

Прогнозирование состояния ледопородного массива при проходке вертикального шахтного ствола с замораживанием

Александра Владимировна КУЗИНА^{1*}
Роман Владимирович КЛЮЕВ^{1**}
Нияз Гадым оглы ВАЛИЕВ^{2***}

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Особенность современного подземного строительства заключается в необходимости вести работы на глубинах более 1000 м в неустойчивых обводненных породах. Для обеспечения безопасности строительных работ и надежности возводимых конструкций применяются специальные способы строительства. Одним из универсальных и технически проработанных является способ искусственного замораживания пород для создания по периметру проектируемой выработки ограждения из замороженных пород. Под защитой такого ограждения ведутся проходческие работы, затем ледопородное ограждение подлежит ликвидации. При оттаивании ледопородного ограждения происходит уплотнение горизонтальных швов крепи и сжатие тюбинговой колонны, что, в свою очередь, влияет на прочность болтовых соединений. При неравномерном оттаивании зачастую возникает одностороннее давление на установленную чугунно-бетонную крепь.

Предмет и цель работы. Статья посвящена проблеме проходки шахтных стволов, проходимых способом искусственного замораживания на стадии ликвидации ограждения изо льда и породы.

Актуальность исследования объясняется повышенными требованиями к надежности процесса при тампонаже закрепного пространства стволов и при эксплуатации стволов в течение неопределенного времени.

Новизна статьи состоит в разработке параметров технологии, исключающей неравномерность нагрузки на тюбинговую крепь при расширении внутреннего кольцевого слоя в процессе искусственного оттаивания путем закачки горячего рассола в замораживающие колонки.

Методология работы включает в себя комплекс исследований: анализ литературных источников, теоретических и натурных исследований, моделирование процессов и экспериментальную проверку полученных данных.

Результаты работы. Выявлено, что напряжения в крепи приводят к отрыву бетона от тюбинговой колонны и образованию заполненных водой полостей. Определено, что наиболее приемлемым является вариант оттаивания путем подачи в ствол теплого воздуха и циркуляции хладоносителя с оптимальной температурой.

Область применения результатов. Технология может быть востребована при строительстве капитальных горных сооружений в особо неблагоприятных условиях.

Выводы. Наиболее благоприятный режим искусственного оттаивания создается при подаче подогретого воздуха в ствол и хладоносителя в колонки с повышением температуры хладоносителя плавно с поддержанием на необходимом уровне.

Ключевые слова: шахтный ствол, породный массив, тюбинговая крепь, замораживание, оттаивание, оттаивание замороженных пород, тампонаж.

Введение

После проходки вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания приступают к оттаиванию массива, которое производится естественным или искусственным способом, а затем выполняют тампонаж закрепного пространства и гидроизоляцию бетонной крепи.

Естественное оттаивание с конверсией тепла со стороны вмещающего массива пород зависит от параметров движения подземных вод [1]. При оттаивании массива вокруг замораживающих скважин возникают температурные напряжения. Поэтому оттаивание ледопородного

массива является важным началом тампонажа закрепного пространства и гидроизоляции крепи ствола [2–4].

Для тампонажа закрепного пространства необходимо обеспечить оттаивание ледопородного массива на 1 м от ствола. Параметры подаваемого воздуха: температура +20 °С, скорость 15 м³/с [5].

Оттаивание может быть произведено:

- без работы замораживающих станций;
- с работой замораживающих станций в пассивном режиме [6–8].

✉ kluev-roman@rambler.ru

**1314598@mail.ru

*** tf.gd@m.ursmu.ru

Постановка задачи

Теплый воздух объемом $u = 15 \text{ м}^3/\text{с}$ подается по вентиляционному ставу и поднимается по стволу, отдавая тепло стенкам ствола и охлаждаясь, обеспечивая баланс энергии [9, 10]:

$$dt \cdot A \cdot h \cdot \Delta T = Q = C_b \cdot V \cdot \rho \cdot dT, \quad (1)$$

где h – коэффициент теплопередачи от воздушной струи к установленной крепи; A – площадь контакта теплого воздуха с крепью ствола, $A = 2\pi R dL$; ΔT – разница температуры воздуха и стенок крепи; C_b – теплоемкость воздуха при постоянном давлении; V – объем слоя воздуха; dT – изменение температуры; ρ – плотность воздуха; R – радиус шахтного ствола.

