2023

<u>№</u> 4

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.253.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПОРОВЫХ ВОДАХ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ ГРУНТОВ

М. А. Семин, С. А. Бублик

Горный институт УрО РАН, E-mail: seminma@inbox.ru, ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия

Изучено влияние фазовых переходов во влажных грунтах, содержащих растворенную поваренную соль, на процесс их искусственного замораживания. Рассмотрены эффекты, связанные с теплотой кристаллизации поровой воды при отрицательных температурах, а также с теплотой кристаллизации соли при достижении точки эвтектики. Сделаны выводы о возможности достижения точки эвтектики в искусственно замораживаемых грунтах надсолевых толщ соляных месторождений. С помощью математической модели тепловых процессов в искусственно замораживаемой глине, содержащей раствор поваренной соли, проанализировано влияние смещения точки эвтектики на поле температур замораживаемого грунта.

Искусственное замораживание грунтов, соляные месторождения, минерализация поровых вод, точка эвтектики, скрытая теплота кристаллизации, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20230411

Наиболее распространенный способ строительства шахтных стволов калийных рудников — искусственное замораживание пород [1]. Это связано с тем, что продуктивные пласты калийно-магниевых солей растворимы в воде, а потому вопрос недопущения проникновения подземных вод через водозащитную толщу соляных месторождений стоит для них особенно остро [2]. Одна из особенностей строительства шахтных стволов на месторождениях калийной и каменной соли — минерализация подземных вод надсолевых толщ вблизи контакта с водозащитной толщей. Особое внимание инженерами-проектировщиками уделяется исследованию свойств подземных вод: виду и степени минерализации, жесткости, кислотности, агрессивности по отношению к предполагаемым материалам крепи ствола, температуре, направлению, скорости подземных потоков, химическому составу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Пермского края (проект № С-26/563), а также Министерства науки и высшего образования РФ (проект ЦИТИС № 122030100425-6).

Согласно [3], в надсолевых толщах Верхнекамского месторождения встречаются рассолы с преобладанием ионов натрия и хлора, а их минерализация может превышать 200 г/л. В надсолевых толщах Старобинского месторождения подземные воды имеют более низкую минерализацию, в их составе присутствуют преимущественно ионы кальция, калия и хлора. С повышением минерализации подземных вод (в данном случае рассолов) температура кристаллизации воды в рассоле уменьшается [4-6]. Это может привести к более медленному замораживанию грунта, негативно сказаться на несущей способности ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов [7, 8].

Влияние засоленности грунтов на процесс их искусственного замораживания применительно к проходке шахтных стволов изучено сравнительно слабо. Это связано с тем, что данный вопрос актуален прежде всего для соляных месторождений. В [9, 10] получена полностью связанная термогидромеханическая модель замораживаемого влажного засоленного грунта с использованием макроскопического континуального подхода. В [11] для частного случая исследованы закономерности формирования ледопородных ограждений в засоленных грунтах методами математического моделирования в пакете Comsol. Вопросы численного моделирования затронуты в [8, 12]. В них сделана попытка учесть эффекты, происходящие вблизи точки эвтектики порового рассола NaCl. Корректный учет данных эффектов может быть важен применительно к задаче искусственного замораживания грунтов и пород, так как проектные температуры замораживания чаще всего существенно ниже точек эвтектики типовых растворов солей, содержащихся в замораживаемых грунтах [3, 13]. Однако исследования по замораживанию засоленных грунтов и пород не решают вопросы, касающиеся анализа достижения поровыми растворами солей точки эвтектики, кристаллизации соли и сопутствующих тепломассообменных процессов. В частности, неизвестно насколько ощутимо влияют эти процессы на скорость роста ледопородных ограждений строящихся стволов.

Настоящая работа является продолжением [8, 12] и направлена на совершенствование математических методов и численных алгоритмов расчета искусственного замораживания засоленных грунтов, определение условий, при которых возможно достижение точки эвтектики, и на анализ влияния фазовых переходов рассола на формирование ледопородных ограждений.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Искусственное замораживание грунтов имеет свою специфику [8] по сравнению с задачами сезонного замораживания и размораживания грунтов криолитозоны, но основные физические процессы в данных классах задач схожи. Подробная классификация таких тепломассообменных процессов описана в [14]. В данной работе рассмотрены только тепловые процессы без учета массопереноса.

