влагообменных процессов на теплоотдачу в стволе.

В работе [19] представлены результаты моделирования нестационарного теплообмена в шахтном стволе во время реверсирования ГВУ, и подобран эффективный коэффициент теплоотдачи на основании сравнения данных, полученных в ходе математического моделирования и натурных измерений временной динамики температуры воздуха в вентиляционном канале и на сопряжении ствола с вентиляционным горизонтом. Эффективный коэффициент теплоотдачи оказался в 4,8 раз больше рассчитанного по формуле для сухих выработок [13, 14]. Следует учесть, что в модели [19] использовано приближение неизменного влагосодержания воздушной струи по тракту ее движения и не в полной мере учтено наличие участков ствола с чугунной тюбинговой крепью, что может существенно влиять на тепломассообменные процессы в шахтном стволе во время реверсирования ГВУ. Также необходимо отметить, что для более корректной валидации модели нестационарного теплообмена следует проводить измерения временной динамики не только температуры воздушной струи, но и стенок ствола с целью уточнения эффективного коэффициента температуропроводности системы «крепь-массив», разделения различных физических процессов — теплоотдачи на границе ствола, теплообмена в крепи и породном массиве, фазовых переходов поровой влаги. Таким образом, в настоящей работе совершенствуется экспериментальный метод расчета эффективного коэффициента теплоотдачи между крепью обводненного вентиляционного ствола и воздушным потоком на основе предложенного ранее в работе [19] подхода. Для решения указанной задачи проведены и описаны экспериментальные исследования аэротермодинамических параметров воздушной струи в стволе и примыкающих к нему горных выработках, а также исследования теплофизических параметров поверхности крепи и контура породного массива на сопряжениях горных выработок со стволом.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для получения исходных данных модели нестационарного сопряженного тепломассопереноса между реверсированной воздушной струей и стенками шахтного ствола проведены измерения параметров работы ГВУ, а также расходов, температуры и влажности воздуха на сопряжениях с горизонтами и в вентиляционном канале, температуры контура крепи ствола на сопряжениях с горизонтами.

Измерения проводились в зимний период во время планового реверсирования воздушной струи в вентиляционном стволе в медно-никелевом руднике, расположенном на севере Красноярского края. Упрощенная схема ствола с указанием высотных отметок на сопряжениях каналом ГВУ и вентиляционными горизонтами с замерными станциями представлена на рис. 1.

Во время реверсирования воздушной струи в стволе на замерных станциях проводились измерения следующих теплофизических параметров: А — температура, влажность, давление атмосферно-

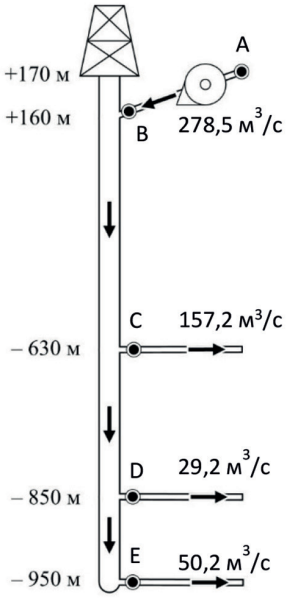

Рис. 1. Схема расположения замерных станций в вентиляционном стволе

Fig. 1. Layout of measuring stations in ventilation shaft

го воздуха; B — температура, влажность и расход воздуха в вентиляционном канале ГВУ; C, D, E — температура, влажность, расход воздуха, а также температура крепи на сопряжениях ствола с вентиляционными горизонтами.

Приборы, использованные при выполнении измерений в рамках настоящего исследования: анемометр АПР-2 фирмы «Экотехинвест» с абсолютной погрешностью измерений ±(0,2+0,05·V) м/с, где V — измеренная скорость воздушной струи; лазерный дальномер Disto D2 фирмы «Leica» с абсолютной погрешностью измерений ±0,0015 м для измерения площади сечения выработок; портативный метеорегистратор Kestrel DROP D3 с абсолютной погрешностью измерений температуры ±0,5 °C, относительной влажности ±2,0% для выполнения измерений параметров воздушного потока с ежеминутной записью результатов в месте установки; инфракрасный пирометр Fluke 561 фирмы «Fluke» с абсолютной погрешностью измерений ±1,0 °C для бесконтактного измерения температуры твердых поверхностей.