При $V = udt$:

$$\frac{\partial T}{\partial L} = \frac{2\pi R h \Delta T}{u C_b \rho}, \quad (2)$$

где u – подаваемый объем воздуха в секунду, $\text{м}^3/\text{с}$.

Тепловой поток на крепь ствола [11, 12]:

$$Ah \Delta T = \frac{dQ}{dt}.$$

Теоретическая часть

Основным параметром для расчетов является коэффициент h , который варьируется в пределах 10–100 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$) и рассчитывается по критерию Нуссельта [1]:

$$h = \frac{\lambda \text{Nu}}{R}, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность воздуха; Nu – критерий Нуссельта.

При $\text{Re} > 10\,000$ поток относится к турбулентным [13–15], поэтому расчет критерия Нуссельта осуществляется по формуле:

$$\text{Nu} = 0,018 \text{Re}^{0,8}. \quad (4)$$

Для толщи породы уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T = h \Delta T, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплопроводности, граничащей с воздухом.

В модели оператор Лапласа имеет вид:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Тепло распространяется вдоль радиуса, поэтому:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right). \quad (7)$$

Для построения расчетной модели строится сетка по координатам «радиус» и «глубина работ» с использованием алгоритма [16, 17]:

– задание значений свойства горных пород и бетонной крепи;

– установление исходного значения температур: температура породы – 16 °С, бетона – 11 °С, тубингов – 9 °С, хладоносителя в колонках – 36 °С;

– расчет баланса энергии в ячейках модели (входящее минус выходящее тепло).

Расчет баланса энергии производится для трех случаев:

– на границе *тубинги–закрепный бетон*:

$$dQ_i^j = dt \cdot 2\pi \cdot dL \cdot R \left(h(T_{\text{возд}}^j - T_i^j) - k_{\text{чугун}} \frac{T_i^j - T_{i+1}^j}{dR} \right), \quad (8)$$

где i – индекс модели по координате r (радиус); j – индекс модели по координате L (глубина); dL – шаг по глубине; dR – шаг по радиусу; R – радиус стенок шахты на границе с воздухом; $k_{\text{чугун}}$ – коэффициент теплопроводности чугуна; h – коэффициент теплопередачи от воздушной

струи к установленной крепи; dQ_i^j – тепло, получаемое за время dt ; $T_{\text{возд}}^j$ – температура воздуха на данной глубине;

T_i^j – температура в ячейке модели с индексами i, j (при $i = 0$ это $T_{\text{крепь}}^j$);

– в толще массива *чугун–бетон–породы* баланс энергии:

$$dQ_i^j = dt \cdot 2\pi \cdot dL \cdot R_i \cdot k_i^j \frac{(T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j)}{dR}, \quad (9)$$

где i – индекс модели по координате r (радиус); j – индекс модели по координате z (глубина); dL – шаг по глубине;

dR – шаг по радиусу; R_i – текущий радиус модели; k_i^j – коэффициент теплопроводности материала при данной гл-

бине и радиусе; dQ_i^j – тепло, получаемое в ячейке за время

dt ; T_i^j – температура в ячейке модели с индексами i, j ;

– на границе моделирования температура меняется с изменением температуры хладоносителя в колонках [18–20].

