

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЛЕДОПОРОДНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРУ РАССОЛА В ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЙ КОЛОНКЕ

М.А. Семин¹, А.В. Богомяков¹, А.В. Пугин¹

¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: seminma@inbox.ru

Аннотация: Одним из косвенных признаков достижения требуемой толщины и сплошности ледопородного ограждения (ЛПО) при рассольной схеме замораживания пород и грунтов является получение разности температур 1–2 °С охлаждающей жидкости (рассола) на прямой и обратной линиях рассолопровода. Однако, когда в замораживаемом массиве выражены массообменные процессы, требуемая разница температур может быть никогда не достигнута. Так, например, при достаточно сильном фильтрационном течении подземных вод на определенных глубинных отметках, между соседними замораживающими колонками могут оставаться зоны незамерзшей породы, через которые будет фильтроваться вода, а сплошное ЛПО будет формироваться в течение более длительного промежутка времени, или вовсе не сформируется. Своевременное обнаружение таких локальных нарушений сплошности ЛПО, вызванных незамерзшими фильтрационными каналами между отдельными замораживающими колонками, важно с точки зрения обеспечения безопасности дальнейшей проходки ствола под защитой ЛПО. При этом с помощью используемых сегодня на практике методов мониторинга состояния ЛПО определить локальные нарушения сплошности ЛПО сложно. В настоящей статье проведен теоретический анализ одного из возможных методов косвенного определения нарушений сплошности ЛПО по разности между температурами обратного потока рассола, измеряемыми на выходе из различных замораживающих колонок. Сделана оценка величины теплового потока, который необходимо сообщить замораживающей колонке для того, чтобы температурный «отклик» рассола на выходе из колонки был больше заданной величины чувствительности датчика температур. Данная оценка проводилась для реального строящегося калийного рудника в республике Беларусь.

Ключевые слова: искусственное замораживание пород, ледопородное ограждение, тепломассоперенос, фильтрация грунтовых вод, математическое моделирование.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Пермского края в рамках соглашения № С-26/563.

Для цитирования: Семин М. А., Богомяков А. В., Пугин А. В. Анализ влияния фильтрационного потока через ледопородное ограждение на температуру рассола в замораживающей колонке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 60–77. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_60.

Effect of seepage flow through frozen wall on brine temperature in freeze pipes

M.A. Semin¹, A.V. Bogomyagkov¹, A.V. Pugin¹

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: seminma@inbox.ru

Abstract: One of the indirect signs of the required thickness and integrity gained by the frozen wall in brine freezing of rocks and soils is the temperature difference of 1–2 °C between the cooling agent (brine) in the direct and return brine pipes. At the same time, intense mass exchange processes in rock mass can make the required temperature difference unattainable. For instance, at sufficiently heavy seepage flow of groundwater at certain depth levels, some rock zones may remain unfrozen between the neighbor freeze pipes. Water will seep through these zones, and generation of a solid frozen wall will take much longer time or will never happen at all. Prompt detection of such local discontinuities caused in the frozen wall by unfrozen seepage zones between some freeze pipes is critical from the viewpoint of safety of further sinking under shelter of the frozen wall. In the meanwhile, the current practices of frozen wall monitoring are at loss when detecting local discontinuities. This article offers a theoretical examination of a possible method for the indirect detection of discontinuities in frozen walls by the return brine temperatures measured at the outlets of different freeze pipes. The heat flow required to be transferred to a freeze pipe to make the brine temperature ‘response’ at the freeze pipe outlet exceed the preset sensitivity of the temperature sensor is evaluated. The evaluation was performed as a case-study of an actual potash mine under construction in Belarus.

Key words: artificial ground freezing, frozen wall, heat and mass transfer, groundwater seepage, mathematical modeling.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education in the Perm Krai, Agreement No. S-26/563.

For citation: Semin M. A., Bogomyagkov A. V., Pugin A. V. Effect of seepage flow through frozen wall on brine temperature in freeze pipes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):60-77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_60.

Введение

Строительство стволов шахт и тоннелей метрополитенов в условиях сложной гидрогеологии осуществляется с использованием специальных способов. Наиболее распространенным специальным способом при строительстве стволов калийных рудников является искусственное замораживание пород [1, 2]. Целью данного способа является формирование ледопородного ограждения (ЛПО) необходимой толщины, достаточ-

ной для восприятия давления бокового распора со стороны окружающих незамерзших горных пород и гидростатического давления от содержащейся в них поровой воды, для предотвращения проникновения подземных вод в строящуюся горную выработку [3, 4]. После достижения требуемой по условиям прочности и ползучести толщины ЛПО во всем интервале глубин замораживания пород начинается строительство шахтного ствола.

Оценка достижения требуемой толщины ЛПО производится как с помощью экспериментальных [5–7], так и теоретических методов [8–12]. В ряде случаев эти методы применяются совместно, что позволяет осуществить их взаимное уточнение [13–15]. Кроме того, согласно инструкции [16], требуемая толщина ЛПО может считаться достигнутой только при выполнении ряда условий:

- достижение проектной температуры на различных высотных отметках термометрических скважин, находящихся в области замороженных горных пород;
- подъем уровня воды в гидрогеологических скважинах, располагающихся внутри контура ЛПО, по сравнению с уровнем воды в гидрогеологической скважине, находящейся вне контура;
- штатная работа всех замораживающих колонок в процессе замораживания горных пород;
- получение разности температур охлаждающей жидкости на прямой и обратной линиях рассолопровода 1–2 °С.

Условие разности температуры на прямой и обратной линиях рассолопровода относится к случаю рассольной схемы замораживания, когда по замораживающим колонкам циркулирует рассол с поддерживаемым расходом и отрицательной температурой. Данное условие часто используется на рудниках как косвенный метод оценки сплошности ЛПО [16]. Данный метод хорошо работает в наиболее простом случае, когда формирование ЛПО происходит только за счет процессов теплообмена и фазового перехода влаги, а глубина замораживающих колонок не превышает 250 м.

В более сложных ситуациях, когда в замораживаемом породном массиве выражены массообменные процессы, требуемая разница температур охлаждающей жидкости на прямой и обратной

линиях рассолопровода может быть недостижимой в принципе. Так, при наличии сильно выраженного фильтрационного течения подземных вод в определенном интервале глубин замораживания между соседними замораживающими колонками могут оставаться зоны незамороженных пород, через которые будет фильтроваться незамерзшая поровая вода (такие локальные нарушения сплошности ЛПО далее в статье будут называться «окнами»). Через эти зоны подземная вода может проникать во внутреннюю область контура замораживания и из внутренней области вовне контура замораживания [17, 18]. Это приведет к тому, что смыкание ледопородных цилиндров и формирование сплошного ЛПО заданной толщины будет происходить дольше или не произойдет в принципе при заданных параметрах системы замораживания, определенных без учета фактора фильтрации поровых вод [19].

