

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПЛОСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

А.Ф. Галкин¹, И.В. Курта¹, В.Ю. Панков²

¹ Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия, e-mail: afgalkin@mail.ru

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Аннотация: Исследован тепловой поток в горных выработках подземных сооружений различного назначения при моделировании их как объектов с плоской или сферической симметрией и введением понятия эквивалентного радиуса. Целью работы было определение области возможного перехода при решении тепловых задач от сферической к плоской симметрии. Получены простые аналитические зависимости для определения теплового потока на границе выработки различной симметрии как функции критерия Фурье. Выполнено сравнение количественного изменения теплового потока в горных выработках различной симметрии при граничных условиях первого рода. Определена рациональная область возможного перехода от сферической к плоской симметрии, когда количественная ошибка при прогнозе теплового потока не превышает допустимой в инженерной практике величины. Установлены предельные значения сечений выработок и длительности протекания тепловых процессов, при которых для аналитического решения тепловых задач возможен переход от сферической к плоской симметрии. В частности, показано, что для малых времен протекания тепловых процессов, например, пожара в подземном сооружении, вполне допустимым является использование плоской симметрии для прогноза температурного режима горных пород, даже для выработок небольшого сечения (менее 10 м²).

Ключевые слова: подземное сооружение, горная выработка, моделирование, сферическая симметрия, тепловой поток, эквивалентный радиус, оптимальное сечение, ошибка вычисления.

Для цитирования: Галкин А. Ф., Курта И. В., Панков В. Ю. Сравнение теплового потока в горных выработках плоской и сферической симметрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №10. – С.133–141. DOI:10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141.

Comparison of heat flows in underground openings of plane and spherical symmetry

A.F. Galkin¹, I.V. Kurta¹, V.Yu. Pankov²

¹ Ukhta State Technical University, Ukhta, Republic of Komi, Russia, e-mail: afgalkin@mail.ru

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Republic of Sakha, Russia

Abstract: Heat flow in different-purpose underground openings is analyzed in modeling them as plane and spherical symmetry objects, with introduction of notion of an equivalent radius. The aim of the study is to determine a possible transition zone between spherical and plane symmetry in heat problem solution. The simple analytic dependences are obtained for determining

heat flow at the boundary of different symmetry openings as a function of the Fourier criterion. The quantitative changes in heat flow in different symmetry openings at the first order boundary condition are compared. The rational zone is determined for possible transition from the spherical to plane symmetry at the quantitative error of heat flow prediction not higher than the permissible value in the engineering practice. The limit cross-sections of underground openings and the heat flow durations such that the spherical-to-plane symmetry transition is possible for analytical solution of heat problems are found. In particular, it is shown that at short durations of heat processes, for instance, fire in an underground structure, it is entirely admissible to use plane symmetry to predict temperature condition in rock mass for underground openings of small cross-section (less than 10 m^2).

Key words: underground structure, underground opening, modeling, spherical symmetry, heat flow, equivalent radius, optimized cross-section, calculation error.

For citation: Galkin A. F., Kurta I. V., Pankov V. Yu. Comparison of heat flows in underground openings of plane and spherical symmetry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):133-141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141.

Введение

При строительстве и эксплуатации подземных сооружений различного назначения (шахт, рудников, складов, холодильников, тоннелей и т.п.) тепловой фактор зачастую является определяющим при выборе научно обоснованных и экономически эффективных технических и технологических решений [1 – 6]. Прогнозу теплового режима в горных выработках и окружающем породном массиве уделяется большое внимание в научном и инженерном сообществе уже на стадии проектирования [7 – 13]. При этом наряду с численными методами прогноза с использованием специальных программных комплексов по-прежнему актуальным являются аналитические решения задач горной теплофизики [14 – 19].

При математическом моделировании тепловых процессов для получения аналитических решений тепловых задач обычно используют понятие эквивалентного радиуса горной выработки [1, 16 – 19]. В этом случае реальное сечение горной выработки «S» заменяют кругом или шаром с эквивалентным радиусом, определяемым с помощью простого выражения $R_0 = 0,564\sqrt{S}$ при моделирова-

нии выработок в цилиндрической симметрии или $R_0 = 0,282\sqrt{S}$ при использовании сферической симметрии.

