УДК 622.253.3

Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания

М.А.СЕМИН , А.В.БОГОМЯГКОВ, Л.Ю.ЛЕВИН

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

В работе проведена серия расчетов искусственного замораживания породного массива при проходке шахтных стволов для условий строящегося калийного рудника. Численное решение получено посредством метода конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS. Получены численные зависимости толщины ледопородного ограждения от времени в фазах активного и пассивного замораживания для двух слоев породного массива с различными теплофизическими свойствами. Внешняя и внутренняя границы ледопородного ограждения рассчитывались двумя способами: по температуре фактического замерзания поровой воды и по температуре -8°C , при которой проводились лабораторные измерения прочности замораживаемых горных пород. Рассмотрен нормальный режим работы замораживающей станции, а также аварийный режим, заключающийся в выходе из строя одной из замораживающих колонок. Исследовалась зависимость уменьшения толщины ледопородного ограждения в фазе пассивного замораживания от длительности фазы активного замораживания. Определено, что в аварийном режиме работы системы замораживания толщина ледопородного ограждения по изотерме -8°C может уменьшаться на величину более 1,5 м. При этом толщина ледопородного ограждения по изотерме фактического замерзания воды практически всегда сохраняет положительную динамику. Показано, что при анализе толщины ледопородного ограждения по изотерме фактического замерзания поровой воды не представляется возможным оценить опасность аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя замораживающих колонок.

Ключевые слова: ледопородное ограждение; задача Стефана; математическое моделирование; искусственное замораживание пород; технологические параметры; система замораживания; замораживающая колонка

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.

Как цитировать эту статью: Семин М.А. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания / М.А.Семин, А.В.Богомягков, Л.Ю.Левин // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 319-328. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.319

Введение. Одним из наиболее распространенных способов строительства шахтных стволов в сложных гидрогеологических и геологических условиях является искусственное замораживание горных пород [15, 19]. Формирующееся в результате искусственного замораживания ледопородное ограждение (ЛПО) является временной водонепроницаемой завесой, препятствующей проникновению подземных вод в строящуюся горную выработку [10, 11]. Эффективность ЛПО в конечном счете зависит от его толщины и сплошности по периметру и глубине контура замораживающих скважин (рис.1).

Фактическая толщина ЛПО прогнозируется с помощью как теоретических [14, 15, 17], так и экспериментальных методов [13, 18]. Также в настоящее время применяются комплексные методы исследования состояния ЛПО, основанные на совместном применении теоретических и экспериментальных методов с их взаимным уточнением [5, 16]. Важным вопросом при определении толщины ЛПО в ходе замораживания породного массива является выбор изотерм, соответствующих положениям внутренней и внешней границ ЛПО. На практике применяется два способа выбора таких граничных изотерм для определения толщины ЛПО: по температуре фактического замерзания поровой воды; по температуре, при которой проводились лабораторные измерения прочности замораживаемых горных пород.

Здесь важным обстоятельством является то, что в проектах по замораживанию горных пород прочностной расчет необходимой толщины ЛПО по фактору

Рис.1. Схематичный вид ЛПО

1 – зона охлаждения; 2 – зона льда; 3 – шахтный ствол;
4 – замораживающие колонки; 5 – внутренний и внешний
фронты фазового перехода (границы ЛПО)

суммарного горного и гидростатического давления производится с предположением об однородном распределении температуры во всем объеме ЛПО [1, 12]. Эта температура, как правило, ниже температуры фактического замерзания поровой воды в массиве горных пород.

В рамках первого способа выбора граничных изотерм предполагается, что средняя по объему температура ЛПО приблизительно равна температуре, для которой делался расчет прочности горных пород. При этом вблизи границ ЛПО температура замороженных горных пород оказывается выше температуры расчета прочности горных пород. В рамках второго способа температура на границах ЛПО равна температуре расчета прочности горных пород. При этом средняя по объему температура ЛПО ниже температуры, по которой производился расчет прочности горных пород. В этом смысле первый способ может приводить к занижению фактических прочностных характеристик ЛПО, а второй – к завышению. Более глубокий анализ преимуществ и недостатков двух указанных способов выбора граничных изотерм ЛПО должен проводиться посредством сопряженных теплофизического и геомеханического расчетов, что выходит за пределы описываемого в настоящей работе теплофизического исследования.