Определение «окон» в ЛПО с помощью контрольно-термических (КТ) скважин, как правило, невозможно по причине того, что количество КТ скважин обычно не превышает 3–4, а зона их пространственной чувствительности составляет всего несколько метров [20]. А потому представляет интерес вопрос о влиянии «окна» в ЛПО на температуру рассола, измеряемую на прямой и обратной линиях рассолопровода при работе системы искусственного замораживания. Измерение температуры рассола на обратной линии рассолопровода производится обычно для каждой замораживающей колонки в отдельности, что дает возможность проводить анализ нагрева рассола при его прохождении по питающей трубе к башмаку колонки и обратно к оголовку колонки по коаксиальному проточному сечению. Поскольку при наиболее распространенных глубинах замораживания (до 250 м) наибольшее изменение температуры рассола проис-

ходит при прохождении обратной линии рассолопровода [3], возникает вопрос о том, можно ли использовать измеренные температуры обратного потока рассола в замораживающей колонке для обнаружения потенциальных «окон» в ЛПО. Исследованию этого вопроса посвящена настоящая статья. Анализ проводился на основании экспериментальных данных, полученных в процессе контроля формирования ЛПО вокруг строившихся вертикальных шахтных стволов калийного рудника в республике Беларусь.

В литературе представлен ряд исследований нагрева рассола, движущегося по замораживающей колонке [3, 13, 21, 22]. Однако в большинстве работ данный вопрос исследуется применительно к случаю штатного режима работы замораживающих станций, без учета наличия «окон» в формирующемся ЛПО [3, 21]. В этих работах исследуются вопросы выбора оптимальной скорости рассола, исходя из теплосъема замораживающей колонки. В более поздней работе [13] рассмотрен случай наличия «окон» в замороженных грунтах применительно к проходке нескольких тоннелей метрополитенов, однако исследуются только интегральные параметры нагрева рассола в рассолопроводе. В работе [22] представлены детальные данные экспериментального мониторинга температур по глубине замораживающих колонок в условиях наличия горизонтальной фильтрации поровых вод через ЛПО. Показывается существенное влияние фильтрации поровых вод на распределение температуры в замораживающих колонках применительно к практическому случаю строительства одной их шахт в Китае.

Важно отметить, что температуры рассола на выходе из различных замораживающих колонок могут различаться между собой не только ввиду наличия

фильтрационных течений поровых вод, но также и ввиду наличия отклонений скважин от проектных положений, определяемых в ходе инклинометрии [23], а также ввиду неоднородности теплофизических свойств пород [24]. В настоящей работе мы не рассматриваем эти факторы.

Объект и методология исследования

Описываемая в работе задача возникла в процессе экспериментального мониторинга температуры пород в контрольных скважинах при формировании ЛПО на строящемся калийном руднике в республике Беларусь. Замораживание пород осуществлялось в интервале глубин 0–180 м с дополнительным заглублением в водоупорный слой на глубину 7 м. В процессе мониторинга было выявлено аномальное поведение температуры в контрольно-термических скважинах в интервале глубин 132–142 м [25], которое было объяснено путем введения предположения о наличии фильтрационных потоков подземных вод. В процессе теоретико-экспериментального анализа данного предположения возник вопрос о том, можно ли подтвердить наличие фильтрационного потока в заданном направлении и наличие «окон» в соответствующих областях ЛПО посредством данных измерений разницы температуры рассола на входе и выходе из разных замораживающих колонок. Для этого были рассмотрены две модельные задачи, описанные ниже. В рамках первой задачи исследовался вопрос о том, будет ли дополнительный теплоприток к замораживающим колонкам из-за фильтрационного течения подземных вод в рассматриваемом интервале глубин существенно сказываться на температуре исходящего из колонки потока рассола. В рамках второй задачи определялось, какие скорости фильтрации воды долж-

ны быть в породах, чтобы обеспечить значимый теплоприток к замораживающим колонкам.

Математическая модель тепломассопереноса в замораживающей колонке

Рассматривался интервал глубин 132–142 м, на котором располагается исследуемый горизонтальный слой водопроводящих пород (песок). В массиве пород задавался круговой контур замораживающих колонок. Принималось, что скорость фильтрации подземных вод в этом слое достаточно высока, так что в ЛПО могут образовываться «окна», сквозь которые поток протекает через зону пород внутри контура замораживания. Наличие фильтрационного течения в «окне» между двумя соседними замораживающими колонками приводит к тому, что к этим замораживающим колонкам в рассматриваемом интервале глубин водопроводящего слоя подводится большее погонное количество теплоты (в расчете на 1 м длины замораживающей колонки), чем на других высотных отметках. Однако при дальнейшем движении рассола вверх по замораживающей колонке данный избыток теплоты будет частично «сглаживаться» в результате теплообмена с нисходящим потоком рассола в питающей трубе и с другими слоями пород, также подвергающимися искусственному замораживанию [21]. Для учета этого фактора выше слоя водопроводящих пород в интервале глубин 0–132 м был задан непроницаемый породный массив с теми же теплофизическими свойствами, что и в слое. Для простоты рассматривался случай однородного и изотропного породного массива.

Рассмотрена модель тепломассопереноса в единственной замораживающей колонке, контактирующей с «окном» ЛПО. В действительности «окно» рас-

полагается между какими-либо двумя замораживающими колонками, однако если задаться предположением о том, что физические процессы тепломассопереноса происходят симметрично относительно замковой плоскости ЛПО, лежащей между двумя рассматриваемыми замораживающими колонками, достаточно провести анализ только для одной из этих колонок. Также принято, что «окно» между двумя замораживающими колонками распространяется по высоте всего рассматриваемого водопроводящего слоя пород. При этом форма «окна» здесь не конкретизируется — важен лишь интегральный тепловой эффект от «окна» на колонку.