Протяженные выработки, например, штольни подземных складов и холодильников, выработки подземных коллекторов моделируются с использованием цилиндрической симметрии [1, 10, 17]. Выработки камерного типа: камеры хранения материалов и продовольствия, подземные нефтехранилища, подземные убежища и т.п. рассматривают как объекты сферической симметрии [7, 18]. Для выработок большого сечения, или, как их еще называют, большепролетных выработок, при решении тепловых задач используют вместо цилиндрической и сферической плоскую симметрию. При этом руководствуются простым соображением, что при большом эквивалентном радиусе выработки поверхность теплообмена можно рассматривать как плоскую, а эффект кривизны поверхности не окажет влияния на точность прогноза. Собственно, это следует из простого анализа одномерного уравнения Фурье для тел различной симметрии, которые отличаются от плоскости только дополнительным членом пропорциональным b/R , где $b = 0, 1, 2$ для плоской,

цилиндрической и сферической симметрии, соответственно.

Отсюда очевидно, что чем больше значение R , тем меньше второй член в уравнении, и тем меньше влияние кривизны на точность прогноза. Эффект кривизны поверхности заключается в том, что для плоского случая при увеличении координаты на ΔR поверхность и объем пород, участвующих в теплообмене, не изменяются, т.е. ΔS и ΔV остаются постоянными величинами на протяжении всего времени протекания тепловых процессов. А для цилиндрической и сферической симметрий они изменяются, возрастая с каждым приращением координаты на значение ΔR . В то же время, аналитические решения плоских задач значительно проще, чем решение задач в цилиндрической или шаровой симметрии, и во многих интересных с практической точки зрения случаях получаются в явном виде, что особенно важно для качественного и количественного анализа зависимостей и оценки влияния отдельных составляющих теплового процесса на конечный результат. Цель настоящей работы — определение рациональной области перехода от сферической симметрии к плоской при моделировании тепловых процессов в горных выработках подземных сооружений.

Метод расчета

Для достижения поставленной в работе цели воспользуемся безразмерным критерием β , который характеризует отношение тепловых потоков на границе горной выработки при использовании плоской q_1 и сферической q_2 симметрии, т.е. $\beta = (q_2/q_1)$. Значение теплового потока для наглядности и простоты получаемых формул будем определять из аналитических решений соответствующих уравнений Фурье при граничных условиях первого рода:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{b}{R} \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right), \quad (1)$$

$$T = t \text{ при } R = R_0 \text{ и } T = T_e \text{ при } R = \delta. \quad (2)$$

Здесь $b = 0$ для плоской симметрии и $b = 2$ для сферической симметрии; T — температура горных пород, °C; t — температура воздуха в выработке, °C; T_e — начальная температура горных пород, °C; R — координата, м; R_0 — эквивалентный радиус выработки, м; δ — радиус теплового влияния выработки, м; τ — время, с.

Используя ранее полученные решения уравнения (1) при граничных условиях (2) с использованием интегрального метода [5, 10, 18–20] найдем удельные тепловые потоки на стенке выработки q_1 и q_2 (Вт/м²) в виде:

$$q_1 = -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial R} \Big|_{R=0} = n_1 / \sqrt{3Fo}, \quad (3)$$

$$q_2 = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial R} \Big|_{R=R_0} = n_1 / \sqrt{3Fo}, \quad (4)$$

$$n_1 = \lambda(t - T_e) / R_0. \quad (5)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м · К); Fo — число Фурье, равное at / R_0^2 , где a — температуропроводность горных пород, м²/с.

Температуропроводность горных пород (коэффициент температуропроводности) является комплексной величиной, определяется по формуле: $a = \lambda / (\rho c)$, где c — удельная теплоемкость горных пород, Дж/кг · К; ρ — плотность горных пород, кг/м³.

