

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗВЕДЕНИЯ ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ В ОЧИСТНЫХ КАМЕРАХ РОССЫПНЫХ ШАХТ КРИОЛИТОЗОНЫ

Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Киселев В.В.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск

Ключевые слова: льдопородный закладочный массив, послойное намораживание, очистная камера, теплообмен, фазовый переход, математическое моделирование, россыпная шахта, криолитозона.

Аннотация. Статья посвящена решению вопросов теплофизического плана формирования льдопородных закладочных массивов в очистных камерах россыпных шахт криолитозоны. Предлагаемая система подземной разработки золотороссыпных глубокопогребенных месторождений с закладкой выработанного пространства замороженной льдопородой позволяет существенно снизить потери и разубоживание ценных песков при их добыче. Возведение льдопородных закладочных массивов отличается низкзатратной технологией, надежностью и экономичностью. В статье приведены результаты расчетов по разработанной на основе математического моделирования методике температурных параметров формирования льдопородных закладочных массивов методом послойного намораживания с учетом теплообмена их поверхностей с шахтным воздухом, скорости воздушного потока, фазовых переходов влаги, толщины и продолжительности намораживания единичного слоя, нестационарности мощности возводимого льдопородного массива. Подчеркивается, что только при оптимальном соотношении всех этих параметров возможно соорудить монолитный льдопородный закладочный массив за заданный период времени. Представленный на рисунках графический материал отражает зависимость продолжительности формирования закладочного массива от времени замораживания и толщины единичного слоя, а так же динамику формируемого температурного режима, включая окружающий очистную камеру породный массив. Приведены расчетные значения оптимальной продолжительности промораживания единичного льдопородного слоя определенной мощности при различных значениях его увлажненности и температуры замораживания, которые имеют практическую значимость и могут быть использованы при выполнении проектов. Внедрение льдопородных закладочных массивов на горных предприятиях Севера возведенных в соответствии с предлагаемыми режимами позволит обеспечить высокую скорость отработки месторождений; круглогодичную занятость горнорабочих россыпных шахт; значительно увеличить размеры шахтных полей, отработать «обратным ходом» ранее оставленные естественные целики с получением дополнительного металла, обеспечить целостность и естественный температурный режим техногенно нарушенного горного массива, предотвратить антропогенное опускание земной поверхности, в значительной степени восстановить первозданный рельеф местности; освободить земную поверхность от породных отвалов используя их в качестве закладочного материала в отработанных камерах россыпных шахт.

SELECTION OF RATIONAL MODES FOR THE CONSTRUCTION OF ICE-ROCK STOPPING MASSIFS IN THE CLEANING CHAMBERS OF PLACER MINES THE CRIOLITOZONE

Khokholov Yu.A., Kurilko A.S., Kiselev V.V.

Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk

Keywords: ice-rock filling massif, layer-by-layer freezing, cleaning chamber, heat exchange, phase transition, mathematical modeling, alluvial mine, permafrost.

Abstract. The article is devoted to solving the issues of the thermo physical plan for the formation of ice rock backfill massifs in the treatment chambers of alluvial mines in the permafrost zone. The proposed system of underground mining of gold-placer deep-buried deposits with backfilling of the goaf with frozen ice rock can significantly reduce the loss and dilution of valuable sands during their extraction. The construction of ice backfilling massifs is characterized by low-cost technology, reliability and economy. The article presents the results of calculations based on the method developed on the basis of mathematical modeling of the temperature parameters of the formation of ice-rock filling massifs by the method of layer-by-layer freezing, taking into account the heat exchange of its surface with mine air, air flow velocity, phase transitions of moisture, the thickness and time of freezing of a single layer, the non-stationary of the thickness of the ice-rock mass being built. It is emphasized that only with the optimal ratio of all these parameters is it possible to build a

monolithic ice-rock backfill massif for a given period of time. The graphic material presented in the figures reflects the dependence of the duration of backfill formation on the freezing time and the thickness of a single layer, as well as the dynamics of the formed temperature regime, including the rock mass surrounding the treatment chamber. The calculated values of the optimal duration of freezing of a single ice layer of a certain thickness at various values of its moisture content and freezing temperature are given, which are of practical importance and can be used in the implementation of projects. The introduction of ice backfilling massifs at the mining enterprises of the North, built in accordance with the proposed regimes, will ensure a high speed of mining deposits; year-round employment of placer miners; significantly increase the size of the mine fields, work out the "reverse motion" of the previously left natural pillars with the production of additional metal, ensure the integrity and natural temperature regime of the technogenically disturbed mountain range, prevent anthropogenic subsidence of the earth's surface, and to a large extent restore the original terrain; free the earth's surface from rock heaps by using them as backfill material in the worked-out chambers of alluvial mines.

