

КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЛЬДОПОРОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В РОССЫПНЫХ ШАХТАХ СЕВЕРА

М.В. Каймонов¹, В.В. Киселев¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: gtf@igs.ysn.ru

Аннотация: Значительная часть золотодобывающих предприятий РФ расположено на территории Дальневосточного региона, в том числе в криолитозоне, где эффективную отработку мерзлых глубокопогребенных россыпных месторождений возможно производить только подземным способом. При этом поддерживать кровлю выработанного пространства россыпных шахт предлагается с помощью льдопородных целиков оригинальной конструкции, обеспечивающей повышенную несущую способность. Целики возводятся по усовершенствованной технологии с использованием металлических труб, послойно укладываемых в тело целика через определенные промежутки. Произведена оценка эффективности предлагаемого способа промерозки возводимого целика с использованием разработанной математической модели. В основу модели положено двумерное нелинейное уравнение теплопроводности (задача Стефана), которое позволяет прогнозировать термическое состояние вновь возводимого льдопородного целика и вмещающего массива многолетнемерзлых горных пород россыпной шахты. Разработана компьютерная программа, предусматривающая выбор геометрических размеров и оптимальные даты начала строительства льдопородного целика, физико-технических свойств горных пород, количество и порядок расположения металлических труб, по которым нагнетается холодный воздух для интенсификации промерозки возводимого целика. На компьютерных моделях проведено сравнение скорости возведения льдопородного целика традиционным и предлагаемым способами. Полученные результаты позволяют констатировать, что промораживание целика предлагаемой конструкции происходит намного быстрее в сравнении с обычным за счет принудительной циркуляции холодного воздушного потока по трубам. Установлена динамика охлаждения и последующего промерзания возводимого льдопородного целика в россыпных шахтах в условиях повышенной интенсивности вентиляции. Выявлены особенности процессов теплообмена между возводимым льдопородным целиком и окружающим многолетнемерзлым горным массивом россыпных шахт. Подтверждена возможность значительного ускорения процессов промораживания возводимого льдопородного целика предлагаемой конструкции и, как следствие этого, набора прочностных характеристик. Таким образом, возведенные целики будут иметь высокие прочностные характеристики, надежно поддерживая очистное пространство и обеспечивая безопасные условия эксплуатации россыпных шахт криолитозоны.

Ключевые слова: математическое моделирование, криолитозона, россыпная шахта, золотодобыча, горные выработки, льдопородный искусственный целик.

Для цитирования: Каймонов М.В., Киселев В.В. Конструкции, технологии и температурный режим льдопородных сооружений, возводимых в россыпных шахтах Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 118–129. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-118-129.

Designs, technologies and temperature conditions of frozen structures in placer mines in the North

M.V. Kaimonov¹, V.V. Kiselev¹

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: gtf@igds.ysn.ru

Abstract: Many gold mines in Russia are located in the Far East, including the permafrost zone. Efficient mining of deep placers in such conditions is only possible with the underground method. It is proposed to ensure roof support in mined-out areas in placer mines using frozen rock pillars of an original design capable to provide an increased load-bearing capacity. Such pillars are constructed using an improved technology, with metal pipes placed layer by layer in the body of a pillar at certain intervals. Efficiency of the proposed method for pillar freezing is evaluated using the developed mathematical model. The model uses the two-dimensional nonlinear equation of thermal conduction (Stefan problem), which enables prediction of temperature condition in the frozen pillar and enclosing permafrost formation in placer mines. The new computer program allows selecting geometry of a frozen rock pillar, construction dates, physicochemical properties of rocks, as well as the number and arrangement of metal pipes to inject cool air for more intense freezing of the pillar. Computer modeling is undertaken to compare the rate of construction of a frozen rock pillar using the conventional and proposed methods. The modeling results confirm that freezing of a pillar of a proposed design takes much shorter time as against the conventional approach due to the forced circulation of cool air in pipes. Dynamics of cooling and subsequent freezing of a frozen rock pillar constructed in placer mines in the conditions of higher rate of ventilation is determined. The features of heat exchange between the frozen rock pillar and surrounding permafrost formation in placer mines are revealed. The feasibility of appreciable acceleration of freezing in the proposed-design frozen rock pillar and the resultant development of strength is proved. Such design frozen rock pillars possess high strength, ensure reliable support of mined-out areas and improve operational safety in placer mines in the permafrost zone.

Key words: mathematical modeling, permafrost zone, placer mine, gold mining, underground openings, frozen rock pillar.

For citation: Kaimonov M. V., Kiselev V. V. Designs, technologies and temperature conditions of frozen structures in placer mines in the North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):118-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-118-129.

