

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.2:624.1

ВЫБОР СОСТАВА ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ

М. В. Каймонов, Ю. А. Хохолов

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: gtf@igds.ysn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Рассмотрен вопрос формирования искусственного льдопородного массива для закладки выработанного пространства шахт и рудников в условиях криолитозоны. Определены оптимальные льдопородные смеси с необходимыми прочностными свойствами. Показано, что несущая способность закладочного массива зависит от гранулометрического состава и объемного содержания льда. Разработана математическая модель послойного формирования льдопородного массива и установлено необходимое время его замораживания. Варьируя состав смеси и параметры проморожки, можно добиться необходимой прочности при минимальном времени формирования льдопородного массива.

Рудник, льдопородная закладка, криолитозона, многолетнемерзлые породы, температура пород, смерзание, математическое моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20190519

С середины XX в. проводятся исследования по применению в условиях распространения многолетнемерзлых горных пород систем подземной разработки россыпных месторождений с ледяной и льдопородной закладкой, позволяющих снизить себестоимость горных работ, так как в качестве связующего вещества выступает лед или пресная вода, способная замерзнуть [1].

В промышленных масштабах технология с льдопородной закладкой на переносном оборудовании Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН внедрена на наклонно залегающем золоторудном месторождении Бадран в Республике Саха (Якутия). Благодаря этому потери и разубоживание снизились до 0–3 и 17–21 % соответственно по сравнению с ранее применявшейся на руднике камерно-столбовой системой разработки, где показатели составляли 28–30 и 30–35 % [2, 3].

Использование льдопородной закладки при отработке месторождений криолитозоны выявило следующие недостатки: низкая технологичность возведения, значительные затраты времени на набор нормативной прочности и сезонное ограничение при формировании. Длительность образования льдопородной закладки до необходимой механической прочности изменяется от 3 до 15 мес и более в зависимости от мощности промораживаемого слоя, количества пролитой воды и теплофизических характеристик вмещающих пород [4–6].

Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов определяются многими факторами и изменяются с повышением или понижением температуры, влажности (льдиности), пористости и т. п. Исследование прочностных и деформационных свойств мерзлых дисперсных грунтов описано в [7–10]. Данных о характере деформирования и изменения прочности мерзлых крупнообломочных пород чрезвычайно мало [11, 12]. В настоящее время нет полного теоретического описания их разрушения [7]. Чтобы обеспечить нормальный технологический процесс очистной выемки, необходимо качественно улучшить основные показатели, при которых достигается максимальная прочность и минимальное время смерзаемости закладочного массива.

Цель настоящей работы — определить зависимости прочностных характеристик смерзшихся крупнодисперсных горных пород от влажности, гранулометрического состава и плотности упаковки частиц геоматериала [13].

ПОДБОР СОСТАВА ОПТИМАЛЬНЫХ ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ

Чтобы определить характер деформирования и разрушения смерзшихся крупнодисперсных горных пород различного состава, проводили испытания на одноосное сжатие замороженных образцов из речного песка, щебня двух фракций 5–10 и 10–20 мм, а также их смесей при разной влажности и плотности упаковки частиц геоматериала и льда. В опытах постоянными принимались способ приготовления, размеры и геометрическая форма образцов, температура замораживания, скорость приложения нагрузки, граничные условия, а переменными — гранулометрический состав, влажность и плотность упаковки частиц горной породы. Влияние масштабного фактора на прочностные показатели освещено в [7–10].