Измерения теплофизических параметров проводились с периодичностью 1—3 мин в течение планового реверсирования. Измерение скорости воздушной струи и площади сечения выработок осуществлялось согласно методике, описанной в работе [20].

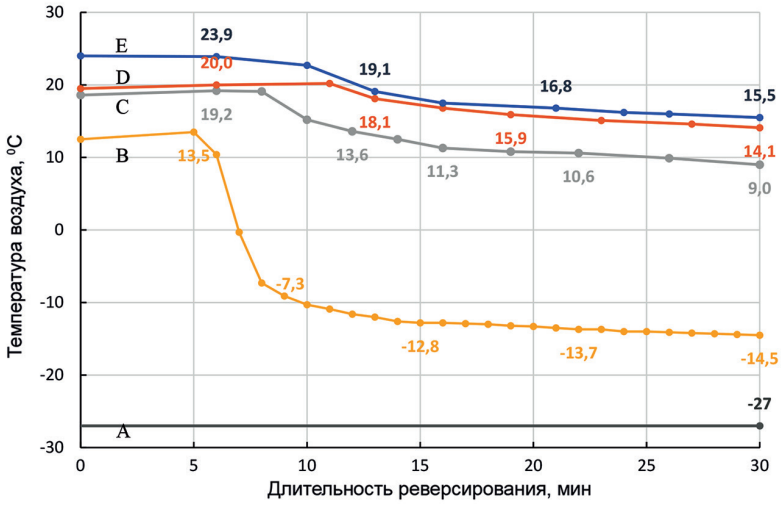

Рис. 2. Временная динамика температуры воздуха на замерных станциях во время реверсирования воздушной струи в вентиляционном стволе

Fig. 2. Temporal dynamics of air temperature at measuring stations during airflow reverse in upcast shaft

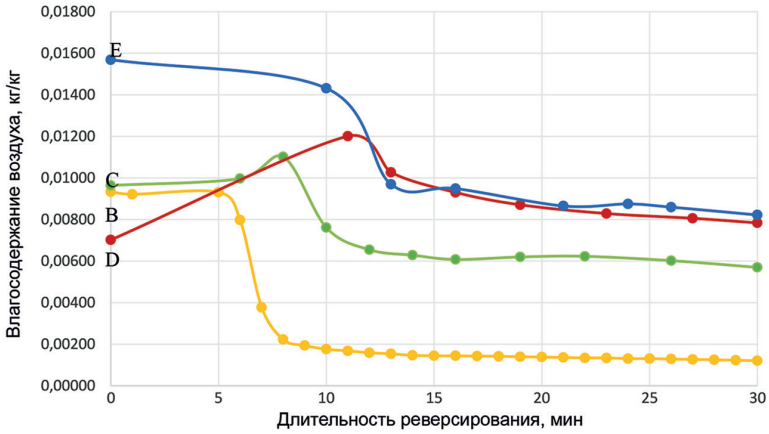

Рис. 3. Временная динамика влагосодержания воздуха на замерных станциях во время реверсирования воздушной струи в вентиляционном стволе

Fig. 3. Temporal dynamics of air moisture content at measuring stations during airflow reverse in upcast shaft

Результаты экспериментальных исследований

Продолжительность планового реверсивного режима проветривания составила 30 мин, при этом в течение 12 мин происходил процесс перераспределения воздушных потоков в шахтном стволе, а остальные 18 мин наблюдалось устойчивое проветривание в реверсе. Установившиеся расходы воздуха на замерных станциях вентиляционных горизонтов в реверсивном режиме проветривания представлены на рис. 1. Температура атмосферного воздуха во время проведения реверса была –27 °С при относительной влажности 15% и давлении 99 170 Па.

