

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.2:536.24.02

ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАССИВА МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ИЗ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

Г. В. Калабин¹, Ю. П. Галченко¹, К. С. Хачатрян²

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН
E-mail: kalabin.g@gmail.com, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН,
ул. Губкина, 3, 119333, г. Москва, Россия

Для описания механизмов формирования техногенного закладочного массива из замороженных брикетов за счет использования потенциала криогеоресурса криолитозоны применена теория фазовых переходов. Использована сезонная динамика изменения температуры региона для организации замкнутого цикла обращения твердого вещества как основного элемента горной технологии. Адаптирована задача Стефана применительно к тепловым процессам формирования искусственного мерзлого массива в криолитозоне путем размещения в выработанном пространстве замороженных на поверхности брикетов с последующей кольматацией пустот пульпой обогатительного производства, имеющей положительную температуру. Разработана программа численной реализации решения поставленной задачи в трехмерной постановке. Получены зависимости времени промерзания техногенного массива, сформированного из брикетов, от их размеров, температуры криолитозоны и пульпы. Формирование искусственного мерзлого массива в отработанных подземных пространствах играет положительную роль при решении экологических проблем в районах освоения недр криолитозоны.

Криолитозона, замкнутый цикл обращения отходов, техногенный мерзлый массив, задача Стефана, теплоперенос, поля температур

DOI: 10.15372/FTPRI20220507

Планируемые перспективы освоения природных ресурсов Арктического региона требуют разработки новых технологий для предотвращения, минимизации и ликвидации последствий техногенных аварий и экологических рисков, связанных с высокой динамичностью природных процессов в криолитозоне в условиях климатических изменений. Наибольшие экологические и аварийные риски связаны с разработкой месторождений углеводородного сырья на континентальном шельфе и материке. Однако очевидна и перспектива повышения роли криолитозоны в развитии минерально-сырьевого комплекса страны, в первую очередь твердых полезных ископаемых, которая требует сохранения ее уникальной природы, а также мест проживания малочисленных народов и объектов их историко-культурного наследия.

Установлено, что максимум техногенного воздействия на естественную биоту криолитозоны связан со складированием на земной поверхности полидисперсных твердых отходов горно-обогатительного передела, что определяет главенствующее значение реализации принципа замкнутого цикла обращения твердого вещества литосферы в кластере конвергентной горной технологии [1].

При подземной разработке месторождений количество твердых отходов обогащения $V_{\text{хв}}$ составляет:

$$V_{\text{хв}} = V_{\text{г}} \frac{1-\alpha}{\beta-\gamma} + \gamma,$$

где $V_{\text{г}}$ — объем годовой добычи руды; α , β , γ — содержание полезного компонента соответственно в добытой руде, концентрате и хвостах обогащения.

Так как в криолитозоне экологической целью использования замкнутого обращения отходов является восстановление в выработанном пространстве подземного рудника массива многолетней мерзлоты, то функциональная структура горной технологии будет определяться температурным ресурсом региона, в котором расположено месторождение.

Цель настоящей статьи — исследование тепловых процессов при формировании мерзлого техногенного массива в криолитозоне путем размещения в выработанном пространстве замороженных на поверхности брикетов с последующей кольматацией пустот пульпой обогатительного производства, имеющей положительную температуру.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что аналогичных работ, позволяющих решать одновременно экологические и технологические проблемы, нет. Известны работы по использованию закладки выработанного пространства крупнокусковыми горными породами и формированием льда за счет нагнетания холодного воздуха [2–6]. Однако использование воды в подземных выработках криолитозоны всегда является проблемой в случае протечек. Известны также публикации [7–9], связанные с математическим моделированием теплообменных процессов при формировании ограждений при проходке стволов и хранении мерзлого угля на открытых складах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенности строения криолитозоны по-разному изменяет природную и техническую составляющие общего технологического кластера освоения запасов месторождения. И если в управляющем полиобъектном кластере природной составляющей влияние особых условий криолитозоны сказывается только на количественных показателях, регламентирующих допустимый уровень техногенных воздействий, то в исполнительном полиобъектном кластере технической составляющей необходимо изменить как структуру технологического монокластера горнотехнической системы разработки месторождения, так и внутреннее содержание некоторых функциональных систем. Главное изменение заключается в том, что каждый из технологических монокластеров горнотехнической системы разработки месторождения и производственно-технической системы первичной переработки добытой рудной массы делится по возможностям использования климатической составляющей криогеоресурса территории на два технологических блока: зимний и летний. Граница между этими блоками во времени определяется критической величиной среднемесячной температуры воздуха $T_{\text{кр}}^{\circ}$, при которой брикеты, спрессованные из тонкодисперсных отходов обогащения, замерзают