Соответственно, параметр β будет равен:

$$\beta = 1 + 1 / \sqrt{3Fo}. \quad (6)$$

Относительную ошибку определения теплового потока при использовании плоской симметрии вместо сферической симметрии найдем из выражения:

$$\varepsilon = abs(1 - \beta) = 1 / \sqrt{3Fo}. \quad (7)$$

В инженерной практике допустимой считается ошибка, которая не превышает 10%, т.е. $\varepsilon \leq 0,1$.

Используя это неравенство легко найти предельное значение эквивалентного радиуса и реального сечения горной выработки, при которых замена одной симметрии на другую даст приемлемую точность прогноза теплового потока на стенке горной выработки. Эквивалентный радиус должен быть равен или больше значения $R_0 \geq 0,1\sqrt{3at}$, м.

А реальное сечение больше или равно значению $S \geq 0,04\pi at$, м².

Анализ и обсуждение результатов

По полученным формулам были проведены варианты расчетов, результаты которых представлены в виде графиков. На рис. 1 представлен 3D график изменения теплового потока на контуре выработки сферической симметрии для малых времен (меньше 24 ч) в зависимости от значения эквивалентного радиуса, который изменяется в широком диапазоне: от 1,0 м ($S = 3,5$ м²) до 10,0 м ($S = 355$ м²) при различных значениях параметра n_1 , определяемого по формуле (5).

Такой широкий диапазон изменения эквивалентного радиуса выбран в связи с тем, что подземные сооружения различного назначения имеют очень разные геометрические параметры. Например, призабойная зона геологоразведочных шурфов имеет эквивалентный радиус, близкий к единице, а эквивалентный радиус камер подземных складов и холодильников, призабойных зон автомобильных и железнодорожных тоннелей может достигать 9–10 м. Из графика видно, что чем больше эквивалентный радиус выработки, тем медленнее идет изменение теплового потока. Наиболее быстрое изменение происходит в пределах эквивалентного радиуса 1–3 м. Причем эта зависимость от времени также имеет наибольший градиент для выработок с небольшим эквивалентным радиусом. Если мы будем моделировать тепловые процессы для времен, измеряющихся сотнями часов, то эта зависимость градиента от времени будет еще ярче выражена, особенно для выработок с эквивалентным радиусом меньше 3 м. Это отчетливо видно из графиков, представленных на рис. 2.

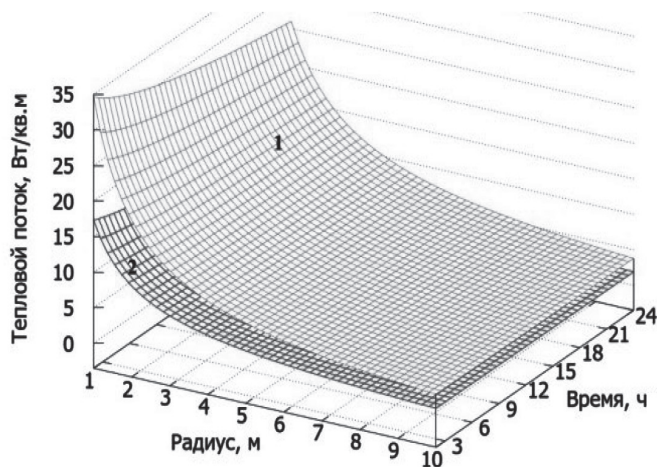


Рис. 1. Изменение теплового потока во времени на поверхности в зависимости от эквивалентного радиуса выработки для малых времен: 1 – $n_1 = 40$ Вт/м²; 2 – $n_1 = 20$ Вт/м²

Fig. 1. The change in thermal stream over time on the surface depending on the equivalent radius of generation for small times: 1 – $n_1 = 40$ W/m²; 2 – $n_1 = 20$ W/m²