После изменения температур профиль температуры воздуха на контакте со стенкой крепи шахтного ствола рассчитывается вновь, исходя из того, что воздух нагнетается снизу:

$$T_{\text{возд}}^j = T_{\text{возд}}^{j-1} - \frac{2\pi \cdot dL \cdot R \cdot h (T_{\text{возд}}^{j-1} - T_{\text{крепь}}^{j-1})}{u C_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}}}, \quad (10)$$

где j – индекс модели по координате z (глубина); dL – шаг по глубине; R – радиус стенок шахты на границе с воздухом; h – коэффициент теплопередачи от воздушной струи

к установленной крепи; $T_{\text{возд}}^{j-1}$ – температура воздуха на данной глубине; $T_{\text{крепь}}^{j-1}$ – температура крепи на контакте с воздухом на данной глубине; $C_{\text{возд}}$ – коэффициент теплоемкости воздуха; $\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха; u – подаваемый объем воздуха в секунду, $\text{м}^3/\text{с}$.

Результаты исследований

В ствол подается воздух объемом 15 $\text{м}^3/\text{с}$ (температура 20 °С).

Вариант № 1. Замораживающие установки отключены, хладоноситель циркулирует без охлаждения (рис. 1, 2).

Вариант № 2. Замораживающие установки работают в режиме поддержания с температурой хладоносителя минус 20 °С (рис. 3, 4)

Вариант № 3. Замораживающие установки работают в режиме поддержания с температурой хладоносителя минус 15 °С.

В вариантах № 2 и № 3 повышение температуры хладонителя в колонках происходит за счет понижения производительности замораживающего комплекса на 1 °С в сутки.

Модели показывают, что вариант № 1 обеспечивает более интенсивное оттаивание массива, что опасно образованием локальных пустот и увеличением водопритока к стволу.

При невозможности подавления водопритоков с помощью тампонажа и необходимости дополнительного замораживания массива выполнить это затруднительно из-

за тепловой инерции системы. Это увеличивает давление на крепь ствола.

При циркуляции хладонителя без возможности контроля его температуры опасен перепад температуры между потоками в колонках, что может стать причиной нарушения герметичности колонок.

При вариантах № 2 и № 3 гидроизоляция крепи осуществляется под защитой ледопородного массива по глубине ствола с возможностью тампонажа за счет зоны оттаявшей породы мощностью до 1,5 м.

Вариант № 1

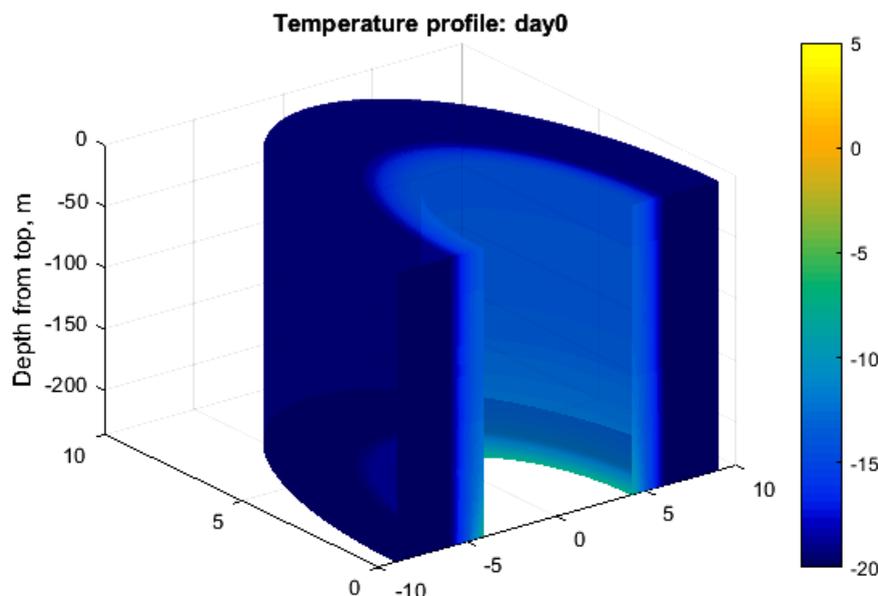


Рисунок 1. Профиль температуры модели в начальный момент
Figure 1. Temperature profile of the model at the initial moment