Основные тепловые процессы при искусственном замораживании влажных засоленных пород — это теплообмен с замораживающими колонками, кондуктивный теплоперенос и выделение теплоты в результате фазовых переходов компонентов рассола. При искусственном замораживании рассолов и засоленных грунтов выделяются следующие возможные фазовые переходы [5, 15]:

1) переход поровой воды в лед при понижении температур до величин менее температуры замерзания, зависящей от температуры;

2) выпадение в осадок растворенной соли при достижении точки эвтектики.

В общем случае оба процесса сопровождаются тепловыделениями. Соответствующие теплоты фазовых переходов для поваренной соли определялись в [9, 15, 16].

В [17] экспериментально исследована кинетика замораживания раствора поваренной соли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. При рассмотрении процесса замораживания раствора в порах диаметром 6.5 и 11.3 нм отмечается отсутствие скачков тепловыделений при эвтектической температуре -21.2 °C, связанных с кристаллизацией избыточной соли. Аналогичные выводы получены в [18]. В ситуации замораживания нестесненного раствора соли NaCl в большом сосуде до температуре ниже -21.2 °C пик тепловыделений, связанный с эвтектическим фазовым переходом избыточного раствора, присутствует [15, 17]. В [17] такой феномен связывается с перераспределением ионов Na⁺ в объеме раствора, находящегося в порах [19]. Вероятно, эвтектический переход соли из растворенного в кристаллическое состояние происходит при более низких температурах или более высоких концентрациях рассола, однако достоверной количественной информации об этом нет.

Фазовый переход поровой воды в лед происходит не мгновенно после перехода через 0 °С. Он лежит в пределах некоторого температурного диапазона, зависящего от присутствия связанной воды в порах и от минерализации воды. Характер выделения теплоты фазового перехода при замораживании засоленного грунта определяется кривой остаточного влагосодержания. При анализе искусственного замораживания грунтов для оценки остаточного влагосодержания γ при заданной отрицательной температуре *T* используется эмпирическая зависимость Ван Генухтена [12, 20]:

$$\gamma(T) = \left[1 + \left(\frac{T_{liq} - T}{\omega}\right)^{\frac{1}{1-m}}\right]^{-m}, \qquad (1)$$

где T_{liq} — температура начала замерзания поровой воды, °C; ω — характеристическая температура охлаждения, связанная с наиболее часто встречающимся радиусом пор, °C; m — индекс, указывающий на распределение радиуса поры относительно среднего радиуса.

Эмпирическая зависимость (1) не единственно возможная. В [21–23] представлены другие функциональные зависимости для описания температурного изменения остаточной влажности. В [12] формула (1) обобщена на случай минерализованных поровых вод с помощью экспериментальных данных о замораживании засоленных образцов глины с различной начальной влажностью. Зависимость остаточного влагосодержания (1) от минерализации можно учесть с помощью линейных функций:

$$T_{lig} = a_0 + b_0 s$$
, $\omega = a_1 + b_1 s$, $m = \text{const}$. (2)

здесь *s* — минерализация воды (г/100 г воды); a_i, b_i — эмпирические параметры, зависящие от начальной влажности грунта (значение *i* = 0 соответствует параметрам функции температуры начала замерзания T_{liq} , а значение *i* = 1 — параметрам характеристической температуры ω).

С учетом (2) формула (1) может использоваться для нахождения максимальных минерализаций поровой воды, которые наблюдаются при искусственном замораживании единичного объема засоленного грунта до некоторой отрицательной температуры T_{\min} . Увеличение минерализации происходит за счет того, что кристаллизуется только чистая вода, а соль остается в растворе [24, 25]. Предполагается, что гидравлическая проводимость грунта пренебрежимо мала. Тогда из закона сохранения массы соли получим трансцендентное уравнение для определения s_{\max} :

$$\frac{s_{\max}}{100\frac{\rho_s}{\rho_w} + s_{\max}}\gamma(T_{\min}, s_{\max}) = \frac{s_0}{100\frac{\rho_s}{\rho_w} + s_0}\gamma(T_0, s_0) = \frac{s_0}{100\frac{\rho_s}{\rho_w} + s_0},$$
(3)

где s_0 — начальная минерализация поровой воды, г/100 г; $T_0 \ge 0$ — начальная температура, °C; T_{\min} — минимальная температура замораживания, °C; ρ_s , ρ_w — плотности соли и воды, кг/м³.