Введение

Освоение россыпных месторождений минерального сырья Северо-Восточных регионов страны затруднено по целому ряду причин. В связи с этим в целях обеспечения рентабельности горнодобывающих предприятий специалисты с привлечением различных организаций вынуждены разрабатывать для удешевления производственных процессов неординарные подходы, решения, способы, приемы и т.д., основанные, в том числе, на использовании местных

материалов и естественных ресурсов криолитозоны. В первую очередь это касается крепления выработанного пространства россыпных шахт (РШ), отрабатывающих глубокопогребенные мерзлые золотороссыпные месторождения и мерзлотные горизонты рудников.

В этих целях, начиная с середины прошлого века, рядом организаций проводятся исследования по применению в условиях распространения многолетне-мерзлых горных пород (ММГП) систем подземной разработки месторождений

с использованием ледяной и льдопородной закладки, ледяных и льдопородных целиков. Их использование позволяет намного снизить расходы на крепление выработанного пространства и, как следствие, себестоимость добываемого минерального сырья, т.к. в качестве строительного материала и связующего вещества используется естественное сырье — искусственно получаемый лед (замороженная вода). Наиболее масштабно эти исследования проводились применительно к подземной разработке мерзлых рудных и россыпных месторождений [1]. Необходимость использования льдопородных сооружений во многом была обусловлена сложностью и дорогостоящей доставки всех типов крепей, дефицитом крепежного леса, в особенности в тундровых регионах, и т. д. К тому же, одновременно решался ряд проблем экологического плана, в частности, размещение в подземном отработанном пространстве геоматериалов отвалов, загромаждающих горные отвалы. Кроме этого, появлялась возможность обеспечения сплошности нарушенного подземными работами горного массива, восстановление прежнего рельефа земной поверхности.

Благоприятными факторами применения льдопородных сооружений являлись климатические и геокриологические особенности Северо-Восточного региона, а также горнотехнические особенности РШ и мерзлотных горизонтов рудников [2].

Применяемые технологии ведения льдозакладочных работ и возведения искусственных целиков

Льдозакладочные работы осуществлялись в горной практике в двух вариантах:

- С использованием ледяных блоков, изготавливаемых на поверхности в

зимнее время с помощью естественного холода, которые затем доставлялись в подземное выработанное пространство и там же укладывались.

- Послойным замораживанием льда (подаваемой с поверхности воды) непосредственно в выработанном пространстве шахты или рудника. Такая же технология была признана наиболее рациональной при возведении ледяных целиков [3–7].

Необходимо отметить, что технология производства льдозакладочных работ довольно проста и не требует приобретения дорогостоящего оборудования и привлечения высококвалифицированного персонала. Заключается в изоляции участка подземного выработанного пространства, подачи воды в зимний период в нужном объеме для образования слоя льда толщиной не более 10–15 см и его последующего промораживания естественным холодом. После замерзания слоя поверх него намораживается другой слой, и так до полной льдозакладки выработанного пространства.

Возведение ледяных целиков предполагает выполнение дополнительных операций: предварительную установку в определенных точках отработанных участков в РШ опалубки и проходки над ней с поверхности скважины большого диаметром 500–600 мм. В дальнейшем выполняются все выше описанные операции.

Использование льдопородной закладки предполагает послойное заполнение выработанного пространства отработанным геоматериалом (отвалы торфов или галечные отвалы) с его последующим проливом водой и промораживанием естественным холодом каждого слоя [2–7]. Несмотря на высокие компрессионные свойства в сравнении с ледяной, она распространения не получила в первую очередь из-за высокой трудоемкости работ.

При возведении льдопородных целиков так же используется вышеописанная технология послойного намораживания увлажненных геоматериалов и выполняются те же операции, что и при возведении ледяных. При этом в качестве дополнительных операций выполняется заполнение огороженного опалубкой пространства геоматериалом отвалов через скважины, пробуренные с поверхности [8, 9].

В промышленных масштабах разработанная Институтом горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН) технология льдопородной закладки, возводимой методом послойного намораживания, была внедрена, в частности, при отработке мерзлотных горизонтов на руднике Бадран (Оймяконский район Республики Саха (Якутия)). В результате этого были существенно улучшены показатели извлечения руды, при этом потери и разубоживание были значительно снижены до 3–5 и 17–21% соответственно по сравнению с ранее применявшейся на руднике камерно-столбовой системой разработки, где эти показатели составляли 28–30 и 30–35% [4, 6]. Возведение ледовых и льдопородных целиков, а также закладочных массивов практиковалось на некоторых золотороссыпных шахтах Северо-Востока РФ, рудниках Аляски и Канады [10, 11].