Результаты измерений температуры воздуха на замерных станциях представлены в работе [19]. Графики изменения температуры и влагосодержания воздуха на замерных станциях в течение времени реверсирования воздушной струи

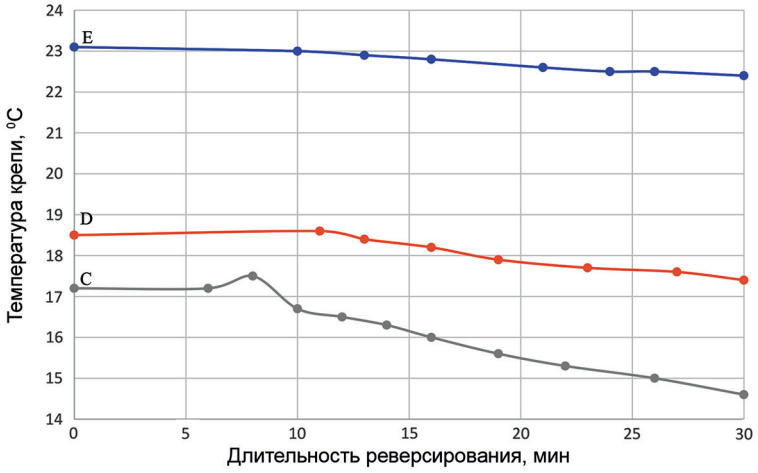

Рис. 4. Временная динамика температуры поверхности крепи ствола на сопряжениях с вентиляционными горизонтами во время реверсирования воздушной струи в вентиляционном стволе

Fig. 4. Temporal dynamics of shaft support surface at the junctions with the ventilation horizons during airflow reverse in upcast shaft

в стволе представлены соответственно на рис. 2 и 3. На рис. 4 представлены графики изменения температуры поверхности крепи на сопряжениях ствола с вентиляционными горизонтами.

Из рис. 2 и 3 видно, что после смены направления движения воздуха в стволе происходили существенно нелинейные процессы тепломассопереноса, связанные в первую очередь с перераспределением расходов воздуха. Период выхода расходов воздуха на постоянное значение в вентиляционном канале составил 8 мин, а на вентиляционных горизонтах — 12 мин.

Данные экспериментальных исследований позволяют параметризовать модель нестационарного сопряженного теплообмена между воздушной струей и стенками шахтного ствола в условиях реверсирования воздушного потока.

Моделирование тепломассопереноса в вентиляционном стволе

Расчет процесса нестационарного сопряженного теплообмена между воздушной струей и стенками ствола с учетом влагопереноса в условиях реверсирования воздушной струи описывается системой дифференциальных уравнений конвективного переноса теплоты в воздушном пространстве ствола [1]

$$\rho_a c_v \frac{dT}{dx} = \frac{P}{\rho_a}\frac{d\rho_a}{dx} - \\ -\rho_a L\frac{dm}{dx} + \frac{4\alpha}{DV}\left(T_m\left(t, D/2, x\right) - T\right), \quad (8)$$

и кондуктивного переноса теплоты в крепи ствола и окружающем ствол массиве горных пород

$$\frac{\partial T_m\left(t,r,x\right)}{\partial t} = a_m \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_m\left(t,r,x\right)}{\partial r}\right). \quad (9)$$

Уравнение (8) дополняется уравнениями состояния влажного воздуха [21]:

$$\rho_a = \frac{29P - 0{,}11\varphi\left[479 + \left(11{,}52 + 1{,}62T\right)^2\right]}{8{,}314\left(T + 273\right)} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{Pm}{611(0{,}622 + m)\exp\left(\dfrac{17{,}5T}{T + 241{,}5}\right)}, \quad (11)$$

$$P = 99\,170 + \rho_0 gx. \quad (12)$$

В рамках данной модели принят ряд допущений, а именно: не учитывается вертикальный теплоперенос и фазовые переходы влаги в массиве горных пород и крепи ствола, поле температур воздуха в поперечном сечении ствола принимается однородным, а распределение расходов воздуха в стволе при переходе на реверсивный режим считается установившимся. Во влажном массиве горных пород и крепи принимается гипотеза о локальном тепловом равновесии.

Граничное условие по температуре воздуха на входе в ствол задается в модели на основе данных, полученных в ходе экспериментальных измерений:

$$T(0) = T_0(t). \quad (13)$$

Начальное условие для температуры массива:

$$T_m(0, r, x) = T_{m0}(x). \quad (14)$$

Граничные условия для уравнения (9) вдали от контура ствола представляют собой температуру непотревоженного массива на данной глубине:

$$T_m(t, R_{out}, x) = T_{m0}(x). \quad (15)$$

Внешний радиус можно оценить согласно [22]:

$$R_{out} = \sqrt{4a_m\tau \mathrm{Ln}\left(\frac{s\Delta T_0}{4\pi a_m \tau\delta}\right)}. \quad (16)$$