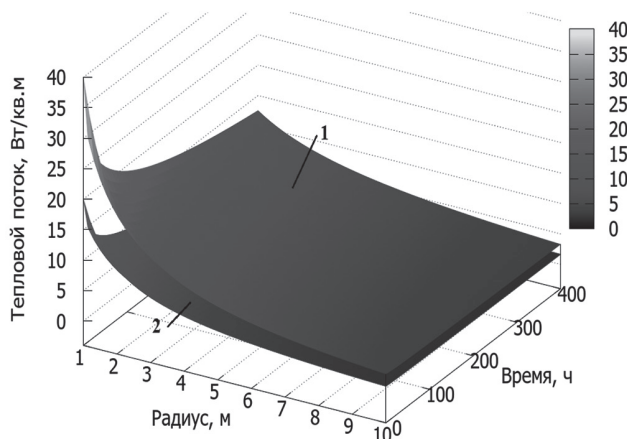


Рис. 2. Изменение теплового потока во времени на поверхности в зависимости от эквивалентного радиуса выработки для больших времен: 1 — $n_1 = 40 \text{ Вт/м}^2$; 2 — $n_1 = 20 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 2. The change in thermal stream over time on the surface depending on the equivalent radius of generation for large times: 1 — $n_1 = 40 \text{ W/m}^2$; 2 — $n_1 = 20 \text{ W/m}^2$

Очевидно, что для разных значений параметра n_1 , определяющего тепловой поток в начальный момент времени, характер изменения теплового потока во времени остается постоянным и отличается только количественно. Причем для выработок с большим эквивалентным радиусом эта зависимость мало чем отличается как для малых, так и для больших времен, что следует из простого сравнения графиков на рис. 1 и 2.

Практический интерес представляет нахождение области тепловых расчетов, когда замена сферической симметрии на плоскую не приведет к ошибке больше допустимой. На рис. 3 представлены результаты расчетов по определению сечений горных выработок, которые разрешают такую замену, при этом ошибка не превысит значения, допустимого в инженерной практике (10%).

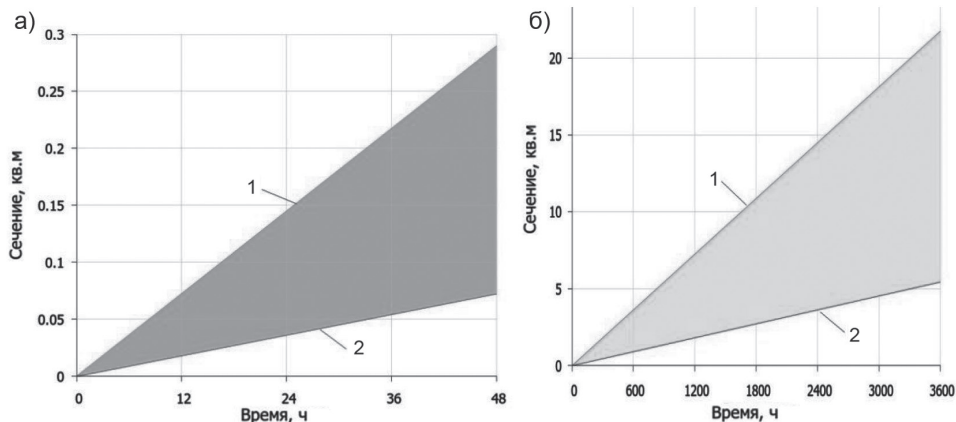


Рис. 3. Область возможного перехода от сферической к плоской симметрии для малых времен (а); больших времен (б): 1 — температуропроводность горных пород $a = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 — температуропроводность горных пород $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Fig. 3. The region of a possible transition from spherical to plane symmetry for: a — of small times; b — great times: 1 — thermal diffusivity of rocks $a = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 2 — thermal diffusivity of rocks $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