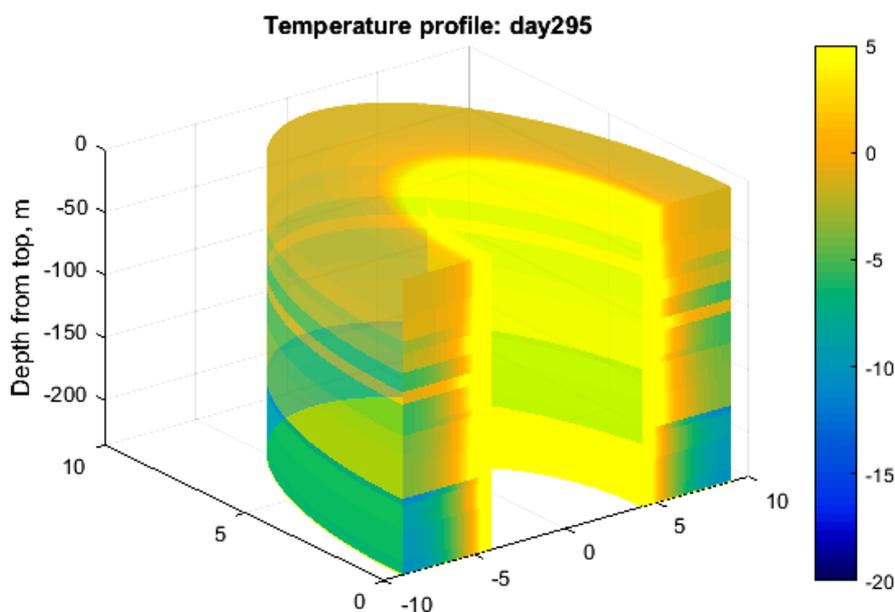


Рисунок 2. Профиль температуры модели на 200-й день
Figure 2. Temperature profile of the model on the 200th day

Вариант № 2

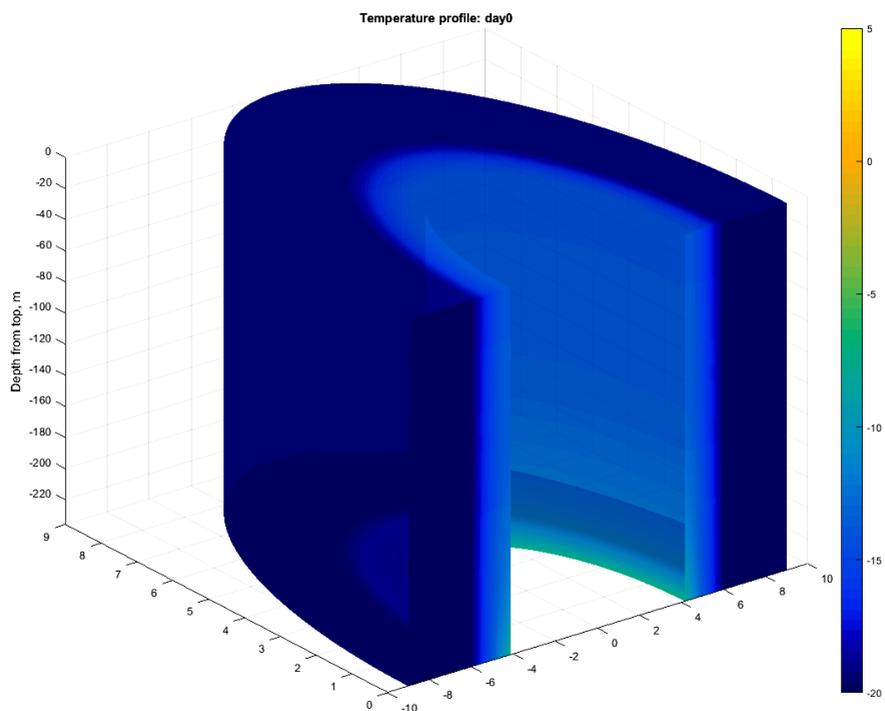


Рисунок 3. Профиль температуры модели в начальный момент (0-й день)
Figure 3. Temperature profile of the model at the initial moment (day 0)