Эксперименты выполнялись на образцах кубической формы с размером ребер 100 мм. Исследуемый материал увлажняли до заданного значения, перемешивали и засыпали в металлическую разборную форму с внутренним размером 100 × 100 × 100 мм. Часть экземпляров в формах уплотняли на лабораторной виброплощадке в течение 30 с, частота колебаний составила 50 Гц. Формы с материалом для предотвращения потери влаги оборачивали полиэтиленовой пленкой и помещали в морозильную камеру, где образцы замораживались в течение 24 ч и принимали температуру –20 °С. Затем формы разбирались, мерзлые образцы взвешивались и измерялись геометрические параметры. Чтобы снизить трение, при испытании на одноосное сжатие по торцам применялись прокладки из стали: в холодильную камеру помещали металлические прокладки толщиной 10 мм, которые во время опыта клали между верхней и нижней плоскостью образца и площадками пресса. Определение прочности на одноосное сжатие мерзлых экземпляров проводили на испытательной машине UTS-250 при скорости нагружения 2 мм/мин и получали график нагружения образца. После эксперимента из разрушенных образцов отбирались пробы для определения влажности материала по ГОСТ 5180-75.

Испытания показали, что характеры деформирования и разрушения при одноосном сжатии льда и смерзшихся крупнодисперсных горных пород с неодинаковым гранулометрическим составом резко различаются. Материалы изо льда деформировались как хрупкие тела, почти не изменяя своей формы вплоть до разрушения, которое происходило с образованием многочисленных продольных трещин по всему объему образца. Разрушение фиксировалось отчетливо. Экземпляры из щебня фракции 5–10 и 10–20 мм и речного песка при весовой влажности не более 2% во время разрушения рассыпались на отдельные смерзшиеся конгломераты. При влажности 2–6% признаки разрушения отсутствовали и заметного изменения формы не наблюдалось. При полном влагонасыщении образцы из щебня фракции 5–10 и 10–20 мм

сильно деформировались и принимали бочкообразную форму, нарушения сплошности отсутствовали. В некоторых случаях для неуплотненных образцов разрушение происходило с образованием нескольких поверхностей скола. Экземпляры из речного песка при повышении влажности более 6 % деформировались с увеличением поперечных размеров образца и приобретали бочкообразную форму, а при влажности более 15 % — расплющивались. При полном влагонасыщении образцы разрушались с образованием нескольких поверхностей скола. Материалы из смеси щебня фракции 5–10 мм и речного песка при полном влагонасыщении разрушались с образованием нескольких поверхностей скола, а при меньшей влажности видимые признаки разрушения отсутствовали и заметных изменений формы не наблюдалось.

По результатам испытаний строились диаграммы зависимости предельной прочности на одноосное сжатие и объемной влажности при данной скорости приложения нагрузки. Температура окружающей среды $+7 \div -10$ °С. Одновременно температура измерялась на контрольных образцах, для этого при изготовлении внутрь помещался термодатчик. Температура снаружи и внутри экземпляра фиксировалась с помощью цифрового прибора CENTER 314. С увеличением нагрузки температура внутри смерзшихся образцов при полном влагонасыщении возрастала от -20 до -16 °С и достигала максимума при разрушении (длительность опыта 60–90 с). С прекращением деформирования температура понижалась и снаружи образца изменялась незначительно в пределах 1 °С.

Разрушение смерзшихся образцов при полном влагонасыщении сопровождалось выделением воды. На поверхности материала при одноосном сжатии вплоть до момента разрушения проступали мелкие капли воды, которые после разрушения вновь замерзали. Это объясняется тем, что во льду при сжатии отсутствует пластическая деформация и в стадии упругопластического деформирования происходит нарушение льдоцементационных связей и таяние, т. е. некоторая часть энергии сил, вызывающих деформацию смерзшихся крупнодисперсных горных пород, переходит в тепло. В [14] проведена оценка теплового эффекта деформации, которая для мерзлых крупнообломочных пород составляет ~ 5 %. Прямая зависимость между ростом напряженно-деформированного состояния и повышением температуры породы отмечается в [14–16].

Результаты, полученные для образцов льдопородного закладочного массива, приведены на рис. 1. Области изменения прочности мерзлых материалов с учетом объемного влагосодержания обозначены овалами. Образцы из щебня испытывались при полном влагонасыщении и влажности, которая удерживалась на поверхности кусков щебня, не стекая с них.