В то же время необходимо отметить, что внедрение ледовой и льдопородной закладки и целиков при отработке месторождений криолитозоны выявило ряд присущих им недостатков: низкая технологичность возведения, значительные затраты времени на промозку и набор нормативной несущей способности, сезонное ограничение работ и т.д. Так, длительность набора требуемых прочностных характеристик льдопородной закладкой составляет от 3 и более месяцев и зависит от множест-

ва факторов: мощности единичного промораживаемого слоя; количества затрачиваемой воды; теплофизических характеристик пород, вмещающих горные выработки и т.д. [5, 7]. По этим же причинам возведение льдопородных целиков и набор ими требуемых компрессионных свойств также происходит в замедленном режиме, что существенно снижает интенсивность ведения очистных работ. Вышеперечисленные обстоятельства во многом препятствуют дальнейшему внедрению льдопородных конструкций на горных предприятиях.

В связи с этим, основной задачей является создание и использование наиболее совершенных льдопородных конструкций в РШ.

В течение ряда лет в ИГДС СО РАН проводились исследования, направленные на совершенствование способов, конструкций и технологий возведения льдопородных целиков в РШ криолитозоны, на которые получены патенты РФ [4–9].

Один из способов (Патент РФ № 2474695) возведения искусственных тумбообразных целиков включает сооружение в очистном пространстве РШ передвижной опалубки, укладки в нее в зимний период замороженных геоматериалов вскрышных или галечных отвалов, подаваемых с поверхности вперемешку с колотым льдом по специально пробуренной с поверхности скважине; прогрев и увлажнение льдопородной смеси перегретым паром, подаваемым парогенераторной установкой с образованием льдопородного сооружения; обдув возведенного целика атмосферным воздухом, нагнетаемым с поверхности вентилятором [8].

Проведенными исследованиями на математических моделях выявлены особенности формирования температурного режима возведенных по вышеописанной технологии целиков.

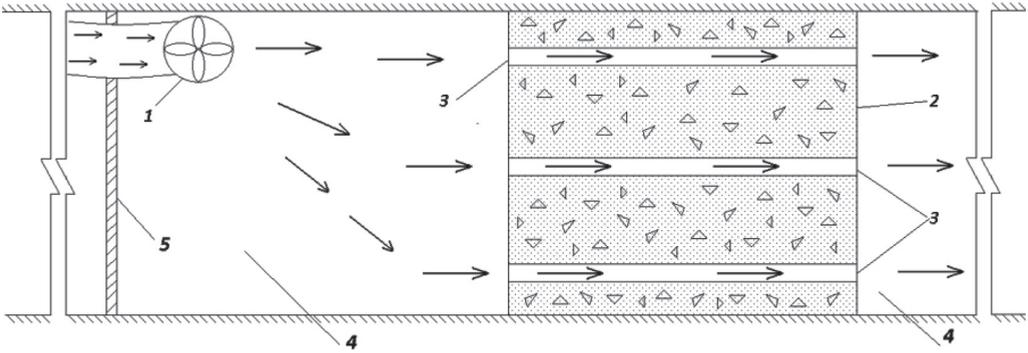


Рис. 1. Способ возведения льдопородных целиков, армированных металлическими трубами в РШ криолизотроны: 1 – вентилятор местного проветривания (нагнетательный) с гибким воздуховодом; 2 – возведенный льдопородный целик; 3 – металлические трубы, уложенные горизонтально; 4 – выработанное пространство РШ; 5 – перемычка

Fig. 1. The method of erection of ice-bearing pillars reinforced with metal pipes in the cryolithic zone: 1 – local ventilation fan (blower) with a flexible duct; 2 – the erected ice breed pillar; 3 – metal pipes laid horizontally; 4 – mined space RS; 5 – jumper

Подробно описан в [9] другой способ, во многом идентичный по выполняемым операциям вышеописанному (Патент РФ № 2601704), предполагает использование водоводных, выработавших технический ресурс металлических труб, укладываемых в тело целика в процессе его послойного возведения с образованием сквозных каналов, к тому же способствующих увеличению прочностных характеристик и сокращению времени проморозки. Возведенный по этому способу армированный льдопородный целик в РШ схематически изображен на рис. 1.

Математическое моделирование процесса формирования искусственных целиков

Для исследования процессов теплопереноса в возводимом армированном льдопородном целике и вмещающем массиве ММГП была разработана математическая модель. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Процессы теплопереноса в формируемом искусственном целике описываются нелинейным параболическим

уравнением второго порядка (задача Стефана) [12 – 18]:

$$\begin{aligned} & \left[C(T) + L_1 \cdot W \cdot \rho_2 \cdot \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \\ C(T) & = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases} \\ & x, y \in D_{xy}, \quad t > 0; \end{aligned} \quad (1)$$

где T – температура горных пород, °С; T^* – температура фазовых переходов влаги в горных породах, °С; t, x, y – временная (c) и пространственные координаты (м); L_1 – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W – влажность горных пород, доли единицы; ρ_2 – плотность воды (кг/м³); $c_1, \rho_1, \lambda_1 (c_2, \rho_2, \lambda_2)$ – удельная теплоемкость (Дж/(кг · К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м · К)) соответственно для мерзлых (талых) горных пород; $\delta(T - T^*)$ – функция Дирака, 1/К.