Введение

Из практики горного дела известно, что система подземной разработки месторождений полезных ископаемых с закладкой выработанного пространства позволяет существенно снизить потери и разубоживание ценных руд при их добыче [1]. Использование для закладки смесей на основе цементных вяжущих материалов в условиях криолитозоны в настоящее время зачастую сопряжена со значительными сложностями. Их широкое внедрение на горных предприятиях криолитозоны сдерживается дороговизной строительства закладочных комплексов, дефицитом вяжущих материалов, затратностью транспортной схемы их доставки, а также негативным влиянием отрицательных температур на продолжительность твердения цементного закладочного массива и сложностью технологии его формирования. Кроме этого в смеси в качестве связующего вещества, как правило, входит цемент, химические реакции гидратации которого экзотермичны, т.е. протекают с выделением тепла, что нарушает естественное (отрицательное) температурное поле вмещающего породного массива. Соответственно, ореолы протаивания пород вокруг выработки с закладкой могут быть значительными, что, в итоге, может привести к потере устойчивости вмещающих мерзлых горных пород [2, 3].

Температурный режим россыпных шахт (РШ) расположенных в зоне распространения многолетней мерзлоты позволяет формировать льдопородную закладку с использованием естественного холода в зимний период [4-9]. Система разработки с послойно возводимой льдопородной закладкой выработанного пространства применялась на некоторых рудниках и россыпных шахтах Севера, а в промышленных масштабах была внедрена на руднике Бадран (РС(Я)) [10]. Кроме этого, так же усовершенствованы технологические схемы ведения закладочных работ. Технология льдопородной закладки разработанная бывшим ВНИИ-1 применялась в ограниченных масштабах на ряде рудников Магаданской области для закладки камер при отработке мерзлотных горизонтов.

Необходимо отметить, что льдопородная закладка (так же, впрочем, как и ледовая) не получила широкого распространения по целому ряду причин. Вместе с тем исследования в этом направлении продолжают, совершенствуются режимы и технологии возведения ЛЗМ, в частности, в РГГУ им. Орджоникидзе и ИГДС СО РАН. Исследователями РГГУ по результатам проведенных теоретических и лабораторных работ разработаны рациональные параметры послойного возведения ЛЗМ в зимний период при отработке мерзлотных горизонтов рудных месторождений криолитозоны. В качестве хладоагента традиционно рекомендуется использовать холодный вентиляционный воздух с температурой -15°C циркулируемый со скоростью 4-5 м/с, а так же предварительно охлажденные послойно укладываемые, проливаемые водой геоматериалы. При таких условиях, может быть обеспечено ускоренное возведение ЛЗМ с прочностными характеристиками до 10 МПа с температурой до -4°C . Исследованиями, проведенными ИГДС СО РАН, подтверждена целесообразность применения базальтовой и полипропиленовой фибр вводимых в смесь для упрочнения ледовых и льдопородных крепежных конструкций возводимых в подземных горных выработках криолитозоны.

Продолжительность формирования ЛЗМ зависит от многих параметров, таких как температура горного массива, объем и начальная температура закладочного материала,

количество проливаемой воды, температура и скорость шахтного воздуха, время замораживания единичного слоя при послойном намораживании. Только при оптимальном соотношении всех этих параметров возможно соорудить монолитный ЛЗМ за заданный период времени. При этом основным управляющим параметром является время замораживания единичного слоя при его заданной толщине.

Способ управления горным давлением послойно возводимой льдопородной закладкой выработанного пространства так же может применяться при разработке техногенных (в частности остаточного-целиковых) глубокопогребенных месторождений в северных регионах первичной золотодобычи. Разработка таких месторождений в суровых климатических условиях с наличием многолетней мерзлоты во многом осложнена по целому ряду причин как социально-экономического, так и технологического плана. Для их рентабельной разработки необходимо строительство крупных высокомеханизированных шахт и к тому же вести отработку запасов с минимальными затратами на всех переделах ведения горных работ. Как известно из практики, одним из затратных технологических процессов является, например, крепление очистного пространства РШ, в особенности в тундровых зонах в виду отсутствия крепежного леса. По нашему мнению, в качестве наиболее приемлемого варианта удешевления крепежных работ в РШ является возведение в зимний период искусственных льдопородных целиков и закладочных массивов методом послойного намораживания с использованием мерзлых дробленых пустых пород и льда (замерзшей) воды в качестве цементирующего материала. Учитывая сложность проведения исследований на физических моделях, было решено использовать математическое моделирование теплофизических процессов возведения ЛЗМ.

Методика проведения исследований и полученные результаты

В условиях отрицательной температуры атмосферы РШ скорость возведения ЛЗМ зависит, как уже говорилось, от значений отрицательной температуры кусков мерзлой породы и шахтного вентиляционного потока, а так же количества проливаемой воды. При соответствующих условиях слой смоченных породных отделистей может быть заморожен за счет аккумулированного ими холода. На первом этапе исследований было решено не учитывать исходную отрицательную температуру мерзлых пород, чтобы исключить из рассмотрения соответствующие технологические операции по охлаждению отдельных кусков, а повышение интенсивности замораживания ЛЗМ за счет этого фактора принять в запас надежности результатов расчета. Принято, что единичный слой смоченных дробленых горных пород имеет исходную температуру 1°C .