Выражение (3) справедливо при малости объема V_{ps} , занимаемого кристаллизовавшейся солью по отношению к общему объему V_{un} незамерзшей жидкости в поре $(V_{ps} / V_{un} < 0.1)$. Выражение в знаменателе важно для перехода от минерализации в расчете на 100 г пресной воды к концентрации в расчете на удельный вес рассола.

Для глины зависимость s_{max} от температуры T_{min} и начальной минерализации s_0 представлена на рис. 1 [12]. Начальная влажность глины w = 0.17 кг/кг, параметры кривой остаточного влагосодержания: $\omega = 1.021 + 0.188s$ °C, $T_{liq} = 1.847 - 0.623s$ °C, m = 0.288. Интервалы температур и минерализаций выбраны исходя из реального диапазона изменения этих параметров при искусственном замораживании грунтов применительно к строящимся стволам соляных рудников. Штриховой линией отмечена температура точки эвтектики при условии нестесненного раствора. Эвтектическая концентрация (65.4 г/100 г) не показана, так как она не достигается. В данном случае штриховая линия условна, потому что фактическое выпадение соли в твердый осадок происходит в пористых средах при более низких температурах. При температурах выше $T_{liq}(s)$ максимальная минерализация равна начальной, затем начиная со значения $T_{liq}(s)$ изолинии минерализации изменяются по нелинейному закону, схожему с зависимостью (1).



Рис. 1. Зависимость максимальной минерализации s_{\max} поровых вод от начальной минерализации s_0 и минимальной температуры T_{\min} замораживания

Проведенный анализ роста минерализации поровых вод грунтов важен с точки зрения оценки возможности протекания фазового перехода № 2. Для условий гидравлически непроницаемых и слабопроницаемых грунтов термодинамические параметры рассола достигают температуры эвтектики и переходят через нее. Это указывает на возможность выделения дополнительной теплоты фазового перехода, которая по оценкам [15, 25] составляет 216–235 Дж на 1 г эвтектического раствора, участвующего в реакции. При этом точный момент начала протекания реакции кристаллизации соли неизвестен и, вероятно, сильно зависит от разновидности грунта и его начальной влажности. Важно определить, каков вклад дополнительных тепловыделений от фазового перехода и как он зависит от смещения точки эвтектики. Для этого на примере глины рассчитаем искусственное замораживание грунта при разных смещениях точки эвтектики, характеризующейся параметром $\xi \ge 1$: $T_{es} = T_e \xi$ (T_{es} — смещенная эвтектическая температура, °C; $T_e = -21.2$ °C — температура, соответствующая точке эвтектики нестесненного водного раствора NaCl).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РАСЧЕТА

Теоретическое исследование особенностей искусственного замораживания засоленного грунта проводилось для случая замораживания однородного слоя глины одной вертикальной замораживающей колонкой. Расчетная область считалась достаточно протяженной по вертикальной координате, на основании чего допустимо пренебречь вертикальными тепловыми потоками. С учетом введенных предположений имеем плоскую осесимметричную задачу теплопереноса с фазовыми превращениями. В численных расчетах за основу взята модель [12], в которой уравнение теплового баланса модифицировано для учета теплоты фазового перехода соли из растворенного состояния в кристаллическую форму:

$$\rho C_{p} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{w} L_{wc} n \frac{\partial \gamma}{\partial t} - \rho_{s} L_{sc} n \gamma \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \tag{4}$$

здесь ρ — плотность влажного грунта, кг/м³; C_p — удельная теплоемкость влажного грунта, Дж/(кг·°С); T — температура, °С; L_{wc} — удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг; n — пористость грунта; L_{sc} — удельная теплота кристаллизации соли, Дж/кг кристаллизующейся соли; ρ_s — плотность поваренной соли, кг/м³; c — объемная концентрация соли, м³/м³; λ — теплопроводность грунта, Вт/(м·°С); t — время, с; r — радиальная координата, м.