В основу предложенной модели вошли уравнения конвективного теплопереноса для прямого и обратного потоков рассола в замораживающей колонке и граничные условия на оголовке и башмаке колонки:

$$\rho c Q \frac{dT_1}{dx} = \alpha_{in} \pi d_1 (T_2 - T_1), \quad (1)$$

$$-\rho c Q \frac{dT_2}{dx} = \alpha_{in} \pi d_{2in} (T_1 - T_2) + \alpha_{out} \pi d_{2out} (T_{out} - T_2) + w(x), \quad (2)$$

$$T_1(0) = T_0, \quad (3)$$

$$T_2(L) = T_1(L), \quad (4)$$

где c — удельная теплоемкость рассола, Дж/(кг·°С); ρ — плотность рассола, кг/м³; Q — объемный расход рассола, м³/с; T_i — температура рассола, °С; индекс i принимает значения 1 для нисходящего потока рассола по питающей трубе и 2 для восходящего потока рассола по внешней коаксиальной области; x — вертикальная координата вдоль оси колонки, направленная вниз (начало координат находится на поверхности), м; d_1 — внутренний диаметр питающей трубы, м; d_{2in} — внешний диаметр питающей тру-

бы, м; d_{2out} — внутренний диаметр замораживающей колонки, м; α_{in} — коэффициент теплоотдачи через питающую трубу, Вт/(м²·°С); α_{out} — коэффициент теплоотдачи через замораживающую колонку, Вт/(м²·°С); T_{out} — температура пород, °С; T_0 — начальная температура рассола, поступающего в замораживающую колонку, °С; L — длина колонки, м; $w(x)$ — дополнительный тепловой поток в расчете на 1 м длины колонки, Вт/м.

Знак «минус» перед слагаемым слева в (2) указывает на то, что течение рассола происходит в направлении, противоположном оси x . Функция отлична от нуля только в интервале глубин 132–142 м. Ее вид может быть задан следующим образом:

$$w(x) = \begin{cases} 0, & x < 132 \text{ м} \\ W, & 132 \text{ м} \leq x < 142 \text{ м} \\ 0, & x \geq 142 \text{ м} \end{cases} \quad (5)$$

где W — фиксированная мощность теплового источника (избыточной теплоты от фильтрующегося через «окно» потока воды), Вт/м.

Конструктивно замораживающие колонки выполняются из двух труб — наружной замораживающей и внутренней питающей (см. рис. 1). Рассол, поступающий в колонку с поверхности, сначала движется вниз по питающей трубе до нижнего конца колонки, где питающая труба заканчивается, а затем вверх по внешней кольцевой проточной области между наружной и питающей трубами.

В качестве температуры породы T_{out} принимается температура породного массива на границе с замораживающей колонкой. Также в данной модели был принят ряд допущений:

- температура пород около колонки принимается однородной по глубине;
- колонки имеют форму идеальных цилиндров, а оси замораживающей и питающей трубы совпадают;

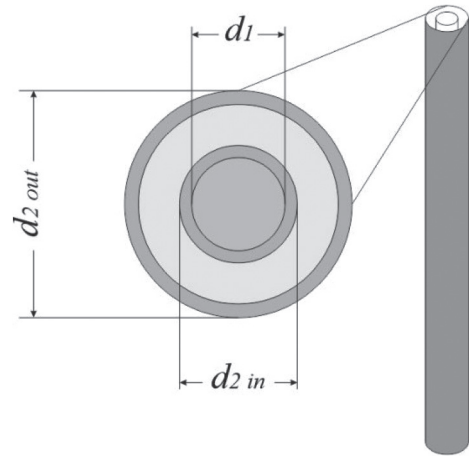


Рис. 1. Схематическая конструкция замораживающей колонки

Fig. 1. Schematic layout of freeze pipe

- плотность и теплоемкость рассола не зависят от температуры;
- процесс тепломассопереноса считается установившимся.

Расчет коэффициентов теплоотдачи α_{out} и α_{in} в (1), (2) определяется по формулам [26, 27] для ламинарного и переходного режима течения рассола соответственно:

$$Re_1 = \frac{\rho d_1 V_1}{\mu_c}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{Re_1 - 2300}{10^4 - 2300}, \quad (7)$$

$$Nu_{turb} = 32,49, \quad (8)$$

$$Nu_{lam} = 3,66, \quad (9)$$

$$Nu_1 = Nu_{lam} \cdot (1 - \gamma) + Nu_{turb} \gamma, \quad (10)$$

$$Nu_2 = 3,66 + 1,2 \left(\frac{d_{2in}}{d_{2out}} \right)^{0,5}, \quad (11)$$

$$\alpha_{in} = \frac{1}{\frac{d_1}{Nu_1 \cdot \lambda} + \frac{d_{2out} - d_{2in}}{Nu_2 \cdot \lambda} + \frac{h}{\lambda_p}},$$

$$\text{при } 2300 \leq Re_1 < 10^4, \quad (12)$$

Таблица 1

Параметры моделирования
Modeling parameters

Параметр	Значение
Плотность рассола, кг/м ³	1280
Теплоемкость рассола, Дж/(кг·°С)	2659
Объемный расход рассола в колонке, м ³ /с	0,0015
Начальная температура рассола в колонке, °С	-21
Внутренний диаметр питающей трубы, м	0,0558
Внешний диаметр питающей трубы, м	0,063
Внутренний диаметр замораживающей колонки, м	0,126
Рассчитанный коэффициент теплоотдачи через питающую трубу, Вт/(м ² ·°С)	17,04
Рассчитанный коэффициент теплоотдачи через замораживающую колонку, Вт/(м ² ·°С)	36,07
Длина замораживающей колонки, м	187,1
Температура породного массива, °С	-12

$$\alpha_{out} = Nu_2 \cdot \frac{\lambda}{d_{2out} - d_{2in}},$$

при $Re_2 < 2300$, (13)

где λ — теплопроводность рассола, Вт/(м·°С); λ_p — теплопроводность полипропилена, Вт/(м·°С); V_c — средняя по сечению скорость движения рассола, м/с; μ_c — динамическая вязкость рассола, Па·с.

С учетом из принятых технических параметров системы замораживания (см.

табл. 1) видно, что течение рассола в питающей трубе происходит в переходном режиме ($Re_1 = 3174$), а течение рассола во внешней коаксиальной области происходит в ламинарном режиме течения ($Re_2 = 937$). Исходя из этих соображений выбраны формулы (7)–(11) для безразмерных коэффициентов теплоотдачи.