за время технологической смены $t_{\text{см}}$. Исходя из необходимости обеспечения непрерывности технологического процесса, температурный ресурс $T_{\text{ср}}^{\circ}$ должен быть достаточным для замораживания закладочных брикетов с начальной температурой T_6° за одну рабочую смену $t_{\text{см}}$:

$$t_{\text{см}} = (T_{\text{ср}}^{\circ} - T_6^{\circ})t_6,$$

где t_6 — среднее время, необходимое для охлаждения брикета.

Отсюда, определив в каждом конкретном случае реальное значение $t_{\text{см}}$, получим выражение для расчета $T_{\text{кр}}^{\circ}$:

$$T_{\text{кр}}^{\circ} = \frac{m_6 \Delta q_b k_{\text{вл}}}{m_6 q_6 - 3t_{\text{см}} \delta} - T_6^{\circ},$$

где m_6 — масса единичного брикета; Δq_b — скрытая теплота фазового перехода для воды; $k_{\text{вл}}$ — влажность материала брикета; q_6 — удельная теплоемкость материала брикета; δ — интегральный коэффициент теплообмена брикета.

Решение задачи теплопереноса, связанной с изменением агрегатного состояния вещества при формировании брикетов из влажных отходов обогащения, дано в [10]. На этапе создания технологической схемы необходимо решение более сложной задачи теплопереноса при формировании техногенного массива путем размещения замороженных брикетов с последующей кольтатацией пустот пульпой из хвостов обогащения, заполняющей выработанное пространство и имеющей положительную температуру.

Общая технологическая схема возврата мелкодисперсных отходов обогащения в выработанное пространство путем воссоздания техногенного мерзлого массива представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная структура технологии подземной разработки в криолитозоне с замкнутым циклом обращения вещества за счет восстановления массива многолетней мерзлоты в выработанном пространстве

При формировании двухфазного техногенного массива использовалась классическая задача Стефана о фазовых переходах [8–11], позволяющая рассчитывать поля температур для различных размеров брикетов D_6 (0.2–0.4 м с интервалом 0.05 м) и их температур ($-50 \dots -10$ °С с интервалом 5 °С), температур стенок криолитозоны ($-9, -6, -3$ °С), характерных для районов ее распространения, а также температур пульпы обогатительного передела T_{II} (Ж:Т 1:1) $+5, +10$ и $+15$ °С. Консистенция пульпы регламентируется условиями полной коагуляции пустот путем частичного (не более 10 %) обезвоживания жидких хвостов обогащения. Размеры брикетов определялись исходя из мощности рудных тел M (рис. 2), технологических возможностей формовочного оборудования для изготовления брикетов из влажных (10–15 %) мелкодисперсных отходов обогащения, их транспортирования и загрузки в выработанное пространство. На рис. 2 представлена расчетная схема физической модели процесса теплообмена с указанием размеров, температур и граничных условий.

Для упрощения численных расчетов выполнена замена брикетов сферами с приведенным диаметром. Сферы — это упрощение хаотически размещенных в выработанном пространстве кубов одинакового размера, так как пустоты, которые будут возникать при такой укладке, должны быть сопоставимы. В реальных условиях имеется возможность и оборудование для формовки как брикетов, так и сфер.