На контуре ствола для уравнения (9) задается граничное условие согласно закону Ньютона-Рихмана:

$$\lambda\left.\frac{\partial T_m}{\partial r}\right|_{r\to D/2} = \alpha\left(T - T_m\right)\Big|_{r\to D/2}. \quad (17)$$

В системе уравнений (8) — (17): 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, Па, на глубине x, отсчитываемой от высотной отметки замерной станции В; L — скрытая теплота конденсации воды, Дж/кг; $m = m(x)$ — влагосодержание воздуха, заданное в модели на основе экспериментальных измерений, кг/кг; D = 8 м — диаметр ствола; $V = V(x)$ — 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 краю тепловыравнивающего слоя, принимается равным 0,1 °С; α — эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С); $T_m(t, r, x)$ — температура стенки ствола, °С; $a_m = a_m(x)$ — эффективный коэффициент температуропроводности крепи ствола с учетом наличия участков с чугунной тюбинговой крепью, м^2/с.

Ствол закреплен тюбинговой крепью на отметках от +171,3 м до +63,3 м; от –229,0 м до –358,7 м; от –438,7 м до –503,5 м; на остальных участках ствола — монолитная бетонная крепь.

Эффективный коэффициент теплоотдачи между воздушным потоком и стенками ствола определен согласно следующей формуле:

$$\alpha = k_{eff}(x) \cdot 3{,}6 \cdot \frac{V^{0,8}}{D^{0,2}}, \qquad (18)$$

где $k_{eff}(x)$ — коэффициент, учитывающий шероховатость и обводненность стенок ствола.

В результате численного решения системы (8) — (18) определены временные зависимости температуры воздуха по длине ствола и температуры крепи. Параметры $a_m(x)$ и $k_{eff}(x)$ подбирались таким образом, чтобы результаты экспериментальных измерений температуры воздуха на вентиляционных горизонтах $\tilde{T}(t_i)$ и температуры крепи $\tilde{T}_m(t_j)$ были как можно ближе к соответствующим температурам, полученным в результате моделирования, т.е. чтобы выполнялись условия:

$$\begin{cases} \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\left(\tilde{T}(t_i) - T(t_i)\right)^2}{n}} \to \min \\ \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{k}\left(\tilde{T}_m(t_j) - T_m(t_j)\right)^2}{k}} \to \min \end{cases} . \qquad (19)$$

В результате проведения процедуры минимизации невязок (19) получены следующие значения эффективной температуропроводности:

$a_m = 5{,}2 \cdot 10^{-7}$ м^2/с — для участков ствола с монолитной бетонной крепью,

$a_m = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м^2/с — для участков ствола с чугунной тюбинговой крепью.

Согласно справочному руководству для расчетов и проектирования промышленных печей под ред. Е.И. Казанцева температуропроводность чугуна варьируется в пределах от $1{,}41 \cdot 10^{-5}$ до $1{,}65 \cdot 10^{-5}$ м^2/с; а согласно СП 27.13330.2017 СНиП 2.03.03-84 температуропроводность тяжелого бетона варьируется в пределах от $2{,}80 \cdot 10^{-7}$ до $6{,}86 \cdot 10^{-7}$ м^2/с. Таким образом, рассчитанные в модели эффективные значения температуропроводностей бетона и чугуна укладываются в диапазоны возможных значений, представленных в справочниках.

На рис. 5 представлено сравнение временной динамики температуры поверхности крепи ствола на отметках –630 м, –850 м и –950 м, рассчитанной в модели (сплошные линии), и экспериментальных измерений (точки). Вертикальной линией на графике отмечен момент выхода расходов воздуха в вентиляционном канале на стационарное значение, принятый в модели за начальный момент времени. Малые отклонения

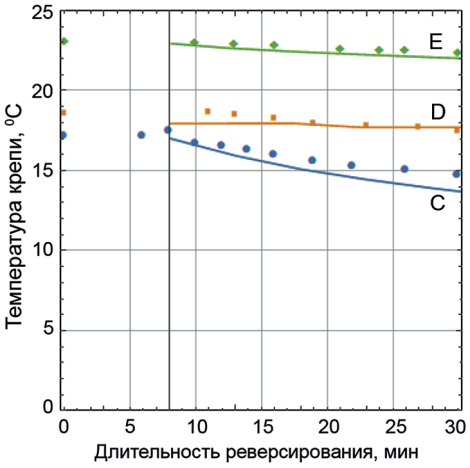

Рис. 5. Сравнительный анализ временной динамики температуры поверхности крепи ствола на отметках –630 м, –850 м и –950 м, рассчитанной в модели (сплошные линии), и экспериментальных измерений (точки)