Система уравнений (1) – (13) решена численно с помощью метода конечных

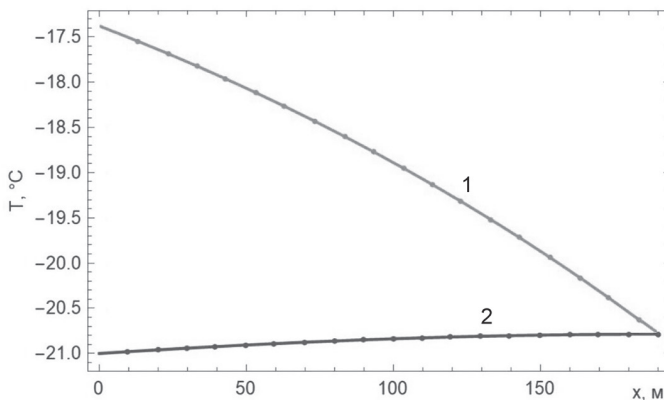


Рис. 2. Зависимость температуры прямого (кривая 2) и обратного (кривая 1) потоков рассола от вертикальной координаты по глубине колонки

Fig. 2. Temperature of direct (curve 2) and return (curve 1) flows of brine versus vertical depth coordinate along freeze pipe

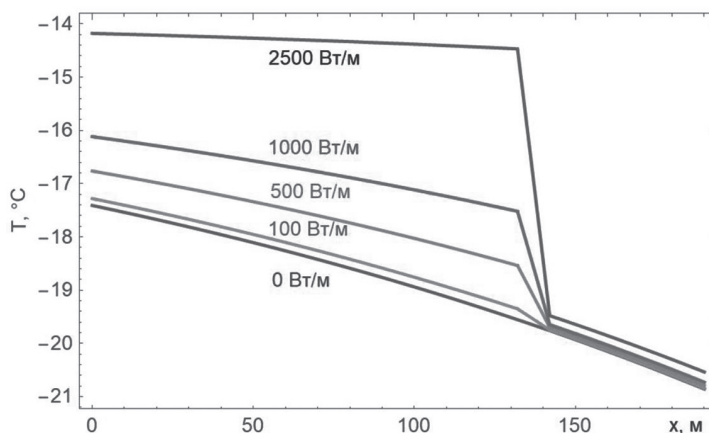


Рис. 3. Зависимость температуры обратного потока рассола от вертикальной координаты по глубине колонки при различных теплопритоках в фильтрующем слое пород

Fig. 3. Temperature of and return brine flow versus vertical depth coordinate along freeze pipe at different heat gains in pervious rock layer

разностей в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica (лицензия № L3830-4101). При расчете использовались следующие численные параметры, соответствующие скиповому стволу строящегося калийного рудника (см. табл. 1). Величина температуры породного массива определена на основании среднего теплопритока к замораживающим колонкам по данным эксперимен-

тальных измерений разницы температур прямого и обратного потоков рассола после прохождения всей системы замораживающих колонок.

Из численного решения задачи, полученного в предположении $W = 0$, видно, что практически все увеличение температуры рассола происходит при его обратном восходящем течении по коаксиальной трубе, что хорошо согла-

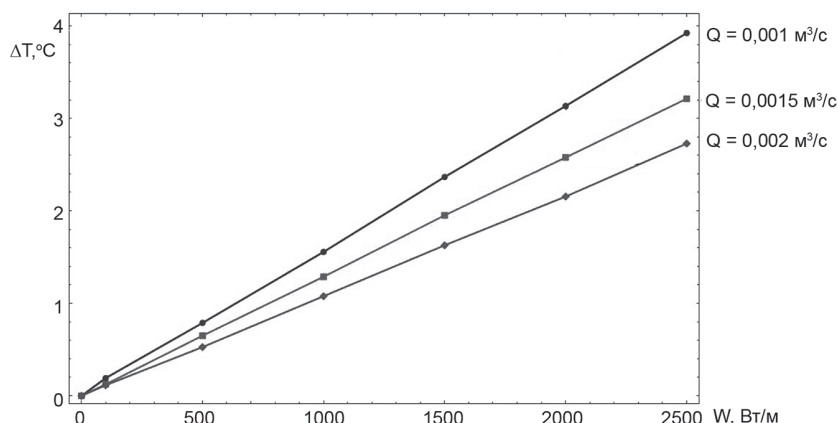


Рис. 4. Зависимость перепада температуры рассола на входе и выходе из замораживающей колонки от величины избыточного теплового потока от фильтрующейся воды для различных значений объемного расхода рассола

Fig. 4. Dependence of brine temperature difference at freeze pipe inlet and outlet on excessive heat flow from seepage water at different brine flow rates

суется с другими работами [3, 21] (см. рис. 2). Это связано с низким значением коэффициента теплоотдачи через полиэтиленовую питающую трубу.

Рассчитаны распределения температуры восходящего потока рассола во внешней коаксиальной проточной области по длине замораживающей колонки для случая различных ненулевых значений W . Результаты расчетов представлены на рис. 3. Зависимости суммарного перепада температуры рассола на входе и на выходе из замораживающей колонки от величин W для трех вариантов объемного расхода рассола в колонке представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что для всех рассмотренных расходов рассола перепад температуры линейно зависит от величины избыточного теплового потока. Температура рассола, измеряемая на выходе из замораживающих колонок, изменится на величину 1°C в том случае, если избыточный тепловой поток к 1 м длины замораживающей колонки будет превышать величину 800 Вт (для фактического расхода рассола $0,0015\text{ м}^3/\text{с}$). Для того, чтобы определить, каком реальному фильтрационному потоку подземных вод соответствует полученная величина, необходимо провести анализ тепломассопереноса в замораживаемом слое пород.

Анализ взаимосвязи скорости фильтрации вод и избыточного теплового потока

Закон сохранения массы для фильтрации воды в пористой среде в дифференциальной форме можно записать в следующем виде [28]:

$$\frac{\partial(\rho_v n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v \mathbf{V}_v) = 0, \quad (14)$$

где \mathbf{V}_v — вектор скорости фильтрации жидкости, м/с; ρ_v — плотность фильтрующейся воды, кг/м³; n — пористость породы, доли ед.

С учетом допущения, что плотность жидкости постоянна, а пористая среда недеформируема, уравнение неразрывности (14) приводится к уравнению несжимаемости:

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_v = 0. \quad (15)$$

Стационарное уравнение баланса объемных сил в пористой среде, заполненной подвижным флюидом (уравнение Дарси-Бринкмана) записывается в следующем виде [28]:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} \mathbf{V}_v + \bar{\mu} \Delta \mathbf{V}_v, \quad (16)$$

где p — гидравлическое давление, Па; K — коэффициент проницаемости породы, м²; μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с. Коэффициент $\bar{\mu}$ называют коэффициентом эффективной вязкости. В этой работе примем, что $\bar{\mu}$ совпадает с коэффициентом динамической вязкости $\bar{\mu} = \mu$.

Первое слагаемое в правой части представляет собой силу, схожую со Stokesовской силой сопротивления при скорости потока \mathbf{V}_v и пропорциональную первой степени скорости, второе слагаемое учитывает сдвиговое сопротивление движению, вызванное пористым скелетом.