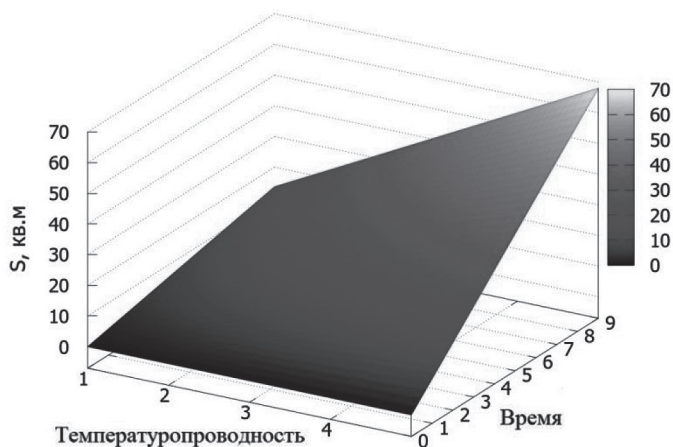


Рис. 4. Допустимое сечение выработок для перехода к плоской симметрии в зависимости от времени ($\tau \cdot 10^{-3}$, ч) для вмещающих пород с различным коэффициентом температуропроводности ($a \cdot 10^6$, m^2/c)
 Fig. 4. The permissible workings cross section for transition to plane symmetry depending on time ($\tau \cdot 10^{-3}$ hours) for the host rocks with different thermal diffusivity ($a \cdot 10^6$ m^2/s)

В качестве возможной области изменения теплофизических свойств горных пород взят диапазон изменения значения коэффициента температуропроводности от $1 \cdot 10^{-6}$ m^2/c до $4 \cdot 10^{-6}$ m^2/c . В этот диапазон попадает большинство типов горных пород, как скальных, так и осадочных. Анализ графиков на рисунках показывает, что искомая область существенно зависит от теплофизических свойств пород и длительности протекания тепловых процессов. При этом чем больше длительность протекания тепловых процессов, тем зависимость от теплофизических свойств вмещающих пород выше. Область допустимых значений увеличивается как для малых, так и больших времен. Это отчетливо видно на обобщающем 3D графике (рис. 4). График демонстрирует связь допустимого сечения выработки с теплофизическими свойствами вмещающих горных пород и временем протекания тепловых процессов.

Из графика следует, что есть прямая зависимость допустимого сечения выработки от теплофизических свойств вмещающих горных пород: чем больше коэффициент температуропровод-

ности вмещающих пород, тем больше допустимое сечение выработки. Аналогичная функциональная зависимость допустимого сечения существует и от длительности протекания рассматриваемого теплового процесса для конкретной практической задачи.

Выводы

Исследован тепловой поток в горных выработках подземных сооружений различного назначения при моделировании их как объектов с плоской или сферической симметрией с введением понятия эквивалентного радиуса. Выполнено сравнение количественного изменения теплового потока в горных выработках различной симметрии при граничных условиях первого рода. Определена рациональная область возможного перехода от сферической к плоской симметрии, когда количественная ошибка при прогнозе теплового потока не превышает допустимой в инженерной практике величины. Установлены предельные значения сечений выработок и длительности протекания тепловых процессов, при которых для аналитического решения тепловых задач возможен переход

от сферической к плоской симметрии. Установлено, что для малых времен протекания тепловых процессов, например, пожара в подземном сооружении, вполне допустимым является использование плоской симметрии для прогноза температурного режима горных пород, даже для выработок небольшого сечения (менее 10 м²).

Показано, что чем больше длительность протекания тепловых процессов в конкретной рассматриваемой задаче, тем больше сечение выработки должно быть для достижения необходимой точности прогноза. Установлена существенная зависимость допустимого сечения выработки от теплофизических свойств вмещающих горных пород: чем

больше коэффициент температуропроводности вмещающих пород, тем больше допустимое сечение выработки.

Дальнейшим направлением исследований должен быть поиск области возможного перехода от цилиндрической симметрии к плоской. Эта проблема важна при решении задач прогноза теплового режима горных пород для протяженных выработок большого сечения.