Фазовые переходы учитываются с помощью δ -функции Дирака.

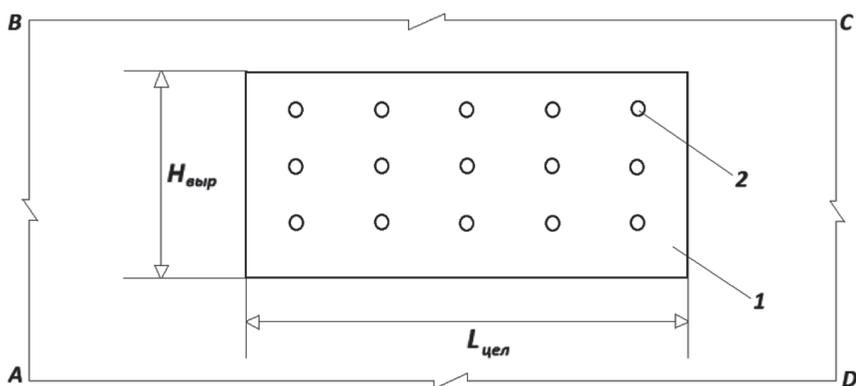


Рис. 2. Расчетная схема процесса формирования температурного режима возводимого искусственного целика: 1 – возведенный металло-льдопородный целик; 2 – поток холодного воздуха, проходящий по трубам (источник холода); $H_{\text{выр}}$ – высота целика, м; $L_{\text{цел}}$ – ширина целика, м

Fig. 2. The design diagram of the process of forming the temperature regime of the constructed artificial pillar: 1 – the erected metal-ice pillar; 2 – a stream of cold air passing through pipes (source of cold); $H_{\text{выр}}$ – the height of the pillar, m; $L_{\text{цел}}$ – the width of the pillar, m

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y); x, y \in D_{xy}. \quad (2)$$

Граничные условия для границ AB, BC, CD, DA определяются как отсутствие теплообмена:

$$\partial T / \partial n = 0, t > 0. \quad (3)$$

Мощность источника холода в трубах рассчитывается по формуле:

$$\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha [T(x, y, t) - T_{\text{air}}(t)], t > 0 \quad (4)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена воздуха с поверхностью труб, Вт/(м² · К); T_{air} – температура воздуха в трубах, °С (рис. 2).

Расчет скорости воздуха в металлических трубах производится по формуле Пуазейля [19]:

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) \pi R^4}{8 \eta L}, \quad (5)$$

где Q – объем воздуха, м³; P_1, P_2 – давление воздуха на концах трубы, Па; L – длина трубы, м; R – радиус трубы, м; η – динамическая вязкость, Па · с.

Численные расчеты проводились методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы и метода простых итераций [20–23].

Результаты численных экспериментов

Для оценки эффективности предлагаемого способа проморозки возводимого армированного целика с принудительным нагнетанием атмосферного воздуха по трубам в сравнении с обычным способом были проведены численные эксперименты с использованием разработанной математической модели. Были приняты следующие начальные условия. Размер льдопородного целика 5×5×5 м. Количество труб – 16 шт, уложенных в четыре ряда на расстоянии 1 м друг от друга равномерно. Для ММГП: естественная температура изменяется в пределах от минус 4 до минус 6 °С; влажность 0,25 долей единицы; плотность 2060 кг/м³; удельная теплоемкость 1098 (1276) Дж/(кг · К) и коэффициент теплопроводности 1,57 (1,4) Вт/(м · К) для мерзлых (талых) пород соответственно. Для льдопород-