Для определения значений температурного поля в ЛЗМ разработана двумерная математическая модель теплообмена шахтного воздуха с возводимым ЛЗМ и окружающим массивом горных пород. Принято, что сечение очистной камеры имеет форму прямоугольника. В силу симметричности области рассматривается ее половина. Схема расчета приведена на рисунке 1.

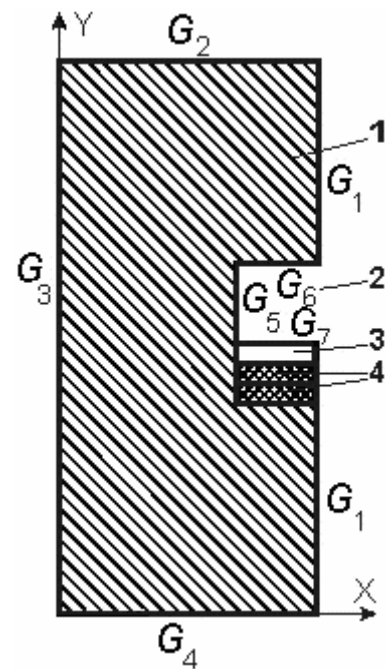


Рис. 1. Схема расчета параметров формирования льдопородной закладочной массы в отработанной очистной камере россыпной шахты: 1 – массив вмещающих горных пород; 2 – выработанное пространство (отработанная очистная камера); 3 – слой увлажненной замораживаемой талой закладки; 4 – мерзлая (замороженная) закладка

Приняты следующие упрощающие допущения:

- теплообмен на поверхности слоя возводимого ЛЗМ, стенке и потолочине очистной камеры с шахтным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом конвективного теплообмена α ;

- теплообмен на границе соприкосновения вновь укладываемого слоя и ранее уложенного ЛЗМ подчиняется условию идеального теплового контакта;

- промежуток времени, затрачиваемый на отсыпку единичного закладочного слоя, не учитывается, т.е. считается, что каждый слой появляется мгновенно в момент начала этого промежутка.

Процесс распространения тепла в ЛЗМ с учетом фазовых переходов влаги описывается следующим уравнением [11, 12]:

$$\begin{aligned} & [C(T) + L_\phi \cdot W \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \\ C(T) &= \begin{cases} c_1 \cdot \rho_1; T < T^*; \\ c_2 \cdot \rho_2; T > T^*; \end{cases} \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1; T < T^*; \\ \lambda_2; T > T^*; \end{cases} \\ & [C(T) + L_\phi \cdot W \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \\ C(T) &= \begin{cases} c_1 \cdot \rho_1; T < T^*; \\ c_2 \cdot \rho_2; T > T^*; \end{cases} \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1; T < T^*; \\ \lambda_2; T > T^*; \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где L_ϕ – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W – влажность (льдиность) пород, доли единиц; ρ – плотность породы, кг/м³; T^* – температура фазовых переходов влаги, °С; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород; $\delta(T - T^*)$ – функция Дирака, 1/К.

Фазовые переходы влаги учитываются с помощью δ -функции Дирака.

На границе выработки задается граничное условие III рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T_e), \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T_e), \quad x, y \in G_5, G_7, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2 (T - T_e), \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2 (T - T_e), \quad x, y \in G_6, \quad (3)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплообмена воздуха с горными породами, Вт/(м²·К).

На внешних границах области G_2, G_3 и G_4 задается граничное условие II рода:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad x, y \in G_2, G_3 \text{ и } G_4. \quad (4)$$

На границе G_1 в силу симметричности задается граничное условие II рода:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad x, y \in G_1. \quad (5)$$

Для решения двумерной задачи теплообмена (1) с граничными условиями (2)-(5) применен метод суммарной аппроксимации [5], который сводит исходную задачу к последовательности одномерных задач. На каждом временном слое решается последовательность одномерных задач. Для решения одномерной задачи промерзания-протаивания в постановке вида (1) используются численные методы сквозного счета с сглаживанием коэффициентов.

Двухмерная область заменяется дискретной областью $W_x \times W_y$. Причем шаг сетки по направлению W_y задается таким образом, чтобы в каждый вновь отсыпываемый породный слой попадало не менее десяти узлов сетки. Система разностных уравнений решается последовательно методом простой итерации с применением метода прогонки [11, 12].

На основе разработанных программ для ПЭВМ были проведены численные эксперименты по расчету параметров послойного намораживания ЛЗМ в отработанной очистной камере РШ при следующих исходных данных. Место расположения шахты – Магаданская область РФ, район россыпей ручьев Раковский и Болотный. Мерзлое золотороссыпное месторождение обрабатывается в два этапа камерной системой с оставлением междукамерных целиков и возведением ЛЗМ (первый этап), с последующей отработкой междукамерных целиков (второй этап). Высота камеры 2,5 м; ширина 2,5 м; удельная теплоемкость породы 900 Дж/(кг·К); плотность скелета породы 2208 кг/м³; коэффициент теплопроводности мерзлой породы 2 Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности талой породы 1,8Вт/(м·К); естественная температура массива горных пород минус 1,5°С; влажность (льдиность) массива горных пород постоянная и равна 19,4%. Исследовались закономерности формирования ЛЗМ при следующих параметрах: степени увлажнения: 5%, 10%, 15% и 20%; толщине слоя: 0,3; 0,4 и 0,5 м; начальной температуре пород слоя +1°С.