На основании описанного в литературе опыта по искусственному замораживанию горных пород при проходке горных выработок [2, 10, 11] можно принять, что оба способа выбора граничных изотерм ЛПО уместны в фазе активного замораживания породного массива, когда температура замораживающего рассола (хладоносителя) минимальна, а его расход максимален. Однако при переходе на пассивный режим замораживания, которому соответствуют более высокие температуры рассола и/или более низкие расходы рассола, уместность указанных двух способов неочевидна. Это связано в первую очередь с тем, что при переходе на пассивный режим замораживания поле температур вблизи замораживающих колонок может сильно меняться [9]. В свою очередь, это может приводить к локальному уменьшению толщины ЛПО до значений ниже требуемых по прочности.

Еще больше вопросов вызывает уместность указанных выше способов в случае возникновения аварийных ситуаций при работе систем искусственного замораживания. Аварийный режим может быть связан, к примеру, с выходом из строя одной или нескольких замораживающих колонок [4, 8]. В этом случае температурное поле замораживаемого породного массива в окрестности поврежденных замораживающих колонок также может быть подвержено сильному изменению.

В российской и зарубежной литературе по горной теплофизике не исследовался вопрос уменьшения толщины ЛПО, рассчитанной по различным изотермам, при переходе на пассивный режим замораживания, в случае возникновения аварийных ситуаций при работе системы искусственного замораживания. При этом данный вопрос является актуальным для выполнения корректных теплофизических расчетов замораживания породного массива и формирования ЛПО.

Целью настоящего исследования является теоретический анализ динамики толщины ЛПО, рассчитанной по различным изотермам, при переходе с активного на пассивный режимы замораживания. Особое внимание в работе уделено анализу толщины ЛПО при возникновении аварийной ситуации, связанной с выходом из строя замораживающей колонки.

Математическая постановка задачи. В работе рассматривался горизонтальный слой породного массива. Для проведения теоретического анализа теплопереноса в слое породного массива при его искусственном замораживании решалась двумерная нестационарная задача теплопроводности с движущейся границей фазового перехода. В модели породного массива учитывались следующие физические процессы, влияющие на распределение теплоты в нем: фазовый переход «вода-лед», кондуктивный теплоперенос (теплопроводность) в породном массиве, теплообмен между породным массивом и циркулирующим в колонках хладоносителем.

При постановке математической задачи приняты следующие допущения:

- 1) породный массив имеет изотропные и однородные теплофизические свойства в зонах льда и охлаждения;
- 2) вертикальный теплоперенос пренебрежимо мал по сравнению с горизонтальным;
- 3) температура рассола в замораживающих колонках постоянна;
- 4) замораживающие колонки равноудалены и ориентированы вертикально, отклонения положений колонок от идеально вертикального проектного направления не рассматриваются.

Второе допущение применимо только в случае, если рассматриваемый слой породного массива имеет достаточно большую мощность (более 10 м), а временной интервал моделирования не очень велик (менее 200 сут).

С учетом третьего и четвертого допущений, в задаче появляется вращательная симметрия. Поэтому достаточно рассмотреть сектор породного массива, ограниченный двумя главными плоскостями ЛПО [11]. На рис.2 представлена упрощенная геометрическая модель замораживаемого слоя породного массива, которая использовалась для проведения численных расчетов.

В геометрической модели (рис.2) граничная зона I представляет собой внутреннюю границу расчетной области. Данная зона введена для исключения острого угла из модели и обеспечения устойчивости численного решения. Зона I по возможности должна быть как можно сильнее смещена к оси вращательной симметрии.