Представляет также научный интерес проведение аналогичных исследований для задач с фазовыми переходами влаги в горных породах (процессы оттаивания и промерзания горных пород), вмещающих выработки подземных сооружений различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скуба В. Н. Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. — Новосибирск: Наука, 1974. — 118 с.
2. Greth A., Roghanchi P., Kocsis K. A review of cooling system practices and their applicability to deep and hot underground US mines / Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. Golden, 2017. Vol. 11. Pp. 1–9.
3. Danko G. Ventilation and climate control of deep mines. McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology. 2012. Pp. 296–299.
4. Кузьмин Г. П. Подземные сооружения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2002. — 176 с.
5. Бондарев Э. А. Красовицкий Б. А. Температурный режим нефтяных и газовых скважин. — Новосибирск: Наука, 1974. — 88 с.
6. Казаков Б. П., Зайцев А. В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2014. — № 10. — С. 91–97.
7. Галкин А. Ф., Курта И. В., Панков В. Ю. Оценка длительности периода временной консервации золотодобывающих рудников криолитозоны // Горный журнал. — 2020. — № 4. — С. 37–41.
8. Вернигор В. М., Морозов К. В., Бобровников В. Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород // Записки Горного института. — 2013. — Т. 205. — С. 139–140.
9. Лапшин А. А. Влияние твердеющей закладки в очистных камерах на микроклимат глубоких шахт // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 10. — С. 3–11.
10. Galkin A. F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. No 8. Pp. 74–77.
11. Тынына С. В. О повышении эффективности систем местного кондиционирования тупиковых подготовительных выработок глубоких шахт // Геотехническая механика. — 2011. — № 94. — С. 266–271.

12. Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 22 — 25.

13. Shuai Zhu, Shiyue Wu, Jianwei Cheng, Siyuan Li, Mingming Li An underground air-route temperature prediction model for ultra-deep coal mines // Minerals. 2015. Vol. 5. No 3. Pp. 527 — 545.

14. Khalid M. Z., Zubair M., Ali M. An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry // Applied Mathematics and Computation. 2019. Vol. 342. Pp. 295 — 308.

15. McCord D., Crepeau J., Siahpush A., Brogin J. Analytical solutions to the Stefan problem with internal heat generation // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 103. Pp. 443 — 451.

16. Божилов В., Петров К. Тепло- и гидроизоляция — эффективное средство улучшения микроклимата на рудниках / Доклады 9-й сессии Международного бюро по горной теплофизике. — Польша: Гливице, 2000. — С. 245 — 255.

17. Alab'ev V., Alekseenko S. N., Shaykhlislamova I. Methodological basics of gas-drainage pipeline engineering for transporting wet firedamp in winter time / Progressive technologies of coal, coalber methane and ores mining. CRC Press, London. 2014, pp. 195 — 200.

18. Galkin A. F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. No 8. Pp. 68 — 73.

19. Лапшин А. А. Математическое моделирование процессов нормализации микроклимата в глубоких рудных шахтах // Науковий Вісник НГУ. — 2014. — № 3. — С. 137 — 144.

20. Гудмен Т. Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Проблемы теплообмена: сборник статей. — М.: Атомиздат, 1967. — С. 41 — 95. **ИТАБ**

REFERENCES

1. Skuba V. N. *Issledovanie ustoychivosti gornyykh vyrabotok v usloviyakh mnogoletney merzloty* [Study of the stability of mine workings in the conditions of permafrost], Novosibirsk, Nauka, 1974, 118 p.

2. Greth A., Roghanchi P., Kocsis K. A review of cooling system practices and their applicability to deep and hot underground US mines. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. Golden, 2017. Vol. 11. Pp. 1 — 9.

3. Danko G. *Ventilation and climate control of deep mines*. McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology. 2012. Pp. 296 — 299.

4. Kuzmin G. P. *Podzemnye sooruzheniya v kriolitozone* [Underground structures in the permafrost zone], Novosibirsk, Nauka, 2002, 176 p.

5. Bondarev E. A. Krasovitsky B. A. *Temperaturnyy rezhim neftyanykh i gazovykh skvazhin* [The temperature regime of oil and gas wells], Novosibirsk, Nauka, 1974, 88 p.