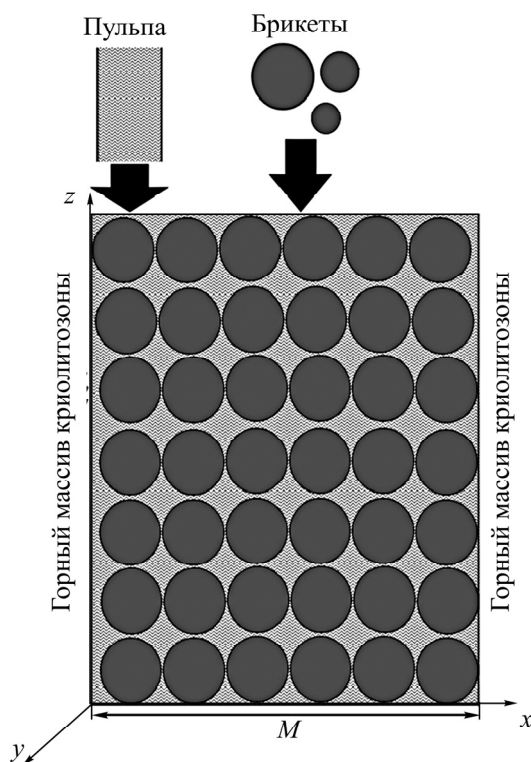


Рис. 2. Расчетная схема физической модели процесса теплообмена: x — длина блока; y — выемочная мощность; z — активная высота блока

Рассмотрим трехмерную двухфазную задачу Стефана для куба единичных размеров [10–12]:

$$p_i c_i \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} - \operatorname{div}(K_i \operatorname{grad}(T(x, y, z, t))) = 0, \quad i = \{l, s\}, \quad (1)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_6, \quad (x, y, z) \in V_6, \quad (2)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_n, \quad (x, y, z) \in V_n, \quad (3)$$

$$T(0, y, z, t) = T_c, \quad (4)$$

$$T(1, y, z, t) = T_c, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial n} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(x, 1, z, t)}{\partial n} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(x, y, 1, t)}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

$$T_l(x, y, z, t)|_{\sigma_{\text{int}}} = T_s(x, y, z, t)|_{\sigma_{\text{int}}}, \quad (10)$$

$$\rho v_n L = \left(K_l \frac{\partial T_l}{\partial n} - K_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \right) |_{\sigma_{\text{int}}}, \quad (11)$$

где $T(x, y, z, t)$ — температура массива; T_6 — температура брикета при заполнения выработанного пространства; T_n — температура пульпы при заполнения выработанного пространства; T_c — температура стенки горного массива криолитозоны; K_l, ρ_l, c_l — соответственно коэффициент теплопроводности, плотности и теплоемкости пульпы; K_s, ρ_s, c_s — соответственно коэффициент теплопроводности, плотности и теплоемкости брикетов; V_6 — объем, который занимают брикеты; V_n — объем, который занимает пульпа; σ_{int} — поверхность фазового перехода; v_n — скорость движения фронта фазового перехода; L — удельная теплота замерзания воды.

Первое уравнение — нелинейное уравнение теплопроводности для фаз. Второе – девятое — начальные и граничные условия. Десятое — непрерывность температуры и одиннадцатое — разрыв теплового потока на величину теплоемкости замерзания. Поскольку такая постановка требует конкретной информации о положении и скорости раздела фаз, то такой метод является сложно реализуемым в численной постановке.

Для упрощения численной реализации применен метод сглаженных коэффициентов [13], который представляет теплоемкость замерзания через дельта-функцию при переходе к теплоемкости вещества. При приближении температуры вещества к температуре замерзания его теплоемкость увеличивается на величину, равную $L / 2\Delta$, тогда количество тепловой энергии, затраченное на процесс замерзания, будет равно $L / 2\Delta \cdot 2 \cdot \Delta = L$, тем самым учитывается процесс замерзания.

Отсюда имеем преобразованную задачу с сохранением начальных граничных условий (2)–(9):

$$\rho(T(x, y, z, t))c(T(x, y, z, t)) \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(K(T(x, y, z, t)) \text{grad}(T(x, y, z, t))) = 0, \quad (12)$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_l T \geq 0; \\ \rho_s T < 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$K(T) = \begin{cases} K_l T \geq 0; \\ K_s T < 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$c(T) = \begin{cases} c_l T > \Delta; \\ c_l + \frac{L}{2\Delta} 0 < T < \Delta; \\ c_s + \frac{L}{2\Delta} - \Delta < T < 0; \\ c_s T < -\Delta. \end{cases} \quad (15)$$

Полученные уравнения аппроксимируются явной разностной схемой [11–14].

Искусственный массив представлен в виде упаковки из замерзших равноразмерных сфер/брикетов (рис. 3), в котором занимаемая внутренними областями этих сфер доля пространства, т. е. плотность упаковки α , максимальна. Доказано [14], что плотность упаковки при различных размерах сфер всегда будет равна 0.74.