Математическая постановка задачи теплопроводности с движущейся границей фазового перехода (или задачи Стефана) в энтальпийном виде записывается следующим образом:

Рис.2. Геометрическая модель замораживаемого породного массива: S – зоны симметрии; B – стенки замораживающих колонок; V – внешняя граница расчетной области, соответствующая не потревоженному породному массиву; I – внутренняя граница расчетной области (теплоизоляция)

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]; \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{lq} (1 - \varphi_{ice}) + \lambda_{sd} \varphi_{ice}, \quad (2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho_{lq} c_{lq} (T - T_{lq}) + \rho_w n L, & T_{lq} \leq T \\ \rho_w n L (1 - \varphi_{ice}), & T_{sd} \leq T < T_{lq}; \\ \rho_{sd} c_{sd} (T - T_{sd}), & T < T_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n_\lambda} - \alpha (T_{fb}(t) - T) \right]_{\Omega_{fb}} = 0; \quad (4)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0; \quad (5)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (6)$$

где H – удельная энтальпия обводненного породного массива, Дж/м³; x, y – физические координаты, м; t – физическое время, с; $\lambda_{lq}, \lambda_{sd}$ – теплопроводности массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Вт/(м·°C); c_{lq}, c_{sd} – удельные теплоемкости массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°C); ρ_{lq}, ρ_{sd} – плотности массива в зонах охлаждения и льда соответственно, кг/м³; T_{lq} – температура начала кристаллизации поровой воды (температура ликвидуса), °C; T_{sd} – температура начала плавления порового льда (температура солидуса), °C; φ_{ice} – объемная доля льда в порах породного массива, м³/м³; L – удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг; n – пористость массива; ρ_w – плотность поровой воды, кг/м³; $T_{fb}(t)$ – температура стенок замораживающей скважины, °C; T_0 – температура не потревоженного породного массива на удалении от контура замораживания, °C; α – коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающими

Рис.3. Кусочно-линейная функция удельной энтальпии обводненного породного массива для двух слоев горных пород
1 – мел; 2 – глина

скважинами, Вт/(м²·°C); $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fbi}$ – границы со всеми замораживающими скважинами $i = 1, \dots, N$; Ω_{out} – внешняя граница области моделирования, n_λ – координата вдоль нормали к границе Ω_{fb} , м.

Учет фазовых превращений поровой воды в модели осуществляется посредством задания функции удельной энтальпии $H(T)$ (3). Скачок этой функции в окрестности температур фазового перехода определяется величиной скрытой теплоты фазового перехода в единице объема обводненного породного массива. Типовой кусочно-линейный вид функции удельной энтальпии $H(T)$, использованный в настоящей работе для численных расчетов, представлен на рис.3.

Расчет коэффициента теплоотдачи между породным массивом и замораживающим рассолом в (4) определяется по формуле для переходного режима течения рассола [7]:

$$\alpha = 0,11(\text{Re} - 2120)^{0,62} \frac{\lambda_c}{d} \quad \text{при} \quad 2200 \leq \text{Re} < 10^4; \quad (7)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_c V_c \Delta}{\eta_c}, \quad (8)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, м; Δ – характерный поперечный размер проточной области рассола, обменивающегося теплотой с породным массивом, м; λ_c – теплопроводность рассола, Вт/(м·°C); ρ_c – плотность рассола, кг/м³; V_c – средняя по сечению скорость движения рассола, м/с; η_c – динамическая вязкость рассола, Па·с.

Конструктивно замораживающие колонки выполняются из двух труб – наружной замораживающей и внутренней питающей. Замораживающий рассол сначала движется вниз по внутренней проточной области, а затем вверх по внешней проточной области между наружной и внутренней трубами. Соотношение поперечных площадей внешней и внутренней проточных областей для упрощения расчета можно принять равным 1. В этом случае характерный поперечный размер проточной области рассола $\Delta = d/\sqrt{2}$.

Объемная доля льда в порах породного массива определяется следующим образом:

$$\varphi_{ice}(T) = \begin{cases} 1, & T < T_{sd} \\ (T_{lq} - T)/(T_{lq} - T_{sd}), & T_{sd} \leq T < T_{lq} \\ 0, & T_{lq} \leq T \end{cases} \quad (9)$$

Аварийный режим работы системы замораживания моделируется посредством отключения (выхода из строя) одной из замораживающих колонок в момент перехода на пассивный режим замораживания. Отключение моделируется посредством задания $\alpha = 0$ в момент перехода на пассивный режим замораживания.