На основе данных Сусуманской метеостанции среднемесячная температура ноября равна -28°С; декабря -36,8°С; января -37,2°С; февраля -23°С [13]. С учетом того, что вентиляционный воздух, проходя по выработкам РШ, в зимний период нагревается с повышением температуры, расчеты проведены при температуре воздуха в очистной камере -20°С.

Как уже говорилось, основным управляющим параметром при оптимизации формирования льдопородного массива является время замораживания единичного слоя при его заданной толщине. Время счета останавливается после укладки последнего слоя при достижении температуры ЛЗМ заданного значения (-1°С). Последний слой замерзает за счет аккумулированного холода породами потолочины выработки и верхнего слоя закладочного массива.

Принято, что предварительно перед возведением ЛЗМ в зимний период, отработанная очистная камера РШ проветривается холодным воздухом, в результате которого происходит аккумулялирование холода массивом вмещающих горных пород. На рисунке 2 приведены температурные изолинии в породном массиве вмещающем очистную камеру после предварительного проветривания холодным воздухом в течение 480 ч. Как видно из рисунка, происходит понижение температуры массива горных пород вокруг камеры: на её поверхности температура снижается до -18°С, на глубине 3 м – до -2°С, т.е. происходит начальное аккумулялирование холода.

На рисунках 3-9 приведены результаты расчетов продолжительности формирования ЛЗМ в очистных камерах РШ в зависимости от времени замораживания единичного слоя при его толщине 0,3; 0,4; 0,5 м и увлажненности от 5 до 20%.

Из анализа графиков представленных на рисунках 3-6, отчетливо видно, что основное влияние на скорость формирования ЛЗМ оказывают температура воздушной среды в горной выработке, толщина и увлажненность пород укладываемого слоя. При повышении увлажненности пород и толщины укладываемого слоя ЛЗМ резко возрастает время замораживания единичного слоя и тем самым общая продолжительность формирования всего закладочного массива.

Результаты расчетов подтверждают, что для каждой толщины единичного слоя существует оптимальное время его замораживания. Даже небольшое отклонение этого

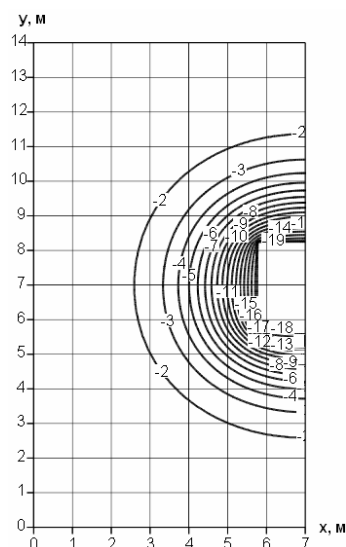


Рис. 2. Температурные изолинии в вмещающих породных массивах очистных камер в начальный момент перед формированием закладочного массива

параметра в сторону уменьшения ведет к резкому увеличению продолжительности (общего времени) формирования ЛЗМ. Увеличение времени проморозки каждого слоя пропорционально увеличивает продолжительность формирования ЛЗМ. Поэтому на практике время замораживания каждого слоя должно приниматься с некоторым запасом, чтобы гарантировать полное промораживание ЛЗМ за заданный промежуток времени.

На рисунках 7-8 приведены температурные изолинии в закладочных и породных массивах в разные периоды возведения ЛЗМ при температуре замораживания -20°C , увлажненности укладываемого слоя 10%, толщине слоя 0,3 м и времени замораживания 1 слоя 40 часов, которое по результатам расчетов является оптимальным при этих исходных данных.

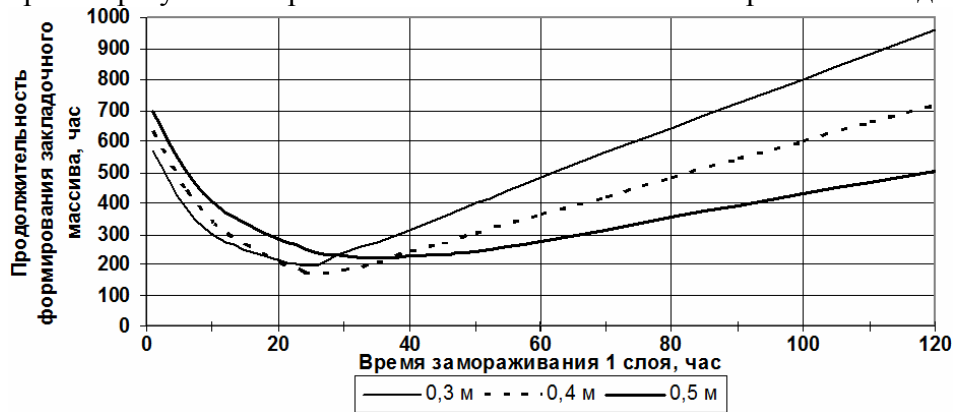


Рис. 3. Продолжительность формирования льдопородного закладочного массива мощностью 2,5 м в очистной камере россыпной шахты в зависимости от времени замораживания 1 слоя при его различной толщине (температура замораживания -20°C , увлажненность укладываемого слоя 5%)