Fig. 5. Comparative analysis of shaft lining surface temperature temporal dynamics at the levels –630 m, –850 m and –950 m, calculated in model (solid lines), and experimental measurements (points)

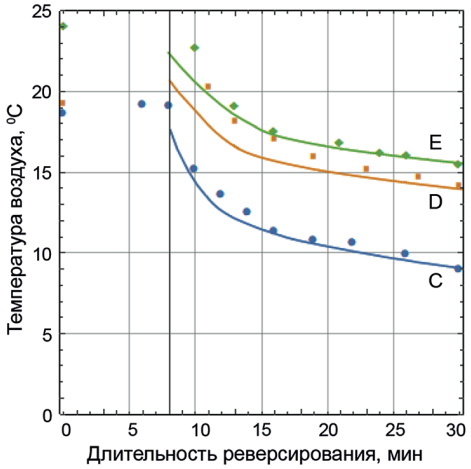

Рис. 6. Сравнительный анализ динамики температур воздуха на отметках –630 м, –850 м и –950 м, рассчитанных в модели (сплошные линии), и экспериментальных измерений (точки)

Fig. 6. Comparative analysis of air temperature temporal dynamics at the levels –630 m, –850 m and –950 m, calculated in model (solid lines), and experimental measurements (points)

модельных кривых от экспериментальных точек связано с приборной погрешностью измерения температуры крепи (±1,0 °C), а также с тем, что в модели не учитывался перенос тепла в массиве вдоль вертикальной координаты.

Значения коэффициента $k_{eff}(x)$ и соответствующие эффективные коэффициенты теплоотдачи для исследуемых участков ствола представлены в таблице. Различные значения $k_{eff}(x)$ для разных участков ствола обусловлены разной степенью обводненности крепи соответствующих участков, о чем косвенно свидетельствуют данные о влагосодержании воздушных потоков (рис. 3) и среднем приросте влагосодержания воздушной струи на каждые 100 м пути.

На рис. 6 представлено сравнение временной динамики температуры воздуха на сопряжениях ствола с горизонтами на отметках –630 м, –850 м и –950 м, рассчитанной в модели, и экспериментальных измерений. Малые рассогласования модельных кривых и экспериментальных точек связаны как с приборной погрешностью, так и с небольшими колебаниями расходов воздуха на горизонтах вследствие нестационарных процессов воздухораспределения в венти-

Эффективные коэффициенты теплоотдачи вентиляционного ствола
Effective transfer coefficients of the upcast shaft

Участок ствола, м / м	Средняя скорость воздушного потока, м/с	Средний прирост влагосодержания на 100 м, г/кг	$k_{eff}(x)$	Коэффициент теплоотдачи α, Вт/м^2· °C
+160 / –630	4,7	0,61	4,9	40,0
–630 / –850	1,8	1,20	7,4	28,1
–850 / –950	1,0	0,34	2,9	6,9

ляционной сети рудника во время реверсирования воздушной струи.

Разработанная модель позволяет определить температуру воздуха и крепи по всей глубине ствола в любой момент времени реверсирования воздушной струи, что важно при разработке аварийных режимов вентиляции рудника в холодное время года. В качестве примера на рис. 7 представлены распределения температуры поверхности крепи ствола и температуры воздуха по длине ствола на момент окончания планового реверса, полученные в результате численного моделирования. Скачки на кривой температуры крепи связаны с наличием чугунных тюбингов на трех участках ствола, а также с тем, что участок ствола от –850 м до –950 м изначально имел высокую температуру. Из рис. 7 видно, что на участках тюбинговой крепи теплообменные процессы протекают иначе, что сказывается на распределении температуры воздуха по глубине ствола.