Для определения скорости подвода теплоты к замораживаемой колонке фильтрационным потоком подземных вод можно воспользоваться выражением, полученным из упрощенной методики [15]:

$$w_\phi = \rho_v c_v V_v \Delta T_v l, \text{ кДж, Вт/м}, \quad (17)$$

где ρ_v — плотность воды, кг/м³; c_v — теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); V_v — естественная скорость течения подземных вод в поровом пространстве пород на удалении от ЛПО, м/с; ΔT_v — разница температур фильтрационного потока до и после прохождения между замораживающими колонками, °C; l — расстояние между замораживающими колонками, м;

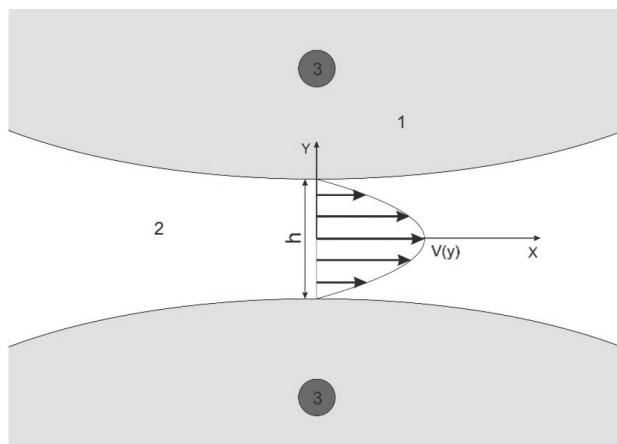


Рис. 5. Схематичное изображение канала
Fig. 5. Layout view of channel

κ — коэффициент расхода потока, зависящий от радиуса ЛПО и ширины «окна» в нем.

В наиболее простом случае ЛПО имеет единственное «окно», через которое подземные воды поступают во внутреннюю область контура замораживания, и единственное «окно», через которое подземные воды покидают внутреннюю область контура замораживания. В этом случае дополнительный тепловой поток от фильтрующихся вод распределяется между двумя соседними колонками (как в зоне входа потока, так и в зоне его выхода из контура замораживания) в равной степени и при расчете теплопритоков к каждой из них в (5) необходимо вводить множитель 0,5.

Коэффициент расхода потока принимается равным 1 в начале замораживания, когда подземные воды свободно фильтруются через внутреннюю часть контура замораживания, и 0 при смыкании ЛПО. В промежуточные моменты времени оценить данный коэффициент можно следующим образом:

$$\kappa = V_{\text{окн}} / V_{\text{в}} \quad (18)$$

То есть он равен отношению средней скорости $V_{\text{окн}}$ в «окне» между двумя замораживающими колонками и естест-

венной скорости течения подземных вод в поровом пространстве пород на удалении от ЛПО. Величина (18) может быть оценена количественно путем решения уравнения Дарси-Бринкмана для идеализированного «окна» в ЛПО, представляемого в виде плоского пористого канала толщиной h (см. рис. 5):

$$\mu \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{\mu}{K} V = \frac{\mu}{K} V_{\text{в}} n \quad (19)$$

$$V(0) = V(h) = 0 \quad (20)$$

Здесь $V = V(y)$ — скорость, являющаяся функцией горизонтальной координаты y поперек канала, м/с; Па; x — горизонтальная координата вдоль канала, м.

При выводе (19) вводится допущение о том, что поле гидростатического давления в пористой среде слабо искажается в процессе замораживания пород. Это позволяет выразить неизвестный градиент давления в (16) через естественную скорость течения подземных вод на удалении от ЛПО:

$$\frac{dp}{dx} \approx \frac{\mu}{K} V_{\text{в}} n \quad (21)$$

Выражение (21) является приближенным, и его погрешность тем больше, чем большая часть пород в осевой пло-

скости ЛПО достигла отрицательных температур и стала непроницаемой для фильтрационного потока подземных вод.

Аналитическое решение задачи (19)–(20) имеет следующий вид:

$$\frac{V_{\text{окн}}(y)}{V_{\text{в}}} = \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{y}{K^{1/2}}\right)\right) \left(\exp\left(\frac{y}{K^{1/2}}\right) - \exp\left(\frac{L}{K^{1/2}}\right)\right)}{1 + \exp\left(\frac{h}{K^{1/2}}\right)} \quad (22)$$

Если усреднить полученное выражение для скорости течения воды в «окне» ЛПО по поперечному сечению, то получится выражение для κ :

$$\kappa = \frac{2K^{1/2}}{h} \tanh\left(\frac{h}{2K^{1/2}}\right) - 1. \quad (23)$$

При параметрах задачи, представленных в табл. 2, κ будет равно приблизительно единице. Т.е. из-за того, что ширина «окна» ЛПО принята достаточно большой, гидравлические сопротивления фильтрационного потока, проходящего «окно» ЛПО, будут слабо отличаться от гидравлических потерь непоотревоженного (естественного) фильтрационного потока на аналогичном пространственном отрезке на удалении от ЛПО. Дан-

ный вывод получен при условии (21), однако он останется справедливым и в том случае, если в (21) ввести поправочный множитель для учета искажения поля давления, создаваемого замороженными породами.

Разница температур фильтрационного потока до и после прохождения между замораживающими колонками принята на основании оценок [21] для неблагоприятных условий высокоскоростного потока подземных вод (1,6–1,8 м/сут). В рассматриваемом нами случае фактически наблюдаемая скорость течения подземных вод ниже, а значит, $\Delta T_{\text{в}}$ будет больше.

Если из (5) выразить $V_{\text{в}}$ и подставить все известные числовые параметры, а в качестве $w_{\text{ф}}$ принять величину 800 Вт/м, получим:

$$V_{\text{в}} = w_{\text{ф}} / (\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} n \Delta T_{\text{в}} l \kappa) = 14,6 \text{ м/сут.} \quad (24)$$

Полученная оценка говорит о том, что для достижения избыточной тепловой мощности 800 Вт/м скорость течения подземных вод в ненарушенном колонками состоянии должна быть 14,6 м/сут, т.е. на три порядка выше, чем фактически наблюдаемые скорость фильтрации подземных вод по данным контрольно-

Таблица 2

Параметры моделирования
Modeling parameters

Параметр	Значение
Плотность воды, кг/м ³	1000
Теплоемкость воды, Дж/(кг·°С)	4200
Пористость пород	0,3
Коэффициент проницаемости пород, м ²	10–11
Расстояние между замораживающими колонками, м	1,257
Ширина «окна» ЛПО, м	0,5
Коэффициент расхода потока	0,5
Разница температур фильтрационного потока до и после прохождения между замораживающими колонками, °С;	3

термических скважин на промплощадке рассматриваемого рудника. Фактическая величина скорости фильтрации определена на основании анализа данных температуры в контрольно-термических скважинах представленного в [25] для описываемого объекта исследования, она составила около 30 мм/сут. Если решить обратную задачу и рассчитать величину дополнительного теплового потока к 1 м длины замораживающих колонок около «окна» ЛПО при фактической скорости фильтрации, то тепловой поток будет равен около 0,6 Вт/м, а соответствующий ему прирост температуры рассола на выходе из замораживающей колонки – 0,0003 °С.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемого объекта при фактических скоростях фильтрации подземных вод по данным контрольно-термических скважин величина дополнительного теплового потока к 1 м длины замораживающих колонок при прохождении «окна» ЛПО настолько мала, что не может быть обнаружена датчиками температуры рассола на выходе из замораживающих колонок.