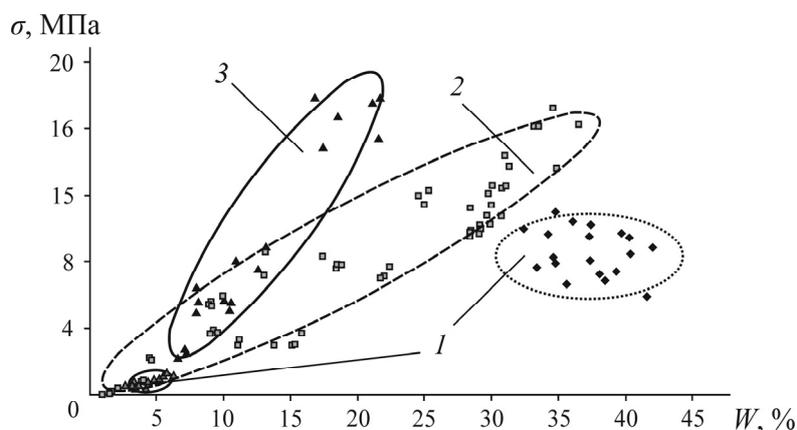


Рис. 1. Изменение прочности смерзшихся дисперсных горных пород различного гранулометрического состава от объемного влагосодержания: 1 — щебень фракции 5–20 мм; 2 — песок речной; 3 — смесь песка речного (38 %) и щебня (42 %)

На рис. 1 выделены две области, обозначенные цифрой 1, с низкой (2.5–6.5 %) и высокой (32–42 %) влажностью. Прочность мерзлых образцов при полном влагонасыщении из щебня ($W=35-40\%$) изменялась от 6 до 11 МПа, песка ($W=32-37\%$) — от 14 до 17 МПа, т. е. прочность мерзлого речного песка при полном влагонасыщении в 2 раза выше прочности влагонасыщенных образцов щебня. Объемные влажности материалов одинаковые. Оптимальная по составу смесь песка и щебня при полном влагонасыщении (17–22 %) имеет прочность 15–18 МПа, т. е. при близких значениях прочности мерзлых смеси и песка объемное содержание льда в смеси в 2 раза меньше.

Оптимальная смесь песка и крупнообломочного наполнителя имеет минимальную пористость и влагоемкость. Расчеты показали, что повышение влажности с 10 до 40 % увеличивает сроки формирования закладочного льдопородного массива в несколько раз [4].

Если при производстве работ потребуется возводить льдопородный массив с прочностью не ниже 15 МПа, то используется полностью влагонасыщенный песок, смеси со щебнем или иной крупнообломочный материал. Содержание песка в смеси должно быть не ниже 40 %. Если требуемая прочность закладочного массива не ниже 6 МПа, то применяется крупнообломочный материал, песок и их смеси. Нужно иметь в виду, что содержание воды в единице объема закладки для крупнообломочного материала — 35–40 %, песке — 15 %, оптимальной смеси — 8–10 %. Уменьшение содержания воды в закладочной смеси способствует ускорению замораживания.

Лабораторные исследования показали, что существует оптимальное соотношение мелкозернистой и крупнозернистой фракций закладочной смеси, при которой требуемая прочность закладочного массива достигается при существенном снижении связующего (в данном случае льда). Это позволяет уменьшить расход воды и ускорить проморозку закладочного массива.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДОПОРОДНОГО МАССИВА МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАМОРАЖИВАНИЯ

Для определения температурного поля закладочного льдопородного массива и горных пород вокруг подземной выработки создана двумерная математическая модель теплообмена рудничного воздуха с возводимой льдопородной закладкой и окружающим массивом горных пород. Выработка расположена горизонтально или наклонно (рис. 2). Для первой принято, что сечение имеет форму прямоугольника, в силу симметричности области рассматривается ее половина.