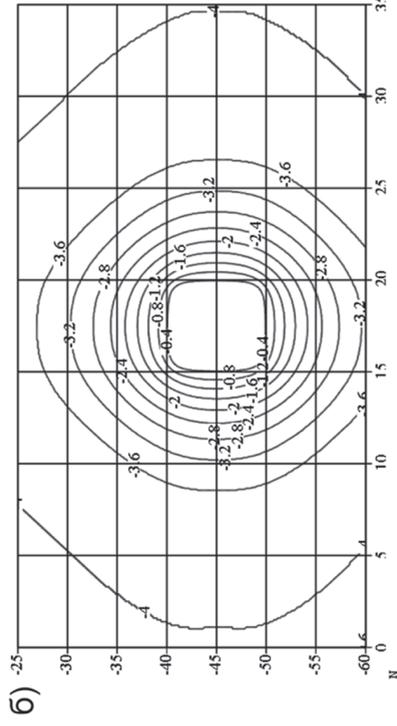
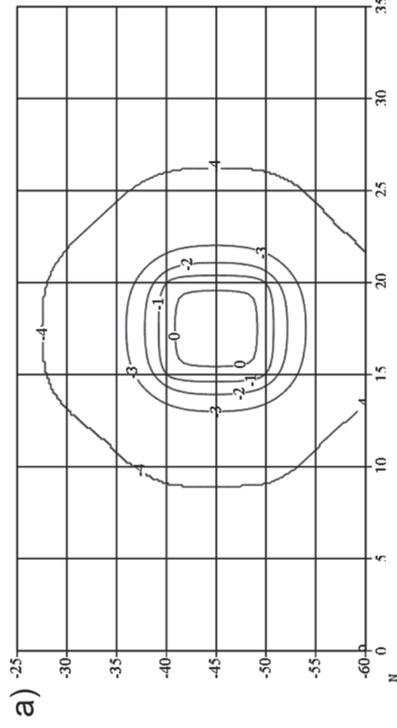


Рис. 3. Изолинии температур во вмещающем массиве ММГП и неармированном льдопородном целике: через месяц после его возведения (а); через 6 месяцев после его возведения (б)

Fig. 3. Temperature isolines in the host massif MMGP and unreinforced ice-rock pillar: a) one month after its construction; b) 6 months after its construction

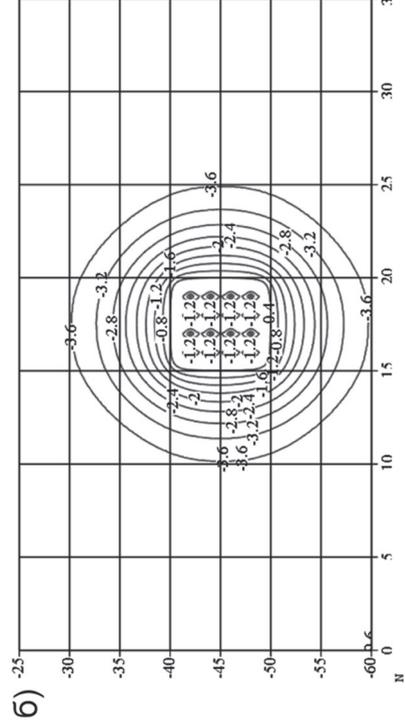
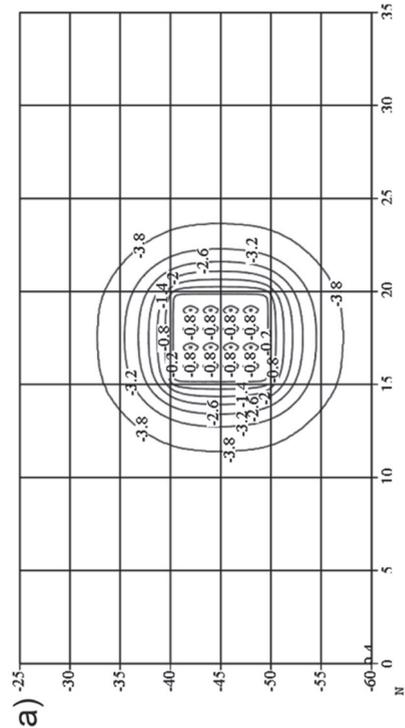


Рис. 4. Изолинии температур во вмещающем массиве ММГП и в армированном трубами льдопородном целике: через месяц после его возведения (а); через три месяца после его возведения (б)

Fig. 4. Temperature contours in the enclosing massif MMGP and in the pipe-reinforced ice-bearing pillar: a) one month after its construction; b) three months after its construction

ного целика: начальная температура изменяется в пределах от +1 до +2 °С; влажность 0,4 долей единиц; плотность 1800 кг/м³; удельная теплоемкость 1150 (1280) Дж/(кг · К) и коэффициент теплопроводности 1,45 (1,32) Вт/(м · К) для мерзлых (талых) пород соответственно. Температура воздуха, проходящего по трубам, изменяется в пределах от минус 10 до минус 20 °С. Результаты некоторых вариантов расчетов приведены на рис. 3–4.

Как видно из изолиний температур, представленных на рис. 3, промораживание льдопородного целика за счет естественной температуры ММГП занимает довольно продолжительное время ввиду значительной теплоемкости воды, вносимой в целик за время его возведения. Так при естественной температуре ММГП –4 °С и при начальной температуре целика +1 °С даже через 6 месяцев после его формирования температура понизилась только до –0,4 °С на его границе. При этом по всему объему целика температура составляла порядка –0,2 °С, температура ММГП за счет притока тепла повысилась до –2,5 °С на расстоянии до 5 м от его границ. Как показывают расчеты, понижение температуры в теле целика до –3 °С (что соответствует набору нормативной прочности) происходит только через 1,5 года и более.