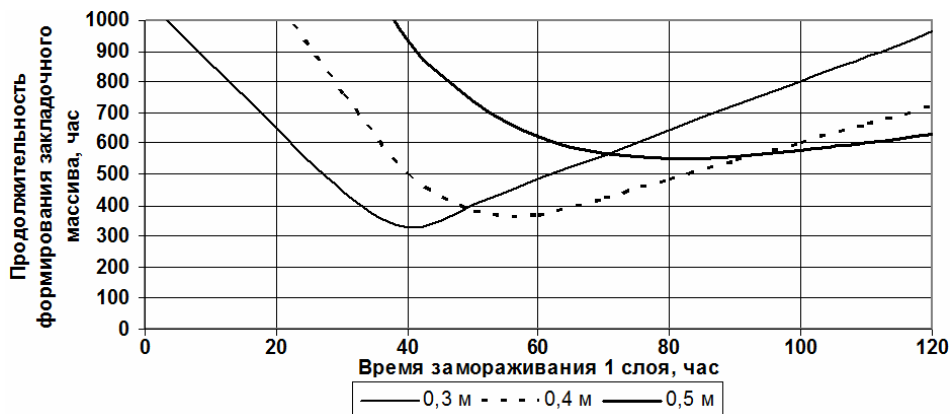


Рис. 4. Продолжительность формирования льдопородного закладочного массива мощностью 2,5 м в очистной камере россыпной шахты в зависимости от времени замораживания 1 слоя при его различной толщине (температура замораживания -20°C , увлажненность укладываемого слоя 10%)

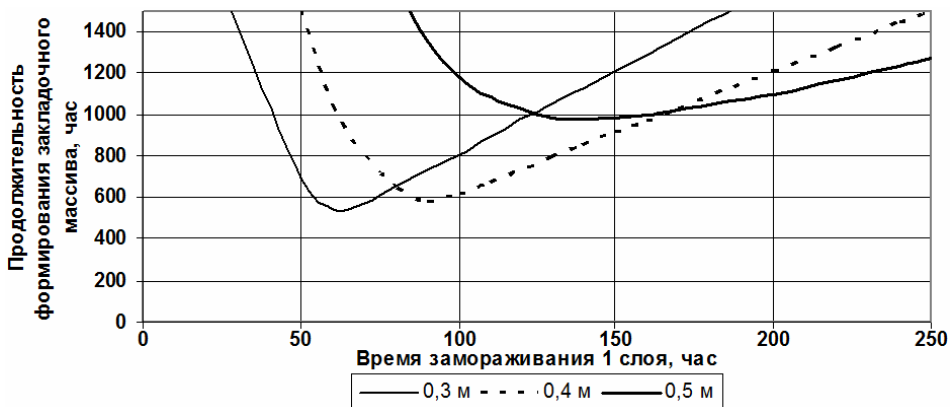


Рис. 5. Продолжительность формирования льдопородного закладочного массива мощностью 2,5 м в очистной камере россыпной шахты в зависимости от времени замораживания 1 слоя при его различной толщине (температура замораживания -20°C , увлажненность укладываемого слоя 15%)

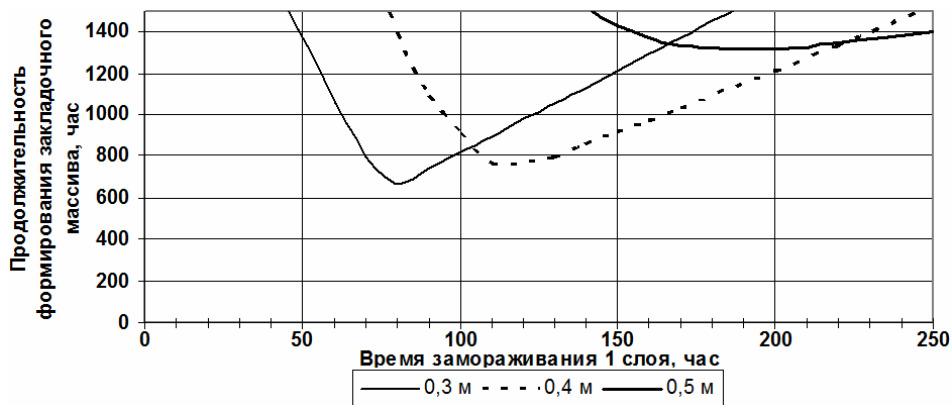


Рис. 6. Продолжительность формирования льдопородного закладочного массива мощностью 2,5 м в очистной камере россыпной шахты в зависимости от времени замораживания 1 слоя при его различной толщине (температура замораживания -20°C , увлажненность укладываемого слоя 20%)