Такой выбор момента появления аварийного режима работы системы обусловлен следующими соображениями. Во-первых, возникновение неисправностей в системе замораживания представляется наиболее вероятным в переходных режимах работы системы. Во-вторых, в этом случае удастся провести наиболее информативную и понятную оценку уменьшения толщины ЛПО, так как сравнение будет производиться с проектной величиной толщины ЛПО, достигнутой в фазе активного замораживания в нормальном режиме работы всех замораживающих колонок.

Численное моделирование. Численное решение задачи о формировании ЛПО осуществляется с помощью метода конечных элементов в модуле Transient Thermal программного комплекса ANSYS. В качестве входных данных для численного расчета использовались исходные данные для проекта по замораживанию породного массива для строящихся стволов одного калийного рудника в республике Беларусь.

Исследовались два слоя горных пород: наименее теплопроводный (слой мела) и наиболее теплопроводный (слой глины) в рассматриваемом интервале замораживания пород (0-275 м). Основные теплофизические свойства двух рассматриваемых слоев горных пород представлены в табл.1:

Таблица 1

Теплофизические параметры исследуемых слоев горных пород

Слой	λ_{sd} , Вт/(м·°С)	λ_{lq} , Вт/(м·°С)	C_{sd} , Дж/(кг·°С)	C_{lq} , Дж/(кг·°С)	ρ_{sd} , кг/м ³	ρ_{lq} , кг/м ³	n
Мел	2,46	1,67	1164	1720	1870	1870	0,305
Глина	4,30	2,64	900	1712	1840	1840	0,158

Принималось, что в фазу активного замораживания по колонкам подается замораживающий рассол с температурой -35°C . При переходе на пассивный режим замораживания температура рассола в течение 5 сут равномерно поднимается до -20°C , расход рассола постоянен и принимается равным $240\text{ м}^3/\text{ч}$.

Толщина ЛПО определялась двумя способами – по фактической температуре T_{sd} полного замерзания воды в поровом пространстве массива и по изотерме $T_d = -8^\circ\text{C}$, при которой измерялась проектная прочность породы. Фактическая температура замерзания поровой воды для слоя глины составляет $T_{sd} = -0,9^\circ\text{C}$, в то время как для слоя мела $T_{sd} = -0,58^\circ\text{C}$.

Радиус внешней границы расчетной области принимался равным 40 м, в то время как радиус внутренней границы 0,25 м. Радиус контура замораживающих колонок составлял 8 м. Внешний радиус замораживающей колонки равен 0,073 м, а внутренний – 0,068 м. Расстояние между центрами соседних замораживающих колонок 1,2 м.

Переход на пассивный режим замораживания варьируется в интервале 12,5-100 сут с шагом 12,5 сут.

На рис.4 представлены полученные в результате численного моделирования зависимости толщины E ледопородного ограждения от времени. Численные зависимости представлены для двух слоев (мел и глина), двух режимов работы (нормальный и аварийный), двух способов определения толщины ЛПО (по изотермам T_{sd} и T_d). На рис.4, а, в переход в аварийный режим наступает спустя 50 сут, в то время как на рис.4, б, з – спустя 100 сут с момента начала замораживания.

Замораживание мела происходит существенно медленнее по сравнению с глиной (рис.4). Это обусловлено меньшей теплопроводностью мела и большим содержанием воды в нем. Отличия между графиками толщин ЛПО $E(t)$ в фазе активного и пассивного замораживания, а также в нормальном и аварийном режимах работы замораживающей станции наиболее существенны для случая расчета толщины ЛПО по изотерме $T_d = -8^\circ\text{C}$. Это связано с тем, что данная изотерма расположена ближе к контуру замораживающих колонок, поэтому изменение режима работы колонок оказывает на нее более сильное влияние, чем на более удаленную изотерму T_{sd} . Также при изменении режима работы колонок изменение температуры вблизи границы фактического фазового перехода поровой воды (т.е. вблизи изотермы T_{sd}) происходит медленнее вследствие дополнительной инерционности поля температур в этой зоне, связанной с длительностью процесса фазового перехода (которая определяется скрытой теплотой фазового перехода и содержанием воды в породе).