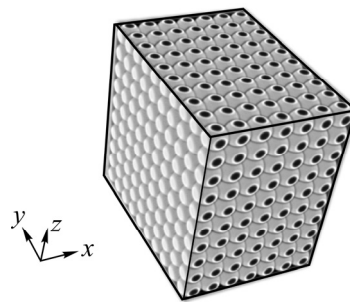


Рис. 3. Упаковка замерзших брикетов по осям y, z (10×10) сфер, по оси x — 7 сфер

Размер максимального блока полной упаковки представлен (10×10) по осям y и z , по оси x количество зависит от параметров рудного тела и должно быть кратным его мощности, но не менее 2 м (исходя из минимального приведенного диаметра брикета). Выбор размера максимального блока по осям 10×10 сфер выбран по результатам численного расчета различных сочетаний чисел сфер (4×4 , 8×8 , 10×10 , 12×12). Оптимизация затрат машинного времени показала, что сходимость результатов (не более 5 %) расчетов времени замерзания искусственного массива наступает в процессе расчета замерзания блока, состоящего из упаковок с 8 и 10 сферами. Соответственно различие упаковок с 10 и 12 сферами становится менее 5 %.

Расчетная область представляет собой куб (рис. 2), на двух гранях которого используется условие Дирихле [15], а на четырех остальных — граничное условие Неймана [15], описанное в формулах (4)–(9). Такой набор граничных условий позволяет заменить моделирование всей области выработки на моделирование локального участка с практически равным временем замерзания. Также выявлена сходимость времени замерзания в зависимости от длины моделируемого участка. Данный подход существенно ускоряет время расчета, но при этом результат удовлетворяет необходимой точности. Для обработки и интерактивной визуализации результатов использовался открытый графический кросс-платформенный пакет ParaView [16].

Численная реализация задачи проводилась в трехмерной постановке по оригинальной программе, написанной специально для решения поставленной задачи на языке Си с функциями для видеокарты на языке CUDA. Использование видеокарты необходимо для ускоренного расчета всех режимов при разных размерах брикетов и их температур.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс формирования искусственного массива состоит из последовательных этапов теплообмена: первый этап — теплообмен между замороженными брикетами (от $-50 \dots -10^\circ\text{C}$) и стенками криолитозоны ($-3, -6, -9^\circ\text{C}$) в процессе заполнения выработанного пространства замороженными брикетами. Второй этап — теплообмен между сформированным массивом с отрицательными температурами и жидкими отходами обогатительного производства с положительной температурой ($+15, +10, +5^\circ\text{C}$) в процессе заливки. В начале расчета моделируется процесс теплообмена между сформированным массивом с отрицательными температурами и жидкими отходами обогатительного производства с положительной температурой до достижения точки замерзания (нулевая температура), который характеризуется высоким температурным градиентом. Затем наступает процесс заключительной фазы формирования искусственного мерзлого массива за счет теплообмена со стенками криолитозоны. Этот процесс более продолжительный, поскольку происходит между объектами, имеющими отрицательные температуры и низкий температурный градиент. На продолжительность этапов влияют и внешние факторы — скрытая теплота при изменении влагосодержания. Однако вклад данного фактора в тепловой баланс подземных выработок составляет не более 7 % [17].

Термодинамическое равновесие наступает при равенстве температур искусственного мерзлого массива и криолитозоны (в пределах реальных значений от -3 до -9°C). Время замерзания фиксируется переходом через ноль. Далее процесс продолжается до достижения равновесия температур мерзлого массива и криолитозоны и не имеет технологических ограничений.

На рис. 4 представлены зависимости времени замерзания искусственного массива от размера брикета (0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 м — соответственно 1–5) при различных температурах брикетов, пульпы и криолитозоны. В результате вычислительных экспериментов определены зависимости времени формирования искусственного мерзлого массива при различных сочетаниях температуры ее стенки, замороженных брикетов, пульпы обогатительного передела и размера приведенного диаметра брикетов. Анализ результатов показал, что время устойчивого замерзания массива в основном зависит от двух переменных: температуры замороженных брикетов и температуры пульпы. При температуре брикетов -25°C и ниже процесс замерзания фиксируется при любых сочетаниях остальных переменных. В случае отсутствия необходимости использования поверхности созданного искусственного мерзлого массива для технологических целей (нахождения людей, горного оборудования и др.) можно применять любые сочетания параметров, не принимая во внимание время термодинамического равновесия искусственного массива и криолитозоны.