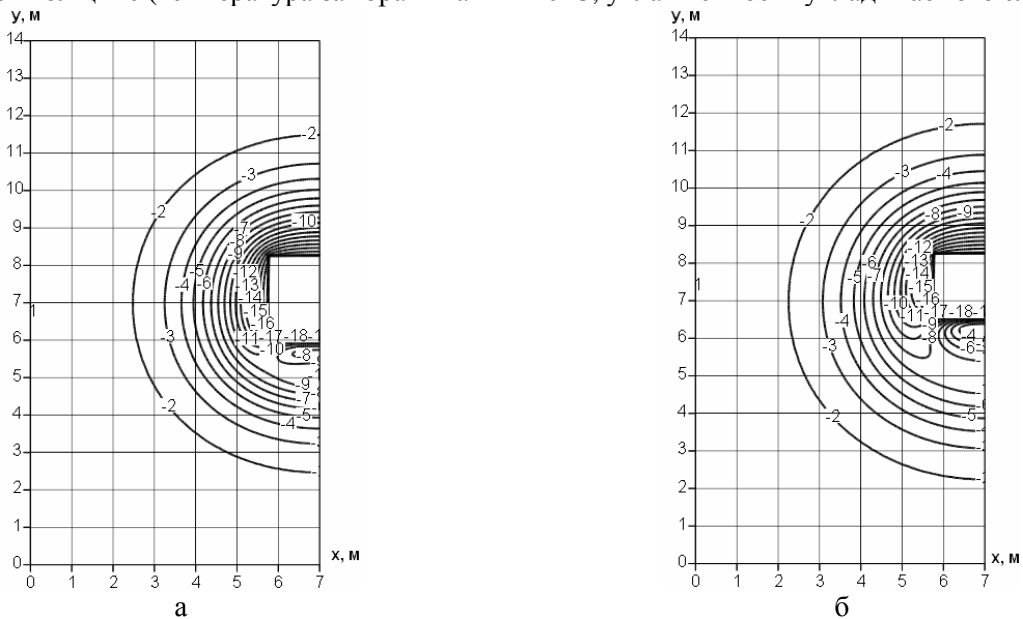


Рис. 7. Температурные изолинии в льдопородном закладочном массиве, возведенном в очистной камере россыпной шахты и вмещающем породный массив по истечении 40 (а) и 120 часов (б)

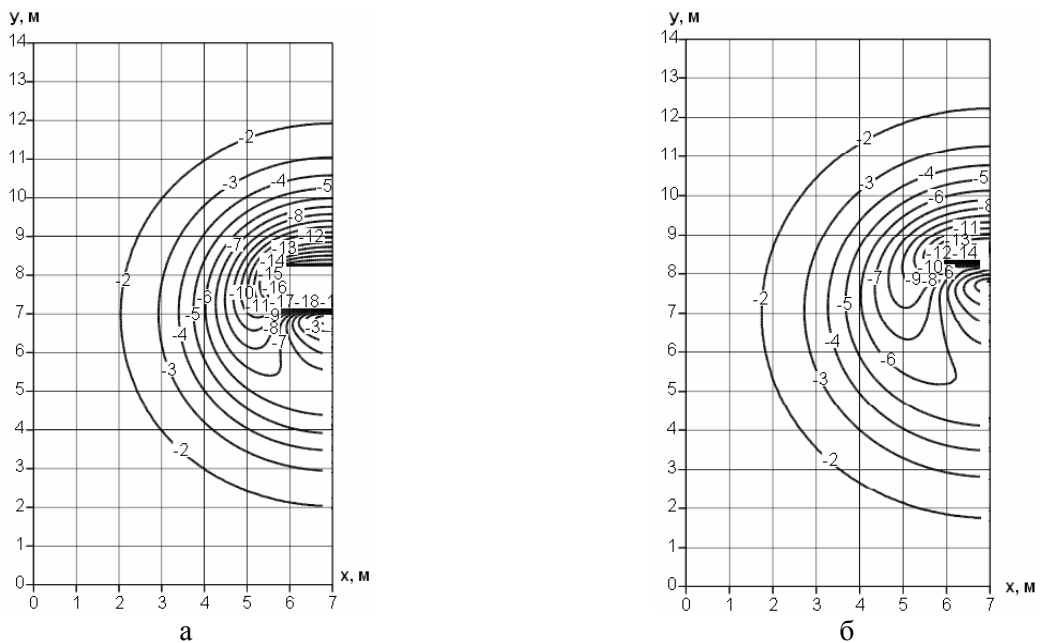


Рис. 8. Температурные изолинии в льдопородном закладочном массиве возведенном в очистной камере россыпной шахты и вмещающем породном массиве по истечении 200 (а) и 326 часов (б)

Как видно из графиков, при оптимальном режиме возведения ЛЗМ послойным намораживанием время его формирования равно 326 ч и в последнюю очередь замерзает самый его верхний слой, что соответствует требованиям.