На рис. 4 представлены изолинии температур во вмещающем ММГПРШ и теле целика при условии его промораживания с помощью холодного атмосферного воздуха, нагнетаемого по трубам: естественная температура ММГП –4 °С, начальная температура целика +1 °С, температура воздуха в трубах –15 °С. Как видно из рис. 4, уже через три месяца после формирования целика температура на его границе достигает значения –1,2 °С, а понижение температуры в теле целика до –3 °С происхо-

дит уже через полгода. Таким образом, анализ графиков (изолиний) (рис. 3 и 4) позволяет констатировать, что промораживание целика, армированного трубами и принудительно вентилируемого атмосферным воздухом в холодный период года, происходит намного быстрее, что дает основание утверждать эффективность предлагаемого способа, ускоряющего процесс его промораживания более чем в три раза.

Проведенными исследованиями на математических моделях были определены основные технологические параметры возводимых целиков (количество труб, их расположение и диаметр и др.), а также оптимальные режимы вентиляции (проморозки) атмосферным воздухом, обеспечивающие высокие скорости строительства и набора несущей способности.

Основные выводы

Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

- представлен анализ существующих способов, конструкций и технологий возведения льдопородных конструкций в РШ криолитозоны; определены основные задачи по их совершенствованию;
- приведено краткое описание запатентованных способов сооружения льдопородных целиков в РШ разработанных ИГДС СО РАН, обеспечивающих ускоренный режим возведения и набора прочностных характеристик;
- разработана математическая модель и проведены численные эксперименты формирования температурного режима искусственно вентилируемого атмосферным воздухом в холодный период года льдопородного целика, армированного металлическими трубами, уложенными в определенном порядке для реальных условий эксплуатации РШ;

- выявлены особенности динамики охлаждения и последующего промерзания возводимого льдопородного целика в РШ при нагнетании воздуха по вентиляционным каналам (трубам);
- определены качественные показатели и выявлены особенности процессов теплообмена между возводимым льдопородным целиком и окружающим массивом ММГП РШ;
- подтверждена целесообразность предлагаемой конструкции льдопородного целика, обеспечивающей возможность значительного ускорения процессов промораживания и, как следствие

этого, набора им несущей способности.

Внедрение предлагаемого способа поддержания выработанного пространства на РШ Севера будет способствовать, по нашему мнению, ускорению продвижения фронта очистных работ при снижении затрат, а также решению ряда проблем экологического плана. Кроме этого, отработка естественных целиков в РШ и замена их на искусственно возведенные льдопородные позволит значительно сократить потери и, как следствие этого, получить дополнительный металл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подземная разработка россыпных месторождений: Библиогр. указатель отеч. лит. (1965–2001 гг.) / Сост. В.А. Шерстов; РАН. Сиб. отд. Ин-т горн. дела Севера. НТБ. — Якутск: Типогр. ИМ, 2002. — 152 с.
2. Сальманов Р.Н., Мачнев Ф.Ф. О целесообразности применения искусственных ледяных целиков при подземной разработке вечномерзлых россыпей // Колыма. — 1977. — № 11. — С. 7–10.
3. Сальманов Р.Н., Красных С.Н. Разработка россыпных месторождений с применением замораживаемого закладочного материала // Колыма. — 1987. — № 3. — С. 19–20.
4. Необутов Г.П., Гринев В.Г. Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты. — Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. — 104 с.
5. Петров А.Н., Алексеев А.М., Колесников С.Г., Петров Д.Н. Технологические решения по отработке подмерзлотных горизонтов месторождения Бадран // Горный журнал. — 2016. — № 9. — С. 46–50.
6. Необутов Г.П., Петров Д.Н., Никулин Е.В. Оценка изменения тенденций развития технологии разработки жильных месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 4. — С. 14–22.
7. Каймонов М.В., Хохолов Ю.А. Выбор состава льдопородных закладочных массивов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 5. — С. 179–188.
8. Киселев В.В., Хохолов Ю.А. Перспективные способы вторичной подземной разработки глубокопогребенных остаточно-целиковых россыпных месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — СВ 30. — С. 173–184.
9. Киселев В.В., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В. Приоритетные направления подземной золотодобычи и крепления очистного пространства россыпных шахт криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 5. — С. 49–58.
10. Skudzyk F. I., Barker I. C., Walsh D. E., MacDonald R. Applicability of Siberian placer mining technology to Alaska; Final Report for the Alaska Science and Technology Foundation MIREL, Report № 89 University of Alaska Fairbanks, 1991. 77 p.
11. Шерстов В.А., Шерстова Л.И., Маликов Е.Ф., Скрябин Р.М. Золотодобывающая промышленность Аляски. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. — 44 с.

12. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 2004. — 798 с.
13. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. Ч. 2. — М.: Высшая школа, 1982. — 304 с.
14. Wei Cao, Yu Sheng, Jichun Wu, Jing Li, Yaling Chou, Jinping Li Simulation analysis of the impacts of underground mining on permafrost in an opencast coal mine in the northern Qinghai–Tibet Plateau // *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. No 20. Pp. 711.
15. Panteleev I. A., Kostina A. A., Plekhov O. A., Levin L. Y. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017. Vol. 9. No 4. Pp. 1–15.
16. Zheng T., Miao X.-Y., Naumov D., Haibing Shao, Kolditz O., Nagel T. A Thermo-hydro-mechanical finite element model of freezing in porous media – thermo-mechanically consistent formulation and application to ground source heat pumps / VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, 2017.
17. Seon Hong Na, Wai Ching Sun Computational thermo-hydro-mechanics for multiphase freezing and thawing porous media in the finite deformation range // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 318. No 667. DOI: 10.1016/j.cma.2017.01.028.
18. Mikkola M., Hartikainen J. Mathematical model of soil freezing and its numerical implementation // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001. Vol. 52(5–6). Pp. 543–557.
19. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика. — М.: Стройиздат, 1972. — 648 с.
20. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2014. — 784 с.
21. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
22. Мусакаев Н. Г., Романюк С. Н., Бородин С. Л. Численное исследование закономерностей движения фронта фазового перехода в многолетнемерзлых породах // *Известия вузов. Нефть и газ*. — 2011. — № 6. — С. 122–128.
23. Хасанов М. К., Столповский М. В. Численное решение задачи Стефана с несколькими границами фазовых переходов методом ловли фронта в узел сетки // *Фундаментальные исследования*. — 2015. — № 11 (ч. 4). — С. 748–752. **MIAB**

REFERENCES

1. *Podzemnaya razrabotka rossypanykh mestorozhdeniy: Bibliograficheskiy ukazatel' otechestvennoy literatury. (1965–2001 gg.)* [Underground mining of placers. Index to Russian literature (1965–2001)], Yakutsk, Tipografiya IM, 2002, 152 p.
2. Sal'manov R. N., Machnev F. F. Practicality of artificial frozen pillars in underground mining of permafrost placers. *Kolyma*. 1977, no 11, pp. 7–10. [In Russ].
3. Sal'manov R. N., Krasnykh S. N. Placer mining with frozen backfill. *Kolyma*. 1987, no 3, pp. 19–20. [In Russ].
4. Neobutov G. P., Grinev V. G. *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy s ispol'zovaniem zamorazhivaemoy zakladki v usloviyakh mnogoletney merzloty* Ore mining with frozen backfill in permafrost], Yakutsk, Izd-vo YANTS SO RAN, 1997, 104 p.
5. Petrov A. N., Alekseev A. M., Kolesnikov S. G., Petrov D. N. Engineering solutions on mining on subpermafrost layers in the Badran deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no 9, pp. 46–50. [In Russ].
6. Neobutov G. P., Petrov D. N., Nikulin E. V. New trends in mining technologies for lode deposits in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no 4, pp. 14–22. [In Russ].
7. Kaymonov M. V., Khokholov Yu. A. Selecting composition for frozen fill masses. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 5, pp. 179–188. [In Russ].

8. Kiselev V.V., Khokholov Yu.A. Promising methods of secondary underground mining of deep residual placer blocks in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. Special edition 30, pp. 173–184. [In Russ].

9. Kiselev V.V., Khokholov Yu.A., Kaymonov M.V. Top-priority trends in underground gold mining and roof support in mined-out areas of placer mines in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 5, pp. 49–58. [In Russ].

10. Skudzyk F.I., Barker I.C., Walsh D.E., MacDonald R. *Applicability of Siberian placer mining technology to Alaska*; Final Report for the Alaska Science and Technology Foundation MIRL, Report № 89 University of Alaska Fairbanks, 1991. 77 p.

11. Sherstov V.A., Sherstova L.I., Malikov E.F., Skryabin R.M. *Zolotodobyvayushchaya promyshlennost' Alyaski* [Gold mining in Alaska], Yakutsk, Izd-vo YANTS SO RAN, 1992, 44 p.

12. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Mathematical physics equations], Moscow, Nauka, 2004, 798 p.

13. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Metody teorii teploprovodnosti*. Ch. 2 [Methods of the theory of heat conduction. Part 2], Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 304 p.

14. Wei Cao, Yu Sheng, Jichun Wu, Jing Li, Yaling Chou, Jinping Li Simulation analysis of the impacts of underground mining on permafrost in an opencast coal mine in the northern Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. No 20. Pp. 711.