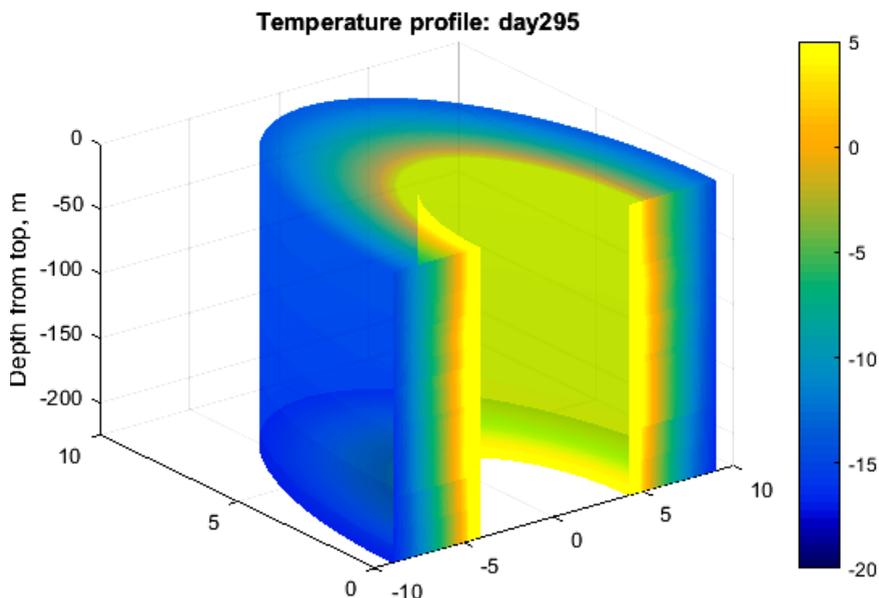


Рисунок 4. Профиль температуры модели на 295-й день
Figure 4. Temperature profile of the model on the 295th day

Выводы

Предложенная статья посвящена исследованию проблемы успешности проведения тампонажа закрепного пространства стволов, проходимых с искусственным замораживанием. В статье рассмотрен этап «тампонаж закрепного пространства ствола и гидроизоляция крепи», выполняемый под защитой ледопородного вмещающего массива.

Образование локальных окон в ледопородном массиве опасно поступлением воды к стволу и другими негативными явлениями.