Полученные зависимости позволяют управлять процессом замораживания брикетов для закладки в выработанное пространство выбором размеров брикетов и продолжительностью смены, т.е. технологического параметра и формирования искусственного мерзлого массива для различных горно-геологических параметров рудных тел. Реализация предлагаемой технологии восстановления многолетней мерзлоты, нарушенной горными работами, за счет возведения в выработанном пространстве вторичного техногенного массива из отходов первичной переработки руд обеспечит полностью замкнутый цикл обращения твердых отходов, если объемы добычных работ на летнем $V_{\text{лэ}}$ и зимнем $V_{\text{зэ}}$ этапах будут удовлетворять следующему соотношению:

$$V_{\text{зэ}} = \frac{V_{\text{лэ}}(1+k_{\text{вл}})\alpha}{(1+k_{\text{вл}})(1-\alpha)},$$

где α — коэффициент заполнения выработанного пространства замороженными брикетами.

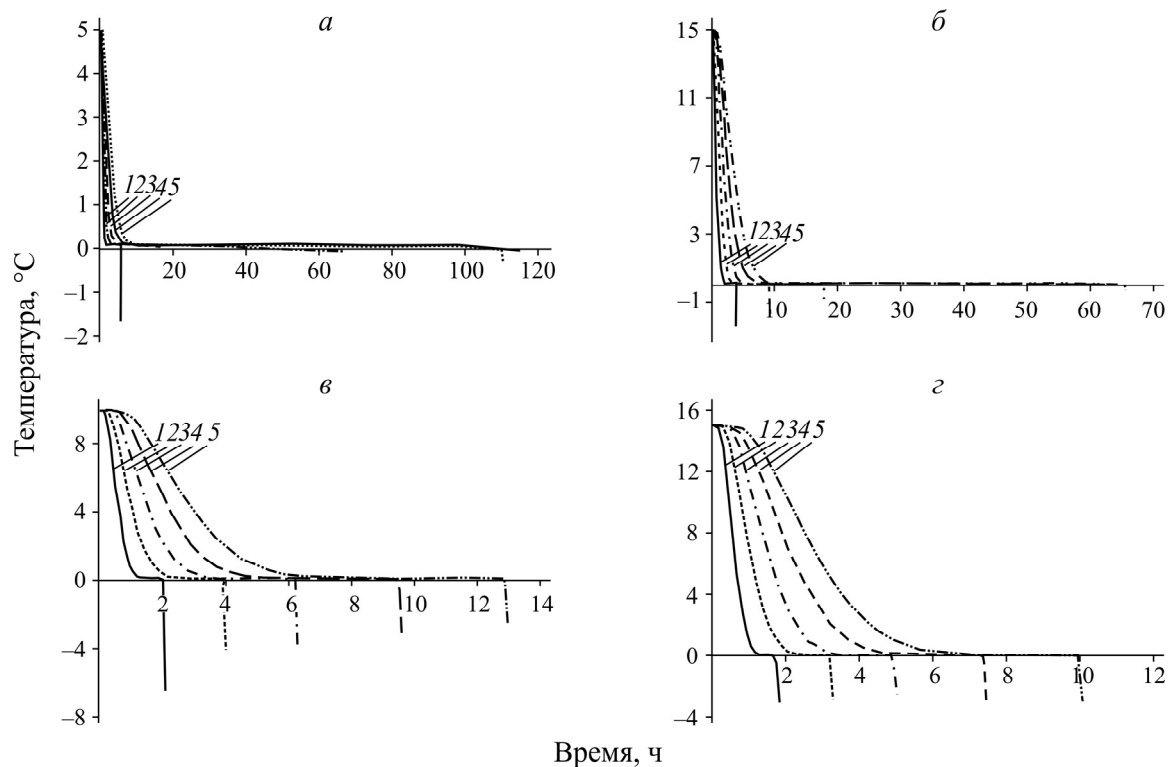


Рис. 4. Зависимость времени заморозки искусственного массива при температуре: *a* — брикетов -15°C , пульпы $+5^{\circ}\text{C}$, стенки криолитозоны -9°C ; *б* — брикетов -25°C , пульпы $+15^{\circ}\text{C}$, стенки криолитозоны -9°C ; *в* — брикетов -30°C , пульпы $+10^{\circ}\text{C}$, стенки криолитозоны -9°C ; *г* — брикетов -40°C , пульпы $+15^{\circ}\text{C}$, стенки криолитозоны -3°C