Обобщенный анализ влияния теплопритока к замораживающей колонке

В предыдущих разделах статьи анализ проводился для конкретного объекта исследования – замораживаемых пород в условиях строящегося скипового ствола одного калийного рудника в республике Беларусь. В настоящем разделе проводится анализ в общем случае, без привязки к какому-либо горнотехническому объекту. Исследуются влияния «окна» в ЛПО на температуру рассола в обратной линии рассолопровода замораживающих колонок при различных гидрогеологических условиях при искусственном замораживании пород. В частности, интересует вопрос о влиянии

глубины водопроницающего слоя и скорости фильтрации поровых вод на изменение температуры рассола на выходе из замораживающей колонки.

Для проведения такого анализа удобно воспользоваться приближенным аналитическим решением системы уравнений (1) – (5) с учетом предположения о том, что теплообмена через питающую трубу нет. Исходя из этого предположения, получим следующую систему уравнений:

$$\rho c Q \frac{dT_1}{dx} = 0, \quad (25)$$

$$-\rho c Q \frac{dT_2}{dx} = \alpha_{out} \pi d_{2out} (T_{out} - T_2) + w(x), \quad (26)$$

$$T_2(L) = T_1(L) = T_{in}, \quad (27)$$

$$w(x) = \begin{cases} 0, & x < H - \delta \\ W, & H - \delta \leq x < H + \delta \\ 0, & x \geq H + \delta \end{cases}, \quad (28)$$

$$W = C_b l V_b n \Delta T_b \rho_b. \quad (29)$$

Здесь H – глубина срединной линии водопроницающего слоя пород; δ – половина мощности водопроницающего слоя пород.

Решив данную систему дифференциальных уравнений при условии, что $x = 0$ и при малых $\delta \ll L$, можно получить следующее выражение для температуры рассола у оголовка колонки:

$$T_2(0) = T_* + (T_{out} - T_*) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha_{out} d_{2out} \pi H}{\rho c Q}} \right), \quad (30)$$

$$T_* = T_{in} + (T_{out} - T_{in}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha_{out} d_{2out} \pi (L-H)}{\rho c Q}} \right) + \frac{2\delta W}{\rho c Q}. \quad (31)$$

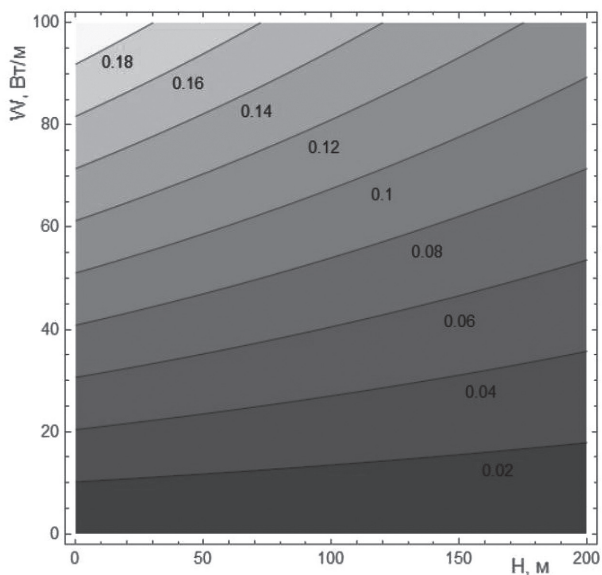


Рис. 6. Изолинии функционала прироста температуры рассола на выходе из колонки
 Fig. 6. Contour lines of functional of brine temperature increment at freeze pipe outlet

Из уравнения (30) было выведено аналитическое выражение для прироста температуры рассола на выходе из колонки, вызванного только наличием источника W :

$$\Delta T = \frac{2W\delta}{\rho c Q} e^{-\frac{\alpha_{out} d_{2out} \pi H}{\rho c Q}}. \quad (32)$$

Из данного выражения можно увидеть, что температура на выходе из колонки линейно зависит от мощности теплового источника W , а следовательно, и от естественной скорости течения подземных вод в поровом пространстве пород на удалении от ЛПО V_b , что согласуется с ранее полученными зависимостями (рис. 4). При этом зависимость температуры рассола в замораживающей колонке от его объемного расхода Q является нелинейной, что также ясно из вида выражения.

На рис. 6 представлен функционал прироста температуры рассола на выходе из замораживающей колонки в осях $H-W$. Наибольшие значения прироста температуры рассола имеют место для

слоев пород, расположенных ближе к дневной поверхности (малые H). Этот факт закономерен с той точки зрения, что чем выше расположен слой пород, тем меньший участок замораживающей колонки останется пройти рассолу до оголовка колонки, и тем меньше будет рассеивание избыточной теплоты W от источника тепловыделения (фильтрующего слоя пород).

Анализ формулы (32) показал, что для получения отклика температуры порядка $T = 0,1$ °С, необходима тепловая мощность не менее 50 Вт/м и, соответственно, скорость фильтрации не менее 0,5 м/сут. Эта величина на порядок больше, чем фактические значения скоростей фильтрации, полученных по данным контрольно-термических скважин для рассмотренного в статье объекта [25] (около 30 мм/сут). Полученный результат накладывает некоторое ограничение при использовании данной оценки для детектирования «окна» ЛПО, а именно необходимость наличия достаточно высокой скорости фильтрации воды в поро-

де для явного проявления отклика температуры. Помимо этого, точность измерений температуры рассола также должна быть очень высока, чтобы улавливать такие малые отклонения температур.

Из выше сказанного, можно сделать вывод, что использование данных температуры обратной линии рассолопровода в замораживающих колонках для детектирования «окон» ЛПО нецелесообразно ввиду того, что при наличии течений со скоростями фильтрации менее 0,5 м/сут отклонение температуры будет настолько мало, что будет «теряться» на фоне погрешности измерений датчиков и прочих факторов (влияние отклонений положений замораживающих колонок и пр.).