Таким образом, описанный усовершенствованный метод расчета эффективного коэффициента теплоотдачи между крепью обводненного вентиляционного ствола и воздушным потоком по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания уточняет подход, представленный в работе [19], в части учета изменения влагосодержания воздушной струи по тракту ее движения вдоль ствола и наличия участков с чугунной тюбинговой крепью. А результаты измерения временной динамики температуры поверхности крепи ствола позволили уточнить эффективные коэффициенты температуропроводности системы «крепь-массив».

В результате параметризации модели удалось достичь хорошего соответствия расчетных значений температуры воздуха и крепи с измеренными. Это позволяет заключить, что разработанная модель является адекватной и применима для прогнозирования температурного поля в стволе при реверсировании воздушной струи. Полученные коэффициенты теплоотдачи на стенках ствола окажутся полезными при проектировании реверсивных режимов проветрива-

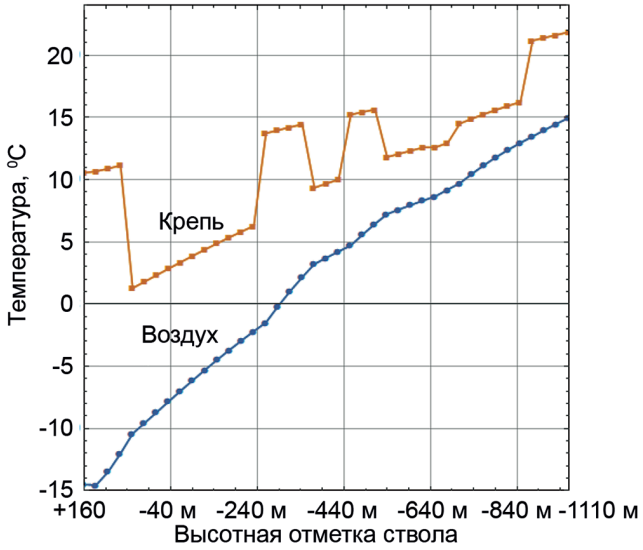

Рис. 7. Распределение температур поверхности крепи ствола и воздуха на момент окончания реверса
Fig. 7. Distribution of upcast shaft support surface temperature and air temperature at the end of airflow reverse

ния рудника в будущем с целью определения безопасных и эффективных мероприятий по эвакуации персонала по стволам, в которые осуществляется подача воздуха при реверсировании воздушной струи. Также следует учесть, что полученные результаты могут быть не в полной мере справедливы для других вентиляционных стволов, отличающихся геометрическими параметрами, обводненностью или микроклиматическими условиями. Исследование термодинамических процессов для других вентиляционных стволов с отличающимися параметрами и свойствами в реверсивном режиме проветривания с формулировкой обобщающих выводов является предметом дальнейших исследований.

Заключение

В статье представлен усовершенствованный метод расчета эффективного коэффициента теплоотдачи между крепью обводненного вентиляционного ствола и воздушным потоком по данным экспериментальных исследований. Методика основана на численном решении системы уравнений сопряженного теплообмена между воздушным потоком и стенками ствола с учетом влагопереноса в условиях реверсирования воздушной струи. Параметризация и валидация модели осуществлялась на основе измеренной временной динамики аэротермодинамических параметров реверсированной воздушной струи в стволе и примыкающих к нему горных выработках, а также температуры поверхности крепи на сопряжениях горных выработок со стволом. Учет экспериментальных данных о меняющейся температуре крепи позволил явно разделить влияние теплопереноса в крепи и породном массиве и теплоотдачи на границе крепи с воздушным потоком. Прямой модельный учет меняющегося влагосодержания воздушной струи позволил более точно оценить изменение температуры воздуха в стволе, вызванное массообменными процессами.

Получено, что коэффициент теплоотдачи меняется по высоте ствола в диапазоне от 40,0 до 6,9 Вт/м^2· °С. Его изменчивость по высоте ствола связана с различной средней скоростью воздушного потока на исследуемых участках, а также с различной степенью обводненности крепи. Установлено, что чем больше степень обводненности крепи различных участков ствола, тем больше коэффициент теплоотдачи. Также в работе определены эффективные коэффициенты температуропроводности крепи на различных участках ствола, которые составили $5{,}2\cdot10^{-7}$ м^2/с для монолитной бетонной крепи и $1{,}5\cdot10^{-5}$ м^2/с для чугунной тюбинговой крепи, что соответствует диапазону их возможных значений, представленным в справочной литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бублик С. А.*, *Семин М. А.*, *Левин Л. Ю.* Исследование прочности монолитной бетонной крепи шахтного ствола в условиях переменных тепловых нагрузок // Вычислительная механика сплошных сред. — 2021. — Т. 14. — № 2. — С. 220—232. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.19.