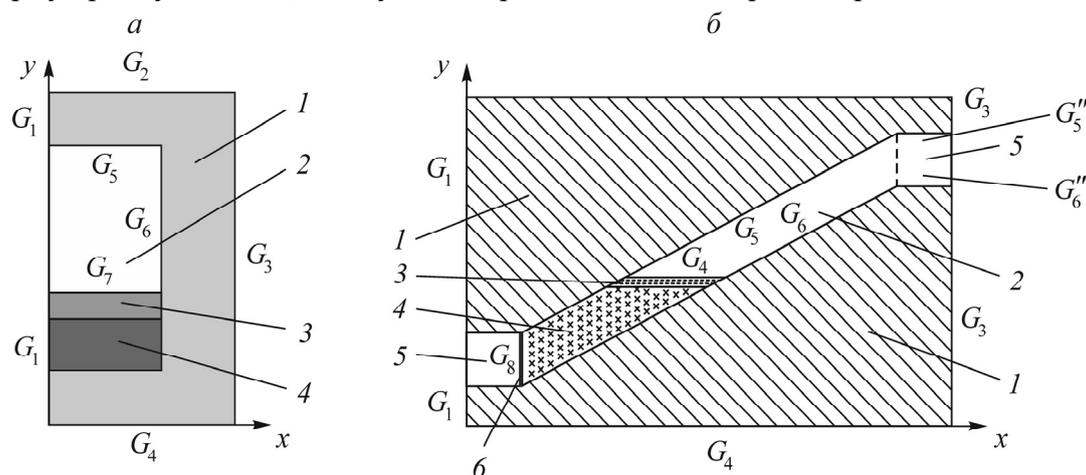


Рис. 2. Расчетная схема формирования льдопородного закладочного массива в подземной горизонтальной (а) и наклонной (б) горной выработке: 1 — массив горных пород; 2 — очистная выработка; 3 — слой замораживаемой галой закладки; 4 — мерзлая закладка; 5 — штрек; 6 — водоупорная деревянная перемышка

Приняты следующие упрощающие допущения [4, 17, 18]:

- теплообмен на поверхности слоя закладочного льдопородного массива, стенке и потолочине горной выработки с рудничным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом конвективного теплообмена;
- теплообмен на границе соприкосновения вновь укладываемого слоя и ранее уложенного закладочного льдопородного массива подчиняется условию идеального теплового контакта;
- промежуток времени, затрачиваемый на отсыпку слоя закладочного льдопородного массива, не учитывается, считается, что каждый слой появляется мгновенно в момент начала этого промежутка;
- влиянием дневной поверхности можно пренебречь, учитывая глубину заложения выработки.

Процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается уравнением

$$[C(T, x, y) + L_1 W(x, y) \rho \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right],$$

$$C(T, x, y) = \begin{cases} c_1(x, y) \rho_1(x, y), & T < T^*; \\ c_2(x, y) \rho_2(x, y), & T > T^*, \end{cases} \quad \lambda(T, x, y) = \begin{cases} \lambda_1(x, y), & T < T^*; \\ \lambda_2(x, y), & T > T^*, \end{cases} \quad (1)$$

$$x \in D_x, \quad y \in D_y, \quad t > 0,$$

где T, T^* — температура породы и фазовых переходов влаги в породе, °С; T, x, y — временная (t) и пространственные координаты (m); L_1 — скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W — влажность породы, доли ед.; ρ — плотность воды, кг/м³; 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)) для мерзлых (талых) пород; $\delta(T - T^*)$ — функция Дирака, 1/К [19].

Фазовые переходы учитываются с помощью δ -функции Дирака:

— начальное условие

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y), \quad x \in D_x, \quad y \in D_y; \quad (2)$$

— граничные условия для границ

$$G_1, G_3: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$G_2, G_4: T = T_e, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$G_5 - G_8: \lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha [T(x, y, t) - T_{air}(t)], \quad t > 0, \quad (5)$$

здесь α — коэффициент конвективного теплообмена воздуха с грунтом, Вт/(м²·К); T_e, T_{air} — естественная температура пород и температура воздуха, °С (рис. 2).