6. Kazakov B. P., Zaitsev A. V. The study of the formation of the thermal regime of deep mines. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2014, no 10, pp. 91 — 97. [In Russ].

7. Galkin A. F., Kurt I. V., Pankov V. Yu. Estimation of the duration of the period of temporary conservation of gold mines in the permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no 4, pp. 37 — 41. [In Russ].

8. Vernigor V. M., Morozov K. V., Bobrovnikov V. N. About approaches to designing the thermal regime of mines in permafrost. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 205, pp. 139 — 140. [In Russ].

9. Lapshin A. A. The effect of hardening bookmarks in treatment chambers on the microclimate of deep mines. *East European Journal of Advanced Technology*. 2014, no 10, pp. 3 — 11. [In Russ].

10. Galkin A. F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7. No 8. Pp. 74 — 77.

11. Tynyna S.V. On increasing the efficiency of local conditioning systems for dead-end preparatory workings of deep mines. *Geo-Technical Mechanics*. 2011, no 94, pp. 266 – 271. [In Russ].
12. Kazakov B.P., Levin L.Yu., Zaitsev A.V. Modern approaches to the development of methods for controlling the thermal regime of mines at high temperature of the rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 5, pp. 22 – 25. [In Russ].
13. Shuai Zhu, Shiyue Wu, Jianwei Cheng, Siyuan Li, Mingming Li An underground air-route temperature prediction model for ultra-deep coal mines. *Minerals*. 2015. Vol. 5. No 3. Pp. 527 – 545.
14. Khalid M.Z., Zubair M., Ali M. An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry. *Applied Mathematics and Computation*. 2019. Vol. 342. Pp. 295 – 308.
15. McCord D., Crepeau J., Siahpush A., Brogin J. Analytical solutions to the Stefan problem with internal heat generation. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 103. Pp. 443 – 451.
16. Bozhilov V., Petrov K. Heat and waterproofing – an effective means of improving the microclimate in mines. *Doklady 9-y sessii Mezhdunarodnogo byuro po gornoy teplofizike* [Reports of the 9th session of the International Bureau of Mountain Thermophysics], Poland: Gliwice, 2000, pp. 245 – 255.
17. Alab'ev V., Alekseenko S.N., Shaykhlislamova I. Methodological basics of gas-drainage pipeline engineering for transporting wet firedamp in winter time. *Progressive technologies of coal, coalber methane and ores mining*. CRC Press, London. 2014, pp. 195 – 200.
18. Galkin A. F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7. No 8. Pp. 68 – 73.
19. Lapshin A.A. Mathematical modeling of microclimate normalization processes in deep ore mines. *Naukovy Visnik NSU*. 2014, no 3, pp. 137 – 144. [In Russ].
20. Goodman T.R. The use of integral methods in nonlinear problems of unsteady heat transfer. *Problemy teploobmena: sbornik statey* [Heat transfer problems: Collection of articles], Moscow, Atomizdat, 1967, pp. 41 – 95.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галкин Александр Федорович¹ – д-р техн. наук, профессор,
старший научный сотрудник, e-mail: afgalkin@mail.ru,

Курта Иван Валентинович¹ – канд. техн. наук, доцент,
проректор по научной работе,

Панков Владимир Юрьевич – канд. геол.-минерал. наук, доцент,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

¹ Ухтинский государственный технический университет.

Для контактов: Галкин А.Ф., e-mail: afgalkin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.F. Galkin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Senior Researcher, e-mail: afgalkin@mail.ru,

I.V. Kurta¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Vice-Rector for Research,

V.Yu. Pankov, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,

677000, Yakutsk, Republic of Sakha, Russia,

¹ Ukhta State Technical University, 169300, Ukhta, Republic of Komi, Russia.

Corresponding author: A.F. Galkin, e-mail: afgalkin@mail.ru.

Получена редакцией 14.05.2020; получена после рецензии 15.06.2020; принята к печати 20.09.2020.

Received by the editors 14.05.2020; received after the review 15.06.2020; accepted for printing 20.09.2020.