Инерционность процесса фазового перехода может быть легко продемонстрирована посредством записи уравнения движения фронта фазового перехода, которое для одномерной радиальной задачи Стефана [3, 6] имеет вид:

$$\rho_w n L \frac{dR(t)}{dt} = q_{sd} - q_{lq}, \quad (10)$$

Рис.4. Толщина ЛПО по изотермам T_{sd} и T_d в зависимости от времени для нормального и аварийного режимов работы системы замораживания: а – мел, 50 суток активного замораживания; б – мел, 100 суток активного замораживания; в – глина, 50 суток активного замораживания; г – глина, 100 суток активного замораживания

где $R(t)$ – радиальная координата фронта фазового перехода, м; q_{lq} – тепловой поток из зоны охлаждения, Вт/м²; q_{sd} – тепловой поток в зону льда, Вт/м².

Из рис.4 можно заключить, что для всех слоев и всех режимов работы системы замораживания при переходе в фазу пассивного замораживания наблюдается уменьшение толщины ЛПО до значений ниже требуемых по проекту. При более раннем переходе в пассивный режим замораживания (50 суток) уменьшение толщины ЛПО проявляется существенно, чем в случае более позднего перехода (100 суток). Это объясняется тем, что за 100 дней активного замораживания массив успевает охладиться до более низких температур и на большее расстояние, чем за 50 дней, вследствие чего уменьшаются теплопритоки, приходящие из зоны охлаждения к фронту фазового перехода. В аварийном режиме работы системы замораживания уменьшение толщины ЛПО по изотерме $T_{sd} = -8^\circ\text{C}$ проявляется наиболее существенно.

Анализ уменьшения толщины ЛПО. Информативным параметром, позволяющим провести анализ уменьшения толщины ЛПО в фазе пассивного замораживания и аварийном режиме работы системы, является максимальное уменьшение толщины ЛПО:

$$\Delta E = \max(0; E_A - E_{\Pi}), \quad (11)$$

где E_A – проектная толщина ЛПО, достигнутая к концу фазы активного замораживания, м; E_{II} – минимальная толщина ЛПО в фазе пассивного замораживания, м. В табл.2 представлены величины толщин ЛПО и их максимального уменьшения для двух рассматриваемых слоев по изотерме -8°C .

Таблица 2

Толщины ЛПО (-8°C) в фазах активного и пассивного замораживания и их максимальные изменения

Время	Мел			Глина		
	E_A , м	E_{II} , м	ΔE , м	E_A , м	E_{II} , м	ΔE , м
50 сутки	2,21	0,63	1,58	5,11	4,81	0,30
100 сутки	4,35	4,02	0,33	9,15	9,21	0,06

На рис.5 представлена численная зависимость ΔE по изотерме -8°C от времени активного замораживания породного массива для аварийного режима работы системы замораживания. График для нормального режима работы системы замораживания не приводится, так как для него ΔE практически всюду равна нулю: величина отлична ΔE от нуля лишь в малом временном интервале от 35 до 50 суток и не превышает величины 0,15 м.

Из рисунка видно, что в аварийном режиме работы системы величина ΔE является сложной немонотонной функцией времени активного замораживания. Более того, для двух рассматриваемых в работе слоев горных пород эта функция имеет существенно различный вид.

Кривая роста ΔE в промежутке от нуля до первого локального максимума соответствует ситуации, при которой выход из строя замораживающей колонки приводит к уменьшению толщины ЛПО по изотерме -8°C до нуля. При дальнейшем увеличении времени активного замораживания функция $\Delta E(t)$ для мела монотонно убывает, стремясь к нулевому значению. Уменьшение $\Delta E(t)$ в этом случае связано с тем, что чем больше время активного замораживания, тем сильнее массив успевает промерзнуть в зоне охлаждения и тем меньше будет спад толщины ЛПО в фазе пассивного замораживания.