Заключение

В работе проведен теоретический анализ влияния «окна» в ледопородном ограждении на температуру охлаждающего рассола в обратном потоке рассолопровода замораживающей колонки. Рассмотрены горно-геологические условия строящегося ствола калийного рудника в республике Беларусь. Ниже приведены основные результаты, полученные в работе:

- Показано, что для рассматриваемых условий температура рассола, измеряемая на выходе из замораживающих колонок, изменится на величину 1 °С при наличии избыточного тепло-

вого потока к 1 м длины замораживающей колонки, который будет превышать величину 800 Вт.

- Получены выражения для оценки влияния скорости фильтрационного потока в водопроводящем слое замораживаемых пород на температуру рассола на выходе из замораживающей колонки.

- Чем ниже залегает слой, тем меньшее влияние оказывает фильтрационный поток на итоговую температуру рассола. Чем выше скорость фильтрации, тем сильнее отличие отклика между верхними и нижними слоями.

- Для получения четкого отклика температуры от скорости фильтрации воды в породе, скорость фильтрации должна составлять 0,5 м/сут и больше.

В целом, сделан вывод о том, что использование данных температуры обратной линии рассолопровода в замораживающих колонках для детектирования «окон» ЛПО нецелесообразно ввиду малого отклика температур рассола на выходе из колонок при скоростях фильтрации воды, наблюдаемых в большинстве практических ситуаций при строительстве стволов шахт.

Коллектив авторов выражает благодарность Г.П. Бровке из Института природопользования НАН и А.В. Зайцеву из Горного института УрО РАН за ценные дискуссии, позволившие улучшить данную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shcherban P., Razumovich S., Eliseev A.* Sinking of vertical mine openings in unstable, water-bearing strata using mobile hydraulic complex / Proceedings of 3rd International Conference on Management – Economics – Ethics – Technology (MEET 2017). 2017, pp. 97 – 106.

2. *Yao Z., Cai H., Xue W., Wang X., Wang Z.* Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata // AIP Advances. 2019, vol. 9, no. 2, article 025209. DOI:10.1063/1.5085806.

3. *Насонов И. Д., Федюкин В. А., Шуплик М. Н., Ресин В. И.* Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства. – М.: Недра, 1992. – 351 с.

4. Трупак Н. Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. — М.: Недра, 1974. — 280 с.

5. Hentrich N., Franz J. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project / Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology, International Mining Forum. Poland, 2015, pp. 89–104.

6. Sheng T.-B., Wei S.-Y. Measurement and engineering application of temperature field multiple-ring hole frozen wall in extra-thick clay strata // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2012, vol. 34, no. 8, pp. 1516–1521.

7. Hu J., Liu Y., Li Y., Yao K. Artificial ground freezing in tunnelling through aquifer soil layers: a case study in nanjing metro line 2 // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018, vol. 22, pp. 4136–4142. DOI: 10.1007/s12205-018-0049-z.

8. Alzoubi M. A., Sasmito A. P., Madiseh A., Hassani F. P. Intermittent Freezing Concept for Energy Saving in Artificial Ground Freezing Systems // Energy Procedia. 2017, vol. 142, pp. 3920–3925. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.297.

9. Rouabhi A., Jahangir E., Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018, vol. 120, pp. 523–533. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.065.

10. Vyalov S. S., Zaretsky Yu. K., Gorodetsky S. E. Stability of mine workings in frozen soils // Engineering Geology. 1979, vol. 13 pp. 339–351.

11. Бровка Г. П., Агутин К. А., Мучко М. В., Липницкий Н. А. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов // Инженерная геология. — 2021. — Т. 16. — № 1. — С. 74–85. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-1-74-84.

12. Витязь П. А., Головатый И. И., Прушак В. Я., Диулин Д. А. Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. — 2019. — Т. 64. — № 3. — С. 366–377. DOI: 10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377.

13. Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2012, vol. 28, pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005.

14. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. — 2019. — № 1. — С. 172–184. DOI: 10.15372/FTPRPI20190119.

15. Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3889–3907.

16. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. — М.: Минтрансстрой, 1978. — 117 с.

17. Семин М. А., Левин Л. Ю., Першаков О. С. Исследование влияния фильтрационного потока грунтовых вод на искусственное замораживание породного массива // Инженерно-физический журнал. — 2021. — № 1. — С. 51–61.

18. Sudisman R. A., Osada M., Yamabe T. Experimental investigation on effects of water flow to freezing sand around vertically buried freezing pipe // Journal of Cold Regions Engineering. 2019, vol. 33, no. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000187.

19. Huang S., Guo Y., Liu Y., Ke L., Liu G., Chen C. Study on the influence of water flow on temperature around freeze pipes and its distribution optimization during artificial ground

freezing // *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 135, pp. 435–445. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.090.

20. Паршаков О. С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: дис. ... к. т. н. — Пермь, 2020. — 140 с.

21. Хакимов Х. Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. — Изд-во Академии наук СССР, 1957. — 191 с.

22. Wu T., Zhou X., Zhang L., Zhang X., He X., Xu Y. Theory and technology of real-time temperature field monitoring of vertical shaft frozen wall under high-velocity groundwater conditions // *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 189, article 103337. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103337.

23. Liu Y., Li K.-Q., Li D.-Q., Tang X.-S., Gu S.-X. Coupled thermal-hydraulic modeling of artificial ground freezing with uncertainties in pipe inclination and thermal conductivity // *Acta Geotechnica*. 2021, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s11440-021-01221-w.

24. Wang T., Liu Y., Zhou G., Wang D. Effect of uncertain hydrothermal properties and freezing temperature on the thermal process of frozen soil around a single freezing pipe // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021, vol. 124, article 105267. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105267.

25. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of temperature anomalies during thermal monitoring of frozen wall formation // *Fluids*. 2021, vol. 6. DOI: 10.3390/fluids6080297.

26. Gnielinski V. G1 Heat transfer in turbulent flow through pipes / *VDI Heat Atlas*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010, pp. 696–702.

27. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities // *Computers and Geotechnics*. 2015, vol. 63, pp. 99–111. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.08.004.

28. Шарфарец Б. П., Курочкин В. Е. К вопросу о подвижности частиц и молекул в пористых средах // *Научное приборостроение*. — 2015. — Т. 25. — № 4. — С. 43–55. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Shcherban P., Razumovich S., Eliseev A. Sinking of vertical mine openings in unstable, water-bearing strata using mobile hydraulic complex. *Proceedings of 3rd International Conference on Management – Economics – Ethics – Technology (MEET 2017)*. 2017, pp. 97–106.