2. *Куприянов В. В.*, *Бондаренко И. С.* Факторы влияния на резерв времени для выхода из подземных аварий в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 139—149. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_139.

3. *Плешко М. С.*, *Насонов А. А.*, *Дымникова О. В.*, *Рябова Н. В.* Обеспечение комплексной безопасности работ по восстановлению и реконструкции шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 104—112. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-104-112.

4. *Roghanchi P.*, *Kocsis K. C.* Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, pp. 255 — 262. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.002.

5. *Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D.*, *Mathews E. H.* Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering November. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42 — 51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

6. *Scalise K. A.*, *Teixeira M. B.*, *Kocsis K.* Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 38, pp. 575 — 579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.

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

8. *Венгеров И. Р.* Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 632 с.

9. *Хохолов Ю. А.* Особенности процессов тепло и массообмена, происходящих в предохранительной подушке при подземной доработке подкарьерных запасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 13 — 21. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21.

10. *Семин М. А.*, *Левин Л. Ю.* Теоретическое исследование теплообмена между воздушным потоком и крепью шахтного ствола при наличии тепловой конвекции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 151 — 167. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

11. *Колесов Е. В.*, *Казаков Б. П.*, *Семин М. А.* Моделирование теплообмена между крепью шахтного ствола и проходящим по стволу воздухом в условиях смешанной конвекции // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 5. — С. 160 — 171. DOI: 10.15372/FTPRPI20210515.

12. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.

13. *Щербань А. Н.*, *Кремнев О. А.* Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Т. 1. — Киев: Изд-во АН УССР, 1959. — 430 с.

14. *Воропаев А. Ф.* Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: Недра, 1966. — 219 с.

15. *Щербань А. Н.*, *Кремнев О. А.*, *Журавленко В. Я.* Руководство по регулированию теплового режима шахт: изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Недра, 1977. — 359 с.

16. *Дядькин Ю. Д.*, *Шувалов Ю. В.*, *Гендлер С. Г.* Тепловые процессы в горных выработках. — Л.: Изд-во ЛГИ, 1978. — 104 с.

17. *Петров Н. Н.*, *Тимошенко И. И.* Тепловой режим вентиляционных стволов и его регулирование // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1985. — № 3. — С. 59 — 63.

18. *Olkhovskiy D. V.*, *Kuzminykh E. G.*, *Zaitsev A. V.*, *Semin M. A.* Study of heat and mass transfer in ventilation shafts of deep mines in the case of airflow reverse // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1945, no. 1, article 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012044.

19. *Князев Н. А.*, *Кормщиков Д. С.* Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. — 2022. — № 3(88). — С. 74 — 80. DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.

20. *Ксенофонтова А. И.*, *Карпухин В. Д.*, *Харев А. А.* Вентиляционное сопротивление горных выработок. — М., Л.: Углетехиздат, 1950. — 240 с.

21. *Li Z., Wang T., Zhang M., Jia J., Lin L.* Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of airflow temperature in mine wet roadway // Journal of the China Coal Society. 2017, vol. 42, no. 12, pp. 3176 — 3181. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0700.

22. *Зайцев А. В.* Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. — 19 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Bublik S. A., Semin M. A., Levin L. Yu. Study of the strength of monolithic concrete lining of mine shaft under variable heat loads. *Computational Continuum Mechanics*. 2021, vol. 14, no. 2, pp. 220—232. [In Russ]. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.19.

2. Kupriyanov V. V., Bondarenko I. S. Factor of influence on time allowance in emergency preparedness in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 139—149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_139.

3. Pleshko M. S., Nasonov A. A., Dymnikova O. V., Ryabova N. V. Overall safety of recovery and reconstruction of mine shafts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 104—112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-104-112.

4. Roghanchi P., Kocsis K. C. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, pp. 255—262. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.002.

5. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering November*. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42—51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

6. Scalise K. A., Teixeira M. B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 38, pp. 575—579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.