Эмпирический коэффициент конвективного теплообмена неодинаков для разных границ (максимальные значения на границе G_7 , меньшие — на G_5, G_6, G_8) и рассчитывается по формуле

$$\alpha = \begin{cases} 6.16 + 4.19\nu, & 0 < \nu \leq 5, \\ 7.56\nu^{0.78}, & 5 < \nu \leq 30, \end{cases} \quad (6)$$

где ν — скорость ветра, м/с [20].

Температура воздуха T_{air} , подаваемого по скважине или вентиляционному рукаву для промерозки талого слоя закладочного льдопородного массива, находится в прямой зависимости от температуры воздуха на поверхности и может аппроксимироваться гармонической функцией, например косинусоидой:

$$T_{air}(t) = A_a \cos \left[\frac{2\pi t}{t_0} + \varepsilon \right] + T_{0,a}, \quad t > 0, \quad (7)$$

где A_a , $T_{0,a}$ — годовая амплитуда колебаний температуры воздуха и средняя годовая температура воздуха, °С; t , $t_0 = 1$ год — время и период колебаний; ε — начальная фаза колебаний [21].

Чтобы решить двухмерную задачу теплообмена (1)–(7), использовали способ суммарной аппроксимации, сводящий исходную задачу к последовательности одномерных задач [19, 22], которая выполнялась на каждом временном слое. Для решения одномерной задачи “промерзания – протаивания” в постановке вида (1)–(7) применяли численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов.

Двухмерная область заменялась дискретной областью $W_x \times W_y$. Шаг сетки по направлению W_y задавался так, чтобы в каждый вновь отсыпaeмый слой попадало не менее 10 узлов сетки. Система разностных уравнений решалась последовательно методом простой итерации при помощи способа прогонки [22].

На основе разработанных программ для персональной электронно-вычислительной машины проведены численные эксперименты по расчету послойного намораживания льдопородной закладки в подземной горной выработке при следующих исходных данных: место расположения рудника — Оймяконский район Республики Саха (Якутия), рудник Бадран, плотность породы 2000 кг/м³, коэффициент теплопроводности талой (мерзлой) породы 1.9 (2.3) Вт/(м·К), удельная теплоемкость талой (мерзлой) породы 980 (900) Дж/(кг·К), естественная температура массива горных пород –4 °С, влажность массива горных пород 5%. Исследовались способы возведения закладочного льдопородного массива при степени увлажнения от 10 до 50%, толщине слоя от 0.2 до 0.6 м, начальной температуре слоя от +5 до 0 °С. Температура промерозки слоя льдопородного целика изменялась от –5 до –1 °С, температура воздуха, поступающего в камеру, — от –5 до –25 °С. Горизонтальная горная выработка имела высоту 3 м и ширину 5 м, для наклонной горной выработки длина очистной камеры 40 м, угол наклона 30°, высота 2 м.

Время замораживания одного слоя при его заданной толщине — основной показатель процесса формирования льдопородного массива. Время счета останавливается после укладки последнего слоя при достижении температуры закладки заданного значения (от –5 до –1 °С). Последний слой замерзает за счет аккумулированного холода в потолочине и нижних слоях закладочного массива, а также теплообмена с воздухом в верхнем штреке (для наклонной выработки).

Проведенными исследованиями на математических моделях определены основные технологические параметры возводимых льдопородных целиков способом послойного намораживания. Выявлено, что оптимальная толщина единичного слоя находится в пределах 0.4–0.6 м при расходе воды 200–400 л/м³. Приемлемые режимы вентиляции атмосферным воздухом обеспечивают высокие скорости промерозки единичного слоя льдопороды и кратчайшие сроки строительства льдопородного целика.

На рис. 3 показаны температурные изолинии в закладке и окружающем массиве горных пород в горизонтальной выработке при времени замораживания единичного слоя 3 ч, которое меньше его оптимального значения, и при оптимальном времени 6 ч. Толщина слоя 0.2 м, начальная температура 0 °С. В первом случае закладочный массив замерзает за 1062 ч, в последнюю очередь замерзает его центральная часть (рис. 3а). Это согласуется с георадиолокационными исследованиями, проведенными на руднике Бадран: в центре льдопородного целика образовался ареал из талых пород (талик), который мог возникнуть из-за несоблюдения оптимальных параметров проморозки единичного слоя [23]. При подходящем режиме замораживания закладочного массива время формирования равно 103 ч, в последнюю очередь замерзает самый верхний слой (рис. 3б).