На рисунке 9 приведены температурные изолинии в ЛЗМ очистной камеры и окружающем массиве горных пород при температуре -20°C и времени замораживания единичного слоя, равном 20 часов, которое вдвое меньше его оптимального значения (40 часов). В этом случае массив замерзает значительно медленнее – за 796 ч, и в последнюю очередь замерзает его центральная часть. Температура большей его части «вялая» – колеблется от -2°C до -1°C , что выше температуры ЛЗМ, замороженного с оптимальным временем. Такая ситуация недопустима, т.к. возведенный ЛЗМ практически не обладает требуемыми компрессионными свойствами.

Полученные по результатам численных экспериментов показатели позволили рассчитать оптимальное время промораживания единичного льдопородного слоя при различных вариантах возведения ЛЗМ, значения которого приведены в таблице 1.

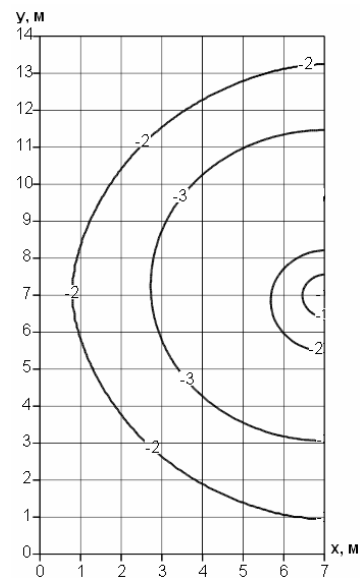


Рис. 9. Температурные изолинии в закладочных и породных массивах россыпной шахты при завершении формирования льдопородного закладочного массива при времени замораживания 1 слоя, равном 20 ч

Табл. 1. Оптимальное время замораживания 1 слоя ЛЗМ (час)

Толщина слоя, м	Температура замораживания, $^{\circ}\text{C}$											
	-25				-20				-15			
	Увлажненность слоя, %				Увлажненность слоя, %				Увлажненность слоя, %			
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
0,3	12	30	50	70	24	40	60	80	24	50	90	130
0,4	18	45	70	100	24	60	90	110	35	80	130	190
0,5	30	60	110	170	35	80	140	200	50	120	210	300

Как видно из данных таблицы, наибольшее влияние на продолжительность замораживания единичного слоя оказывает увлажненность укладываемого слоя, так повышение влажности с 5 до 20% увеличивает оптимальное время замораживания с 24 до 80 часов при температуре замораживания -20°C и толщине единичного слоя 0,3 м.

Данные, приведенные в таблице 1, могут быть рекомендованы, по нашему мнению, к использованию при разработке проектов по возведению ЛЗМ в РШ криолитозоны.

Выводы

Результаты исследований, проведенные на математических моделях, позволяют утверждать, что оптимизация технологических параметров послойного намораживания при закладке выработанного пространства РШ позволяет формировать ЛЗМ с необходимыми прочностными свойствами, что будет способствовать: снижению расходов на крепление очистного пространства РШ, повышению безопасности ведения горных работ и ускорению темпов отработки месторождения. Кроме этого обеспечивается возможность отработки ранее оставленных естественных целиков с получением дополнительного металла.

Продолжительность возведения ЛЗМ в РШ криолитозоны значительно сокращается при соблюдении следующих условий: температура шахтного воздуха ниже -15°C , скорость воздушного потока – 4-5 м/с; толщина единичного слоя за один прием не более 0,2 м; температура проливаемой воды $\approx 1^{\circ}\text{C}$; степень увлажненности пород – 15%.

Заключение

Полученные с использованием методов математического моделирования результаты исследований по возведению ЛЗМ в РШ являются предварительными и должны корректироваться при проведении опытно-экспериментальных работ на каком-либо объекте. Вместе с тем они имеют, как уже говорилось, практическую значимость и могут быть использованы при разработке проектной документации и будут способствовать ускоренному возведению ЛЗМ на горных предприятиях Севера разрабатывающих мерзлые глубокопогребенные золотороссыпные месторождения подземным способом. При этом может быть обеспечено:

- снижение расходов на крепление выработанного пространства РШ;
- возможность отработки оставляемых естественных целиков «обратным ходом», с получением дополнительного металла;
- восстановление целостности и естественного температурного режима техногенно нарушенного горного массива;
- предотвращение антропогенного опускания земной поверхности над отработанным шахтным полем;
- восстановление первозданного рельефа местности;
- освобождение земной поверхности от породных отвалов использовав их геоматериалы в качестве закладочного материала в РШ;
- круглогодичная занятость горнорабочих РШ.

Кроме этого, в определенной степени могут быть обеспечены предпосылки ускоренного, вторичного освоения техногенных (остаточно-целиковых) золотороссыпных месторождений с пополнением золотовалютного резерва страны.