Для производства гидроизоляции тубинговой крепи наиболее благоприятен вариант оттаивания путем подачи в ствол теплого воздуха и циркуляции хладоносителя с оптимальной для конкретных условий температурой, определяемой программой расчета параметров искусственного оттаивания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андричев А. Н. Тюбинговое крепление вертикальных шахт. М.: Углетехиздат, 1950. 204 с.
2. Кузина А. В. Систематизация причин повреждений замораживающих колонок при строительстве глубоких вертикальных стволов с использованием метода искусственного замораживания // ГИАБ. 2006. № 11. С. 396–402.
3. Иудин М. М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестник СВФУ. 2009. № 1. С. 46–50.
4. Гончаров С. А., Бельченко Е. Л. Теплоизоляция талых золотоносных песков при условии допущения их промерзания на заданную глубину // ГИАБ. 1998. № 6. С. 28–32.
5. Несмеянов Б. В., Попов С. В. К вопросу формирования отвалов скальных и полускальных пород на слабом многолетнемерзлом основании // ГИАБ. 2001. № 7. С. 141–142.
6. Стетюха В. А. Исследование устойчивости оттаивающих отколов техногенных горных массивов // ГИАБ. 2002. № 7. С. 206–208.
7. Jame Y. W., Norum D. L. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium // Water Resources Research. 1980. Vol. 16. Issue 4. P. 811–819. <https://doi.org/10.1029/WR016i004p00811>
8. Janbu N. Critical evaluation of the approaches to stability analysis of landslides and other mass movements // International Symposium on Landslides. New Delhi, 1980. P. 109–128.
9. Ивашин А. А. Анализ методов оттаивания мерзлых пород // ГИАБ. 2015. Отд. вып. № 7. С. 537–544.
10. Фраш Г. Б. Взрывные работы в сезонномерзлых грунтах: справ. пособие. М.: Недра, 1990. 112 с.
11. Васильев П. Н., Зубков В. П., Серебренникова Т. В. О контроле за оттаиванием мерзлых пород вокруг горных выработок // ГИАБ. 2001. № 3. С. 235–237.
12. Руководство по определению глубины протаивания горных пород вокруг капитальных и подготовительных выработок угольных шахт и рудников в области многолетней мерзлоты. М.: Минуглепром СССР, 1984.
13. Скуба В. Н. Совершенствование разработки угольных месторождений области многолетней мерзлоты. Якутск: Кн. изд-во, 1974. 317 с.
14. Разумов Е. А., Еременко В. А., Заятдинов Д. Ф., Матвеев А. С., Гречишкин Н. В., Позолотин А. С. Методика расчета параметров анкерной крепи подземных горных выработок в условиях вечной мерзлоты // ГИАБ. 2013. № 9. С. 39–47.
15. Von Bertalanffy L. An Outline of General System Theory // British Journal for the Philosophy of Science. 1950. Vol. 1. No. 2. P. 134–165. <https://doi.org/10.1093/bjps/1.2.134>
16. Хямяляйнен В. А., Панасенко Л. П., Бурков Ю. В., Франкевич Г. С., Жеребцов В. А. Тампонаж обрушенных пород. Кемерово: КузГТУ, 2000. 107 с.
17. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremkov E. A., Sorokova S. N., Mengxu Q. Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma16020726>
18. Nash W. R. Grouting in Underground Mine Construction // Mining Engineering. 1984. No. 3. P. 248–250.
19. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant // Metallurgist. 2023. Vol. 66. Nos. 11–12. P. 1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
20. Ключев Р. В., Голик В. И., Босиков И. И. Комплексная оценка гидрогеологических условий формирования ресурсов минеральных вод Нижне-Кармадонского месторождения // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 8. С. 206–218. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/8/3319>

Статья поступила в редакцию 10 мая 2023 года

Prediction of the state of the ice-bearing massif during the penetration of a vertical mine shaft with freezing

Aleksandra Vladimirovna KUZINA¹
Roman Vladimirovich KLYUEV^{1*}
Niyaz Gadym ogly VALIEV^{2**}

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The subject and purpose of the work. The article is devoted to the problem of sinking shafts traversed by the method of artificial freezing of shafts at the stage of elimination of ice and rock fencing.

The relevance of the study is explained by the increased requirements for the reliability of the process during the tamponage of the fixed space of the trunks and during the operation of the trunks for an indefinite time.

The novelty of the article consists in the development of the parameters of the technology that eliminates the uneven load on the tubing support during the expansion of the inner ring layer during artificial thawing by pumping hot brine into freezing columns.

The methodology of the work includes a complex of studies: analysis of literary sources, theoretical and field studies, modeling of processes and experimental verification of the data obtained.

The results of the work. It was revealed that the stresses in the support lead to the separation of concrete from the tubing column and the formation of water-filled cavities. It is established that forced thawing of the array by pumping hot brine into freezing columns causes uneven loads on the tubing support and threatens with an accident. It is determined that the most acceptable option is thawing by feeding warm air into the barrel and circulating a coolant with an optimal temperature.

Use of results. The technology can be in demand in the construction of capital mining facilities in particularly unfavorable conditions.