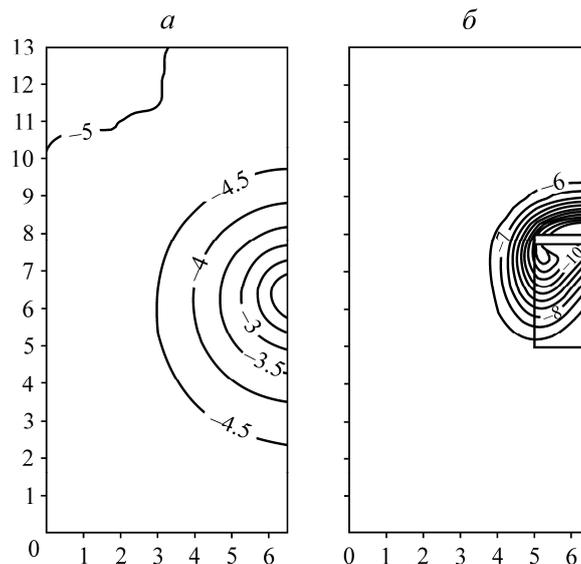


Рис. 3. Температурные изолинии в закладочных и породных массивах в горизонтальной горной выработке в конце формирования закладочного массива при времени замораживания единичного слоя 3 ч (а) и оптимальном (б)

Кривые расчета четырех вариантов возведения, иллюстрирующие продолжительность промораживания льдопородного целика в горизонтальной горной выработке в зависимости от начальной температуры слоя t_n и температуры проморозки t_m при начальном влагосодержании 25 %, представлены на рис. 4.

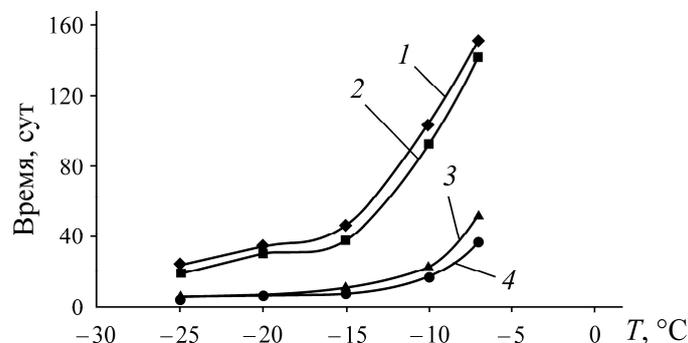


Рис. 4. Продолжительность промораживания льдопородного целика в горизонтальной горной выработке в зависимости от начальной температуры слоя и температуры проморозки слоя льдопородного целика при начальном влагосодержании 25 %: 1 — $t_n = +5$ °С, $t_m = -5$ °С; 2 — $t_n = +5$ °С, $t_m = -3$ °С; 3 — $t_n = 0$ °С, $t_m = -5$ °С; 4 — $t_n = 0$ °С, $t_m = -3$ °С

Расчеты показывают, что для эффективного промораживания единичного льдопородного слоя температура шахтного воздуха t_{air} должна быть не выше $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4). Для полного промерзания требуется в среднем 3 сут при $t_n = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и не менее 1.5 сут при $t_n = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если выполнить эти условия, полное промораживание льдопородного целика высотой 5 м до температуры $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ произойдет в течение 1.0–1.5 мес., большая часть времени затратится на проморозку последнего (верхнего) слоя за счет аккумулированного холода в потолочине очистной выработки (лавы). С целью ускорения проморозки рекомендуется проводить специальные мероприятия для аккумуляции холода (повышенного потенциала) в кровле и предпоследнем слое льдопородного целика.