Кривая $\Delta E(t)$ для глины убывает только до момента времени 37,5 сут, после чего убывание сменяется возрастанием. Такое поведение кривой $\Delta E(t)$ для глины связано с различной динамикой внутреннего и внешнего фронтов фазового перехода (рис.6). На промежутке 12,5-37,5 сут уменьшение $\Delta E(t)$ для глины связано с тем, что внутренний фронт ЛПО продвигается вглубь массива быстрее, чем происходит отступление внешнего фронта ЛПО к контуру замораживающих скважин. Далее скорость отступления внешнего фронта ЛПО начинает превышать скорость продвижения внутреннего фронта ЛПО, вследствие чего на временном интервале 37,5-62,5 сут функция $\Delta E(t)$ возрастает. По прошествии 62,5 сут отступление внешнего фронта ЛПО снова становится меньше, чем продвижение внутреннего фронта ЛПО, поэтому $\Delta E(t)$ уменьшается и стремится к нулю.

В результате анализа рис.5 можно сделать вывод, что уменьшение толщины ЛПО по изотерме -8°C в фазе пассивного замораживания в аварийном режиме работы, связанном с выходом из строя одной из замораживающих колонок, существенно выше нуля, т.е. в течение некоторого промежутка времени фактические толщины ЛПО будут ниже требуемых по проекту значений, что является недопустимым. При анализе толщины ЛПО по изотермам фактического замораживания пород, «поймать»

Рис.5. Максимальное уменьшение толщин ЛПО ΔE при переходе на пассивное замораживание в аварийном режиме (отключение одной замораживающей колонки)
1 – мел; 2 – глина

Рис.6. Распределение температуры вдоль главной плоскости ЛПО во время перехода на пассивный режим замораживания (синяя кривая) и в момент достижения минимальной толщины ЛПО (красная кривая): а – мел, б – глина, 37,5 сут активного замораживания; в – мел; г – глина, 62,5 сут активного замораживания; д – мел; е – глина, 87,5 сут активного замораживания

такое уменьшение толщины ЛПО в фазе пассивного замораживания невозможно. При этом, на практике может быть такая ситуация, когда толщина ЛПО по изотерме T_{sd} будет продолжать увеличиваться, а толщина ЛПО по изотерме $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшится до нуля.

В данном случае целесообразно разрабатывать методы и мероприятия, направленные на исключение ситуации, когда фактическая толщина ЛПО будет ниже проектной. Одним из таких мероприятий может быть временное изменение параметров замораживающего рассола в фазе пассивного замораживания (уменьшение температуры, увеличение расхода). Помимо этого, возможным методом повышения надежности системы искусственного замораживания в условиях аварийного отключения замораживающих колонок может быть регулирование расстояния между соседними замораживающими колонками на этапе разработки проекта по замораживанию по-

родного массива. Как отмечено в [8], толщина ЛПО на всех фазах замораживания сильно зависит от расстояния между замораживающими колонками.

Заключение. В работе проведен теоретический анализ динамики ледопородного ограждения (ЛПО) в фазе пассивного замораживания в нормальном и аварийном режимах работы системы замораживания и рассмотрены горно-геологические условия строящихся стволов калийного рудника в Республике Беларусь. Основные результаты работы:

1. При переходе в фазу пассивного замораживания горных пород динамика толщины ЛПО значительно зависит от того, каким способом определяются границы ЛПО: по изотерме фактического замерзания поровой воды или по изотерме, соответствующей лабораторным измерениям прочности замораживаемых горных пород (принята равной -8°C). Если толщина ЛПО, рассчитанная по изотерме фактического замерзания воды, сохраняет свою положительную динамику, то толщина ЛПО, рассчитанная по изотерме -8°C , может существенно уменьшаться.

2. Существенное уменьшение толщины ЛПО в фазе пассивного замораживания происходит при аварийном режиме работы системы, связанном с выходом из строя одной из замораживающих колонок. В этом случае для рассматриваемых горно-геологических условий толщина ЛПО по изотерме -8°C может уменьшаться до величин более 1,5 м. При этом толщина ЛПО по изотерме фактического замерзания воды практически всегда сохраняет положительную динамику.