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

8. Vengerov I. R. *Teplofizika shakht i rudnikov. Matematicheskie modeli*. T. 1. Analiz paradigmy [Thermophysics of mines. Mathematical models. Vol. 1. Analysis of the paradigm], Donetsk, Nord-Press, 2008, 632 p.

9. Khokholov Yu. A. Features of heat- and mass-exchange in a safety cushion in mining under open pit bottom. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 13—21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21.

10. Semin M. A., Levin L. Yu. Theoretical research of heat exchange between air flow and shaft lining subject to convective heat transfer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 151—167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

11. Kolesov E. V., Kazakov B. P., Semin M. A. modeling air flow–lining heat transfer in the conditions of mixed convection in a mine shaft. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 5, pp. 160—171. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI 20210515.

12. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 600 p.

13. Shcherban' A. N., Kremnev O. A. *Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniya teplovogo rezhima glubokikh shakht*. T. 1 [Scientific basis for calculating and regulating the thermal regime of deep mines, vol. 1], Kiev, Izd-vo AN USSR, 1959, 430 p.

14. Voropaev A. F. *Teoriya teploobmena rudnichnogo vozdukha i gornykh porod v glubokikh shakhtakh* [Theory of heat exchange between mine air and rocks in deep mines], Moscow, Nedra, 1966, 219 p.

15. Shcherban' A. N., Kremnev O. A., Zhuravlenko V. Ya. *Rukovodstvo po regulirovaniyu teplovogo rezhima shakht*: izd. 3 [Guidance for regulating the thermal regime of mines: 3rd edition], Moscow, Nedra, 1977, 359 p.

16. Dyad'kin Yu. D., Shuvalov Yu. V., Gendler S. G. *Teplovye protsessy v gornykh vyrabotkakh* [Thermal processes in mine workings], Leningrad, Izd-vo LGI, 1978, 104 p.

17. Petrov N. N., Timoshenko I. I. Thermal regime of upcast shafts and its regulation. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1985, no. 3, pp. 59—63. [In Russ].

18. Olkhovskiy D. V., Kuzminykh E. G., Zaitsev A. V., Semin M. A. Study of heat and mass transfer in ventilation shafts of deep mines in the case of airflow reverse. J*ournal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1945, no. 1, article 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012044.

19. Knyazev N. A., Kormshhikov D. S. Improving the safety of miners evacuation through upcast shafts during the airflow reversal in the cold season at a deep mine. *Gornoe ekho*. 2022, no. 3(88), pp. 74—80. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.

20. Ksenofontova A. I., Karpukhin V. D., KHarev A. A. *Ventilyatsionnoe soprotivlenie gornykh vyrabotok* [Ventilation resistance of mine workings], Moscow, Leningrad, Ugletekhizdat, 1950, 240 p.

21. Li Z., Wang T., Zhang M., Jia J., Lin L. Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of airflow temperature in mine wet roadway. *Journal of the China Coal Society*, 2017, vol. 42, no. 12, pp. 3176—3181. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0700.

22. Zaytsev A. V. *Razrabotka sposobov normalizatsii mikroklimaticheskikh usloviy v gornykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov* [Development of ways to normalize microclimatic conditions in the mine workings of deep mines], Candidate's thesis, Perm, GI UrO RAN, 2013, 19 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесов Евгений Викторович[1] — инженер,
e-mail: kolesovev@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0755-7405,
Семин Михаил Александрович[1] — д-р техн. наук,
ученый секретарь, зав. лабораторией,
ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
Казаков Борис Петрович[1] — д-р техн. наук,
профессор, главный научный сотрудник,
Князев Никита Алексеевич[1] — младший научный сотрудник,
[1] Горный институт УрО РАН.
Для контактов: Колесов Е.В., e-mail: kolesovev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.V. Kolesov[1], Engineer,
e-mail: kolesovev@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0755-7405,
M.A. Semin[1], Dr. Sci. (Eng.),
Academic Secretary, Head of Laboratory,
ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
B.P. Kazakov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Chief Researcher,
N.A. Knjazev[1], Junior Researcher,
[1] Mining Institute of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Perm, 614007, Russia.
Corresponding author: E.V. Kolesov, e-mail: kolesovev@gmail.com.

Получена редакцией 14.12.2022; получена после рецензии 23.01.2023; принята к печати 10.02.2023.
Received by the editors 14.12.2022; received after the review 23.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.