Данное требование можно рассматривать в качестве дополнительного параметра предполагаемой технологии, который будет определять как выбор конструктивных элементов систем разработки, так и график ведения добычных работ.

ВЫВОДЫ

Задача Стефана адаптирована применительно в тепловым процессам формирования мерзлого техногенного массива в криолитозоне путем размещения в выработанном пространстве замороженных на поверхности брикетов с последующей кольматацией пустот пульпой обогащенного производства, имеющей положительную температуру.

Разработана программа численной реализации решения поставленной задачи с функциями для видеокарты на языке CUDA в трехмерной постановке. Получены зависимости времени промерзания техногенного массива, сформированного из брикетов размером $0.25 - 0.4$ м, замороженных на поверхности при различных температурах наружного воздуха ($-10 \dots -50^{\circ}\text{C}$), криолитозоны ($-3 \dots -9^{\circ}\text{C}$) и пульпы ($+5 \dots +15^{\circ}\text{C}$). Анализ результатов показал, что время заморозки массива в основном зависит от двух переменных: температуры замороженных брикетов и температуры пульпы. При температуре брикетов -25°C и ниже процесс заморозки фиксируется при любых сочетаниях остальных переменных.

Формирование искусственного мерзлого массива в отработанных подземных пространствах поможет решению экологических проблем в районах освоения недр криолитозоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galchenko Y. P., Kalabin G. V. Nature-like mining technology as a potentially monumental resolution of environmental contradictions during the development of solid mineral deposits, J. Eurasian Min., 2020, No. 2. — P. 26–30.
2. Михайлов Ю. В. Оптимизация технологии подземной добычи руд Сибири. Горные науки и технологии. — М.: Изд. МИСИС. — 2018. — № 1. — С. 72–86.
3. Kight G., Harris M., Gorski B. and Udd J. E. Frozen backfill research for Canadian mines, Canadian-centre for Mineral and Energy Technol., 1994. — 21 p.
4. Фангель Х. Закладка выработанного пространства льдом // Разработка месторождений с закладкой. — М.: Мир, 1987. — С. 486–504.
5. Fangel Henning. Mining with ice-backfill, Western Miner, 1982, Vol. 55, No. 5. — P. 48–53.
6. Петров Д. Н. Обоснование рациональных параметров формирования льдопопородной закладки при подземной разработке месторождений криолитозоны: дисс. ... канд. техн. наук. — Якутск, 2015. — 153 с.
7. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 172–184.
8. Левин Л. Ю., Семин М. А., Паршаков О. С. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 154–161.
9. Хохолов Ю. А., Гаврилов В. Л., Фёдоров В. И. Математическое моделирование теплообменного процесса хранения мерзлого угля на открытых складах // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 172–182.
10. Галченко Ю. П., Калабин Г. В., Хачатрян К. С. Адаптация элементов теории фазовых переходов к условиям создания и применения криогенных горных технологий с замкнутым циклом обращения вещества // Инж. физика. — 2021. — № 5. — С. 39–46.
11. Мейрманов А. М. Задача Стефана. — Новосибирск: Наука, 1986. — 240 с.
12. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — Едиториал УРСС, 2003. — 784 с.
13. Хакимзянов Г. С., Черный С. Г. Методы вычислений. Ч. 3: Численные методы решения задач для уравнений параболического и эллиптического типов. — Новосибирск: НГУ, 2007. — 160 с.
14. Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров // В мире науки. — 1984. — № 3. — С. 72–82.
15. Уравнения математической физики: учеб. пособие. — М.: МФТИ, 2019. — 18 с.
16. ParaView [сайт]. URL: <https://www.paraview.org/>.
17. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 255 с.

Поступила в редакцию 06/VI 2022

После доработки 29/VII 2022

Принята к публикации 21/IX 2022