3. При анализе толщины ЛПО по изотерме фактического замерзания поровой воды не представляется возможным оценить опасность аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя замораживающих колонок, так как эта толщина ЛПО сохраняет положительную динамику. Важным обстоятельством является то, что при расчете толщины ЛПО по изотерме фактического замерзания поровой воды подразумевается, что средняя температура всего замороженного массива, составляющего ЛПО, должна быть около -8°C . Однако данное условие может нарушаться при выходе из строя замораживающих колонок. Поэтому более надежным является расчет толщины ЛПО по температуре, при которой проводились лабораторные измерения прочности замораживаемых горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вязов С.С. Реология мерзлых грунтов. М. Стройиздат, 2000. 463 с.
2. Дорман Я.А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. М.: Транспорт. 1981. 302 с.
3. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г.Карслоу, Д.Егер. М.: Наука, 1964. 488 с.
4. Левин Л.Ю. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов / Л.Ю.Левин, Е.В.Колесов, М.А.Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 257-265.
5. Левин Л.Ю. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, А.В.Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 1. С. 172-184. DOI: 10.15372/FTPRPI20190119
6. Левин Л.Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, О.С.Паршаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 5. С. 154-161. DOI: 10.15372/FTPRPI20170517
7. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
8. Паланков И.М. Анализ причин возникновения аварийных ситуаций при проходке вертикальных стволов способом искусственного замораживания грунтов // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 2. С. 49-53.
9. Пугин А.В. Оптимизация режима пассивного замораживания при проходке шахтных стволов под защитой ледопородных ограждений // Горное эхо. 2019. № 1. С. 92-96. DOI: 10.7242/ECHO.2019.1.20
10. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства / И.Д.Насонов, В.А.Федюкин, М.Н.Шуплик, В.И.Ресин. М.: Недра, 1992. 351 с.
11. Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. М.: Недра. 1974. 280 с.
12. Experimental study on mechanical properties of Cretaceous red sandstone under different freezing temperatures and confining pressures / B.Liu, Y.Ma, H.Sheng, H.Deng, Q.Han, Y.Cao // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2019. Vol. 38. Iss. 3. P. 455-466. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0780
13. Hentrich N. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project / N.Hentrich, J.Franz // Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology. International Mining Forum. Leiden: CRC Press/Balkema. 2015. P. 89-104.
14. Intermittent Freezing Concept for Energy Saving in Artificial Ground Freezing Systems / M.A.Alzoubi, A.P.Sasmito, A.Madiseh, F.P.Hassani // Energy Procedia. 2017. Vol. 142. P. 3920-3925. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.297

15. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata / Z.Yao, H.Cai, W.Xue, X.Wang, Z.Wang // AIP Advances. 2019. Vol. 9. № 2. 025209. DOI:10.1063/1.5085806
16. Pimentel E. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling / E.Pimentel, S.Papakonstantinou, G.Anagnostou // Tunnelling and Underground Space Technology. 2012. Vol. 28. P. 57-69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005
17. Rouabhi A. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid / A.Rouabhi, E.Jahangir, H.Tounsi // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 120. P. 523-533. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.065
18. Sheng T.-B. Measurement and engineering application of temperature field multiple-ring hole frozen wall in extra-thick clay strata / T.-B.Sheng, S.-Y.Wei // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 34. № 8. P. 1516-1521.
19. Shcherban P. Sinking of vertical mine openings in unstable, water-bearing strata using mobile hydraulic complex / P.Shcherban, S.Razumovich, A.Eliseev // Proceedings of International Conference on Management – Economics – Ethics – Technology (MEET 2017), 21-22 September 2017, Zarbrze, Poland. 2017. P. 97-106.

Авторы: **М.А.Семин**, канд. техн. наук, научный сотрудник, seminma@outlook.com (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), **А.В.Богомягков**, младший научный сотрудник, bavaerolog@gmail.com (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), **Л.Ю.Левин**, д-р техн. наук, зав. отделом, aerolog.lev@gmail.com (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 28.10.2019.

Статья принята к публикации 18.11.2019.