2. Yao Z., Cai H., Xue W., Wang X., Wang Z. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata. *AIP Advances*. 2019, vol. 9, no. 2, article 025209. DOI:10.1063/1.5085806.

3. Nasonov I. D., Fedyukin V. A., Shuplik M. N., Resin V. I. *Tekhnologiya stroitel'stva podzemnykh sooruzheniy. Spetsial'nye sposoby stroitel'stva* [Construction Technology for Underground Structures. Special Construction Methods], Moscow, Nedra, 1992, 351 p.

4. Trupak N. G. *Zamorazhivaniye gruntov v podzemnom stroitel'stve* [Ground freezing in underground construction], Moscow, Nedra, 1974, 280 p.

5. Hentrich N., Franz J. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project. *Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology, International Mining Forum*. Poland, 2015, pp. 89–104.

6. Sheng T.-B., Wei S.-Y. Measurement and engineering application of temperature field multiple-ring hole frozen wall in extra-thick clay strata. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2012, vol. 34, no. 8, pp. 1516–1521.

7. Hu J., Liu Y., Li Y., Yao K. Artificial ground freezing in tunnelling through aquifer soil layers: a case study in nanjing metro line 2. *KSCIE Journal of Civil Engineering*. 2018, vol. 22, pp. 4136–4142. DOI: 10.1007/s12205-018-0049-z.

8. Alzoubi M. A., Sasmito A. P., Madiseh A., Hassani F. P. Intermittent Freezing Concept for Energy Saving in Artificial Ground Freezing Systems. *Energy Procedia*. 2017, vol. 142, pp. 3920–3925. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.297.
9. Rouabhi A., Jahangir E., Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, vol. 120, pp. 523–533. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.065.
10. Vyalov S. S., Zaretsky Yu. K., Gorodetsky S. E. Stability of mine workings in frozen soils. *Engineering Geology*. 1979, vol. 13 pp. 339–351.
11. Brovka G. P., Agutin K. A., Muchko M. V., Lipnitsky N. A. Calculations of the temperature regime and energy costs in the ice wall forming for sinking mine shafts. *Inzhenernaya geologiya*. 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–85. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-1-74-84.
12. Vityaz P. A., Golovaty I. I., Prushak V. Ya., Diulin D. A. Technology of performance of ice wall when sinking shafts at the example of the objects of the petrikov mining. *Izvestiya Nacional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 366–377. [In Russ]. DOI: 10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377.
13. Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012, vol. 28, pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005.
14. Levin L. Yu., Semin M. A., Zaitsev A. V. Adjustment of thermophysical rock mass properties in modeling frozen wall formation in mine shafts under construction. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no. 1, pp. 172–184. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190119.
15. Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3889–3907.
16. VSN 189-78. *Instruktsiya po proektirovaniyu i proizvodstvu rabot po iskusstvennomu zamorazhivaniyu gruntov pri stroitel'stve metropolitenov i tonneley* [Instructions for the design and production of works on artificial freezing of soils during the construction of subways and tunnels]. Moscow, Mintransstroy, 1978, 117 p.
17. Semin M. A., Levin L. Yu., Parshakov O. S. Influence of groundwater seepage on artificial freezing of rock mass. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 51–61. [In Russ].
18. Sudisman R. A., Osada M., Yamabe T. Experimental investigation on effects of water flow to freezing sand around vertically buried freezing pipe. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2019, vol. 33, no. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000187.
19. Huang S., Guo Y., Liu Y., Ke L., Liu G., Chen C. Study on the influence of water flow on temperature around freeze pipes and its distribution optimization during artificial ground freezing. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 135, pp. 435–445. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.090.
20. Parshakov O. S. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy termometricheskogo kontrolya ledoporodnykh ograzhdeniy* [Development of an automated system for thermometric control of frozen walls], Candidate's thesis, Perm, 2020, 140 p.
21. Khakimov H. R. *Voprosy teorii i praktiki iskusstvennogo zamorazhivaniya gruntov* [Questions of the theory and practice of artificial soil freezing], Moscow, Akademiya nauk SSSR, 1957, 191 p.
22. Wu T., Zhou X., Zhang L., Zhang X., He X., Xu Y. Theory and technology of real-time temperature field monitoring of vertical shaft frozen wall under high-velocity groundwater conditions. *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 189, article 103337. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103337.
23. Liu Y., Li K.-Q., Li D.-Q., Tang X.-S., Gu S.-X. Coupled thermal-hydraulic modeling of artificial ground freezing with uncertainties in pipe inclination and thermal conductivity. *Acta Geotechnica*. 2021, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s11440-021-01221-w.

24. Wang T., Liu Y., Zhou G., Wang D. Effect of uncertain hydrothermal properties and freezing temperature on the thermal process of frozen soil around a single freezing pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021, vol. 124, article 105267. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105267.

25. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of temperature anomalies during thermal monitoring of frozen wall formation. *Fluids*. 2021, vol. 6. DOI: 10.3390/fluids6080297.

26. Gnielinski V. G1 Heat transfer in turbulent flow through pipes. *VDI Heat Atlas*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010, pp. 696 – 702.

27. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities. *Computers and Geotechnics*. 2015, vol. 63, pp. 99 – 111. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.08.004.

28. Sharfarets B. P., Kurochkin V. E. To the question of mobility of particles and molecules in porous media. *Nauchnoe priborostroenie*. 2015, vol. 25, no. 4, pp. 43 – 55. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семин Михаил Александрович¹ – канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: seminma@inbox.ru,
Scopus ID 56462570900,

Богомяков Александр Васильевич¹ – младший научный сотрудник,
e-mail: bavaerolog@gmail.com,
Scopus ID 57218893401,

Пугин Алексей Витальевич¹ – канд. физ.-мат. наук,
научный сотрудник, e-mail: lyosha.p@gmail.com,
Scopus ID 15729767700,

¹ Горный институт УрО РАН.

Для контактов: Семин М.А., e-mail: seminma@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Semin¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: seminma@inbox.ru,
Scopus ID 56462570900,

A.V. Bogomyakov¹, Junior Researcher,
e-mail: bavaerolog@gmail.com,
Scopus ID 57218893401,

A.V. Pugin¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Researcher,
e-mail: lyosha.p@gmail.com,
Scopus ID 15729767700,

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
614007, Perm, Russia.

Corresponding author: M.A. Semin, e-mail: seminma@inbox.ru.

Получена редакцией 30.09.2021; получена после рецензии 09.12.2021; принята к печати 10.02.2022.

Received by the editors 30.09.2021; received after the review 09.12.2021; accepted for printing 10.02.2022.