На рис. 5 показаны температурные изолинии в закладке и окружающем массиве горных пород в наклонной выработке при времени замораживания единичного слоя 0.5 ч, которое меньше его оптимального значения, и при времени 2 ч. Толщина слоя 0.4 м. В первом случае замерзает закладочный массив за 381 ч, в последнюю очередь — центральная часть (рис. 5а). При оптимальном режиме замораживания закладочного массива время формирования равно 183 ч, температура закладки имеет более низкую температуру, что важно для обеспечения устойчивости выработок (рис. 5б).

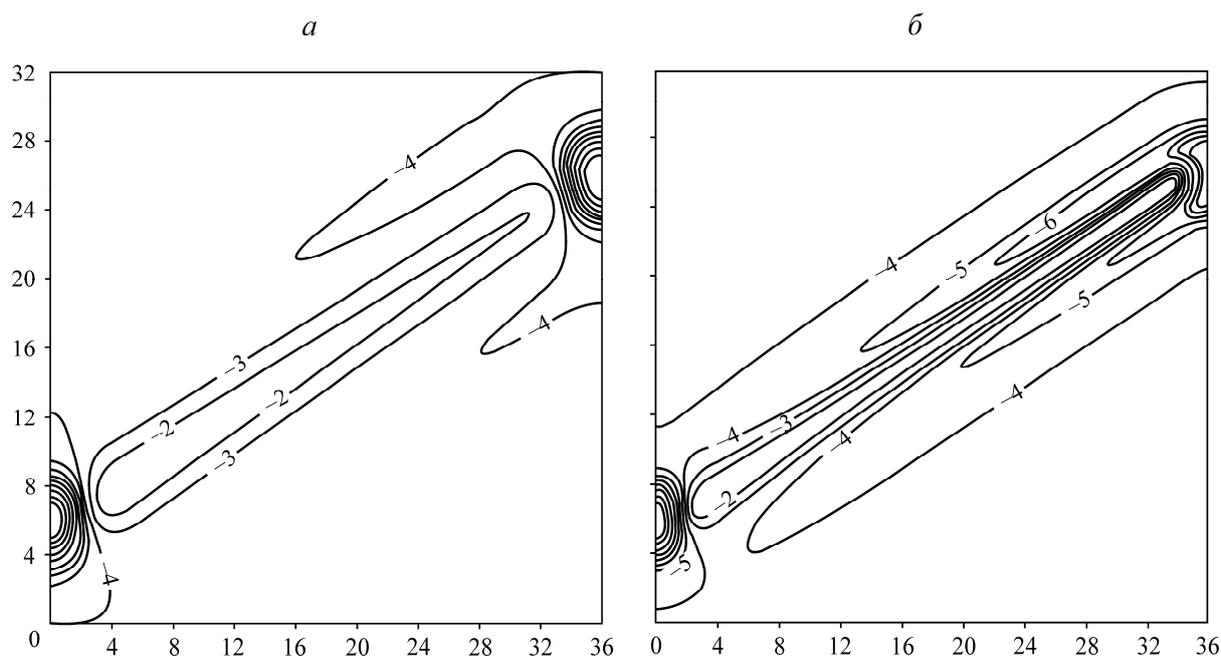


Рис. 5. Температурные изолинии в закладочных и породных массивах в конце формирования закладочного массива в наклонной выработке при времени замораживания единичного слоя 0.5 ч (а) и 2 ч (б)

Рассмотрим пример расчета параметров технологии с льдопородной закладкой на основе предложенной методики. Предположим, что закладка одного слоя осуществляется в течение смены 6–8 ч, а его замораживание — 16–18 ч. Оптимальная толщина слоя 0.4–0.5 м (рис. 5). Тогда общее время закладочных работ и набора необходимой прочности закладочного массива (замерзания) составит 12–14 сут при температуре воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, после которого можно приступить к отработке соседних камер, и 15–17 сут при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ВЫВОДЫ

Прочностные свойства льдопородного закладочного массива во многом обуславливаются такими показателями, как гранулометрический состав, влажность и начальная температура материала закладки, толщина укладываемого слоя, температура и скорость воздушной струи над слоем укладываемого материала. Определено оптимальное соотношение мелкозернистой и крупнозернистой фракций закладочной смеси, при котором требуемая прочность льдопородного закладочного массива достигается благодаря существенному снижению связующего (льда), что позволяет уменьшить расход воды и ускорить проморозку закладочного массива.