15. Pantelev I.A., Kostina A.A., Plekhov O.A., Levin L.Y. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017. Vol. 9. No 4. Pp. 1–15.

16. Zheng T., Miao X.-Y., Naumov D., Haibing Shao, Kolditz O., Nagel T. A Thermo-hydro-mechanical finite element model of freezing in porous media – thermo-mechanically consistent formulation and application to ground source heat pumps. *VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, 2017.

17. Seon Hong Na, Wai Ching Sun Computational thermo-hydro-mechanics for multiphase freezing and thawing porous media in the finite deformation range. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 318. No 667. DOI: 10.1016/j.cma.2017.01.028

18. Mikkola M., Hartikainen J. Mathematical model of soil freezing and its numerical implementation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001. Vol. 52(5–6). Pp. 543–557.

19. Bogomolov A.I., Mikhaylov K.A. *Gidravlika* [Hydraulics], Moscow, Stroyizdat 1972, 648 p.

20. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer], Moscow, Едиториал УРСС, 2014, 784 p

21. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes], Moscow, Nauka, 1983, 616 p.

22. Musakaev N.G., Romanyuk S.N., Borodin S.L. Numerical research of phase transfer advance patterns in permafrost rocks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*. 2011, no 6, pp. 122–128. [In Russ].

23. Khasanov M.K., Stolpovskiy M.V. Numerical solution of a Stefan's problem with a number of phase boundaries with the trapping of phase transfers in the mesh nodes. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015, no 11 (ч. 4), pp. 748–752. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каймонов Михаил Васильевич¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,

Киселев Валерий Васильевич¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.

Для контактов: Каймонов М.В., e-mail: gtf@igds.ysn.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Kaimonov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

V.V. Kiselev¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

¹Chersky Mining Institute of the North,

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

677018, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Corresponding author: M.V. Kaimonov, e-mail: gtf@igds.ysn.ru.

Получена редакцией 17.01.2020; получена после рецензии 27.03.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 17.01.2020; received after the review 27.03.2020; accepted for printing 20.07.2020.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ШАХТНОЙ ПРОХОДЧЕСКОЙ МАШИНЫ

(№ 1223/08–20 от 26.05.2020; 13 с.)

Исалдинов Иса Нурланович – магистрант, ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: isa_isaldinov@mail.ru.

Конструкция и электрооборудование применяемое при проходке шахтного ствола имеет ряд недостатков. Во-первых, проходческие подъемные установки занимают большую площадь и требуют много времени для монтажных работ. Внедряемая конструкция мобильного проходческого комплекса неприхотлива и может быть использована повторно при проходке других шахт, что существенно снижает расходы управляющей компании. Во-вторых, в бадьевых подъемных установках применяется асинхронный электродвигатель с фазным ротором. Регулирование скорости двигателя осуществляется неэкономично, путем включения дополнительных резисторов в роторную цепь. Диаграмма скорости бадьевых подъемных установок отличается от типовых диаграмм других видов подъема существенно большим временем, расходуемым на переходные процессы и движение с пониженной скоростью. Асинхронные двигатели подъемной машины потребляют тысячи киловатт при подъеме и спуске бадьи. Проведенный расчет доказал, что использование преобразователя частоты с активным выпрямителем для питания асинхронного электродвигателя повышает энергоэффективность всего мобильного проходческого комплекса.

Ключевые слова: мобильная шахтная проходческая подъемная машина, активный выпрямитель, рекуперация энергии в сеть, транзисторы, асинхронный двигатель, прямое регулирование момента, энергосбережение, качество электрической энергии.

FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE FOR MOBILE MINE TUNNELING MACHINE

I.N. Isaldinov, Master's Degree Student, e-mail: isa_isaldinov@mail.ru,

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The design and electrical equipment used when shaft sinking has several disadvantages. Firstly, tunneling hoists occupy a large area and require a lot of time for installation work. The implemented design of the mobile sinking complex is unpretentious and can be reused when driving other mines, which significantly reduces the costs of the management campaign. Secondly, in bucket lifting installations an asynchronous electric motor with a phase rotor is used. Speed control of this engine is extremely uneconomical, by including additional resistors in the rotor circuit. The speed diagram of bucket lifting equipment differs from the typical diagrams of other types of lifting with significantly longer time spent on transients and movement at a reduced speed. Lifting machine induction motors consume thousands of kilowatts when lifting and lowering the bucket. The calculation proved that the use of a frequency converter with an active rectifier to power an asynchronous electric motor increases the energy efficiency of the entire mine mobile tunnel complex.

Key words: mobile mine tunneling lifting machine, active rectifier, energy recovery in the network, transistors, asynchronous motor, direct torque control, energy saving, quality of electrical energy.