Список литературы

1. Михайлов Ю.В. Оптимальные технологии подземной добычи руд Сибири // Горные науки и технологии. – 2018. – № 1. – С. 72-86.
2. Pan Z., Zhou K., Lin Y., Saleem F., Wang Y. Comparative analysis of strength and deformation behavior of cemented tailings backfill under curing temperature effect // Materials. 2022, vol. 15, no. 10. DOI: 10.3390/ma15103491.
3. Хохолов Ю.А., Курилко А.С. Теплообмен породных и закладочных массивов при отработке кимберлитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – №1. – С. 35-41.
4. Мальский К.С., Боровков Ю.А., Никитин А.А., Петров А.В. Обоснование параметров льдопородной закладки при подземной разработке месторождений благородных металлов крайнего Севера // Горный журнал. – 2019. – №12. – С. 43-46. – DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03.
5. Mamert Mbonimpa, Paire'm Kwizera, Tikou Belem. Mine Backfilling in the Permafrost, Part II: Effect of Declining Curing Temperature on the Short-Term Unconfined Compressive Strength of Cemented Paste Backfills // Minerals. 2019, vol. 9, iss. 3, p. 172. DOI: 10.3390/min9030172.
6. Zhang X., Ha I, Wang M., Liu L. Experimental Research on Heat Transfer and Strength Analysis of Backfill with Ice Grains in Deep Mine s// Sustainability. 2019, vol. 11, iss. 9, p. 2486.
7. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost // ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions – Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development. – 2013. – P. 175-190.
8. Галченко Ю.П., Сабянин Г.В., Михайлов Ю.В. Экологическая и экономическая эффективность применения льдопородной закладки при подземной разработке месторождений в криолитозоне // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 5. – С. 28-31.
9. Каймонов М.В., Хохолов Ю.А. Выбор состава льдопородных закладочных массивов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 179-188.
10. Необутов Г.П., Гринёв В.Г. Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. – 104 с.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
12. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2001. – 784 с.
13. Погода в Сусумане по месяцам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pogoda.365c.ru/russia/susuman/po_mesyacam.

References

1. Mikhailov Yu.V. Optimal technologies for underground mining of ores in Siberia // Mining Sciences and Technologies. 2018, no. 1, pp. 72-86.

2. Pan Z., Zhou K., Lin Y., Saleem F., Wang Y. Comparative analysis of strength and deformation behavior of cemented tailings backfill under curing temperature effect // *Materials*. 2022, vol. 15, no. 10. DOI: 10.3390/ma15103491.
3. Khokholov Yu.A., Kurilko A.S. Heat exchange of rock and backfill masses during kimberlite mining // *Physico-technical problems of mining minerals*. 2004, no. 1, pp. 35-41.
4. Malsky K.S., Borovkov Yu.A., Nikitin A.A., Petrov A.V. Justification of ice-rock parameters during underground mining of precious metal deposits in the Far North // *Mining Journal*. 2019, no. 12, pp. 43-46. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03.
5. Mamert Mbonimpa, Paire'm Kwizera, Tikou Belem. Mine Backfilling in the Permafrost, Part II: Effect of Declining Curing Temperature on the Short-Term Unconfined Compressive Strength of Cemented Paste Backfills // *Minerals*. 2019, vol. 9, iss. 3, p. 172. DOI: 10.3390/min9030172.
6. Zhang X., Ha I, Wang M., Liu L. Experimental Research on Heat Transfer and Strength Analysis of Backfill with Ice Grains in Deep Mine s// *Sustainability*. 2019, vol. 11, iss. 9, p. 2486.
7. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost // *ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions – Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development*. – 2013. – P. 175-190.
8. Galchenko Yu.P., Sabyanin G.V., Mikhailov Yu.V. Environmental and economic efficiency of using ice-rock backfill during underground mining of deposits in the permafrost zone // *Ecological systems and devices*. 2005, no. 5, pp. 28-31.
9. Kaimonov M.V., Khokholov Yu.A. Selection of the composition of ice-bearing backfill massifs // *Physico-technical problems of mineral development*. 2019, no. 5, pp. 179-188.
10. Neobutov G.P., Grinev V.G. Development of ore deposits using frozen backfill in permafrost conditions. – Yakutsk: Publ. house YSC SB RAS, 1997. – 104 p.
11. Samarsky A.A. Theory of difference schemes. – M.: Science, 1983. – 616 p.
12. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Computational heat transfer. – M.: Editorial URSS, 2001. – 784 p.
13. Weather in Susuman by month [Electronic resource]. – Access mode: https://pogoda.365c.ru/russia/susuman/po_mesyacam.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Хохолов Юрий Аркадьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник	Khokholov Yuri Arkadievich – doctor of technical sciences, leading researcher
Курилко Александр Сардокович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник	Kurilko Alexander Sardokovich – doctor of technical sciences, leading researcher
Киселев Валерий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Kiselev Valery Vasilievich – candidate of technical sciences, senior researcher
khokholov@igds.ysn.ru	

Получена 29.11.2023