Технологии льдопородной закладки выработанного пространства могут быть рекомендованы для утилизации и захоронения высокотоксичных отходов в подземных горных выработках отработанных шахт и рудников криолитозоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подземная разработка** россыпных месторождений (1965–2001 гг.) / Сост. В. А. Шерстов. — Якутск: ИМ, 2002. — 152 с.
2. **Необутов Г. П., Петров Д. Н., Никулин Е. В.** Оценка изменения тенденций развития технологии разработки жильных месторождений криолитозоны // ГИАБ. — 2009. — № 4. — С. 14–22.
3. **Необутов Г. П., Гринев В. Г.** Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. — 104 с.
4. **Каймонов М. В., Хохолов Ю. А., Курилко А. С., Необутов Г. П.** Методика расчета послойного намораживания пород при формировании льдопородного массива в горных выработках // ГИАБ. — 2003. — № 9. — С. 47–49.
5. **Сукнев С. В.** Определение статических упругих свойств горных пород при изменении температуры // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 161–171.
6. **Левин Л. Ю., Семин М. А., Паршаков О. С.** Математическое прогнозирование толщины льдопородного ограждения при проходке стволов // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 154–161.
7. **Вялов С. С.** Реология мерзлых грунтов. — М.: Стройиздат, 2000. — 464 с.
8. **Цытович Н. А.** Механика грунтов. — М.: Высш. шк., 1973. — 280 с.
9. **Вотьяков И. Н.** Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. — Новосибирск: Наука, 1975. — 176 с.
10. **Суриков В. В.** Механика разрушения мерзлых грунтов. — Л.: Стройиздат, 1978. — 128 с.
11. **Тайбашев В. Н.** Физико-механические свойства мерзлых крупнообломочных пород // Труды ВНИИ-1. — 1973. — Т. XXXIII. — 160 с.
12. **Русило П. А.** Температурный режим крупнообломочных пород при подземной разработке многолетнемерзлых россыпей // Колыма. — 1987. — № 1. — С. 5–8.
13. **Каймонов М. В., Курилко А. С.** Подбор состава оптимальных льдопородных закладочных смесей // ГИАБ. — 2011. — Отд. вып. № 10. Горный инженер-4. Современные геотехнологии на горных предприятиях. — С. 127–132.
14. **Ельчанов Е. А., Розенбаум М. А.** Влияние изменений напряжений и деформаций на динамику температуры угольных блоков // Уголь. — 1977. — № 2. — С. 15–16.
15. **Макаров Ю. Н.** Установление полей напряжений по распределению температуры в окрестности очистных и подготовительных выработок // ФТПРПИ. — 1982. — № 5. — С. 108–112.

16. **Волохов С. С.** Механокалорический эффект в мерзлых грунтах при одноосном сжатии // Криосфера Земли. — 2016. — № 1. — С. 30–35.
17. **Хохолов Ю. А., Соловьев Д. Е.** Методика совместного расчета температурного и вентиляционного режимов нестационарной сети горных выработок криолитозоны // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 138–145.
18. **Wei Cao, Yu Sheng, Jichun Wu, Jing Li, Yaling Chou, and 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. — 711 p.
19. **Тихонов А. М., Самарский А. А.** Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
20. **Перльштейн Г. З.** Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-востоке СССР. — Новосибирск: Наука, 1979. — 304 с.
21. **Павлов А. В., Оловин Б. А.** Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей. — Новосибирск: Наука, 1974. — 182 с.
22. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
23. **Омельяненко А. В., Федорова Л. Л.** Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2006. — 136 с.

Поступила в редакцию 23/V 2019

После доработки 23/V 2019

Принята к публикации 23/IX 2019