Conclusions. The most favorable mode of artificial thawing is created when heated air is fed into the barrel and the coolant into the columns with an increase in the coolant temperature smoothly while maintaining the required level.

Keywords: mine shaft, rock mass, tubing support, freezing, thawing, thawing of frozen rocks, grouting.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Andreichev A. N. 1950, Tubbing Support of Vertical Shafts. Moscow, 152 p.
2. Kuzina A. V. 2006, Systematization of Causes of Damage to Freezing Columns during Construction of Deep Vertical Shafts Using the Artificial Freezing Method. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 11, pp. 396–402.
3. Iudin M. M. 2009, Ensuring Safe Stability of the Shaft during Thawing of the Ice Wall. *Vestnik of North-Eastern Federal University*, no. 1, pp. 46–50.
4. Goncharov S. A., Bel'checenko E. L. 1998, Thermal Insulation of Melted Gold-bearing Sands, Assuming That They Freeze to a Given Depth. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 6, pp. 28–32.
5. Nesmeyanov B. V., Popov, S. V. 2001, On the Formation of Rock and Semi-rock Dumps on a Weak Permafrost Base. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no.7, pp. 141–142.
6. Stetyukha V. A. 2002, Study of Stability of Thawing Slopes of Technogenic Rock Masses. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 7, pp. 206–208.
7. Jame Y. W., Norum D. L. 1980, Heat and Mass Transfer in a Freezing Unsaturated Porod Medium. *Water Resources Research*, vol. 16, issue 4, pp. 811–819. <https://doi.org/10.1029/WR016i004p00811>
8. Janbu N. 1980, Critical evaluation of the approaches to stability analysis of landslides and other mass movements. International Symposium on Landslides. New Delhi, pp. 109–128.
9. Ivashin A. A. 2015, Analysis of Methods for Thawing Frozen Rocks. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], separate issue no. 7, pp. 537–544.
10. Frash G. B. 1990, Blasting Operations in Seasonally Frozen Soils. Reference Book. Moscow, 112 p.
11. Vasil'yev P. N., Zubkov V. P., Serebrennikova T. V. 2001, On Control over Thawing of Frozen Rocks around Mine Openings. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 3, pp. 235–237.
12. 1984, Guidelines for Determining the Depth of Rock Thawing around the Capital and Preparatory Workings of Coal Mines and Mines in the Permafrost Area. Moscow.

✉ kluev-roman@rambler.ru

**1314598@mail.ru

*** tf.gd@m.ursmu.ru

13. Skuba V. N. 1974, Improving the Development of Coal Deposits in the Permafrost Area. Yakutsk, 317 p.
14. Razumov E. A., Yermenko V. A., Zayatinov D. F., Matveev A. S., Grechishkin N. V., Pozolotin A. S. The Method for Calculating Anchoring Parameters of Underground Mine Openings in Permafrost Conditions. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], no. 9, pp. 39–47.
15. Von Bertalanffy L. 1950, An Outline of General System Theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 1, no. 2, pp. 134–165. <https://doi.org/10.1093/bjps/1.2.134>
16. Hamalainen V. A., Panasenko L. P., Burkov Yu. V., Frankevich G. S., Zherebtsov V. A. 2000, Plugging Collapsed Rocks. Kemerovo, 107 p.
17. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremenkova E. A., Sorokova S. N., Mengxu Q. 2023, Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation. *Materials*, vol. 16, issue 2, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma16020726>
18. Nash W. R. 1984, Grouting in Underground Mine Construction. *Mining Engineering*, no. 3, pp. 248–250.
19. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. 2023, Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurgist*, vol. 66, nos. 11–12. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
20. Klyuev R. V., Golik V. I., Bosikov I. I. 2021, Comprehensive assessment of hydrogeological conditions for formation of mineral water resources of the Nizhne-Karmadon deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 332, no. 8, pp. 206–218. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/8/3319>

The article was received on May 10, 2022