Подобный модельный подход использовался в [26]. Для перехода в (4) от объемной концентрации соли *с* к минерализации *s* (в расчете на 100 г воды) воспользуемся формулой

$$\frac{100}{s} \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{1}{c} - 1.$$
 (5)

Если принять гипотезу о малости концентрации соли и в (5) отбросить единицу справа, то получим пропорциональную связь между c и s, что сильно упростит вид уравнения (4) в терминах минерализации. Ошибку такого упрощения можно оценить графически (рис. 2). При объемных концентрациях соли ниже 0.1 (минерализация воды ниже 24 г/100 г) относительная ошибка δ определения минерализации будет не более 10%.



Рис. 2. Ошибка от использования пропорциональной зависимости между объемной концентрацией соли и минерализацией поровых вод: l — нелинейная зависимость между c и s согласно формуле (5); 2 — пропорциональная зависимость между c и s

В [12] первые два слагаемых в (4) объединены в единое слагаемое, характеризующее изменение энтальпии. С учетом выпадения соли в осадок зависимость удельной энтальпии от температуры будет иметь вид, приведенный на рис. 3. При построении кривых принято, что $\xi = 1$, поэтому при T = -21.2 °C наблюдается резкий скачок энтальпии, связанный с кристаллизацией воды, которая ранее находилась в составе эвтектического раствора. Выделение теплоты фазового перехода от кристаллизации соли не учтено в функциях H(T).



Рис. 3. Зависимость удельной энтальпии H от температуры T при минерализации 20 г/100 г (1), 10 (2), 3-5 (3) и 0 г/100 г (4)

Несовпадение удельных энтальпий при T < -21.2 °C связано с тем, что удельная теплота кристаллизации поровой воды существенно зависит от температуры [9]. На основании эмпирических данных [14, 27] в [9] предложена полиномиальная формула для учета зависимости удельной теплоты кристаллизации раствора воды и поваренной соли от температуры и концентрации раствора. С помощью уравнения (5) в ней можно перейти от параметра концентрации к минерализации, после чего зависимость будет иметь вид, приведенный на рис. 4. Контурные линии ограничены областью параметров, при которых имеется частичное замерзание поровой воды, соответствующая граница отмечена штриховой линией.



Рис. 4. Контурные линии удельной теплоты кристаллизации (кДж/кг) воды в рассоле

В настоящем исследовании данная зависимость учтена, что является еще одной модификацией модели [12]. Далее на модифицированной модели с учетом начальных и граничных условий [28, 29]

$$T\Big|_{r=R} = T_0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{fr}} = \alpha (T_{fr} - T)\Big|_{r=r_{fr}}, \tag{6}$$

$$T\big|_{t=0} = T_0 \,, \tag{7}$$

$$s\big|_{t=0} = s_0 \tag{8}$$

проведены численные расчеты процесса искусственного замораживания глины. Здесь R, r_{fr} — внешняя и внутренняя границы расчетной области, м; T_0 — начальная температура грунта, °C; α — коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающей колонкой, Bt/(м².°C); T_{fr} — температура хладоносителя в замораживающей колонке, °C.

Для вычисления фактической минерализации s = s(r, t) используется уравнение, следующее из (3):

$$s = \frac{100\rho_s / \rho_w}{\frac{100\rho_s / \rho_w + s_0}{s_0} \gamma(T, s) - 1}.$$
(9)

Параметры глины взяты из [12], где описаны результаты лабораторных испытаний образцов глины аргиллитоподобной. Керновый материал получен на этапе инженерно-геологических изысканий для строительства стволов калийного рудника в Республике Беларусь. Глубина залегания глины 160–180 м. Этому соответствует разрез глинисто-мергелистых субстратов, относящийся к старобинским слоям полесского горизонта верхнефаменского подъяруса верхнего девона. Прочие параметры приведены ниже:

Радиус замораживающей колонки, м	0.1
Радиус внешней границы расчетной области, м	3.0
Количество узлов по r	37
Отношение размеров соседних ячеек по r	1.10
Минимальный размер ячейки у замораживающей колонки, м	0.01
Начальная влажность грунта, кг/кг	0.17
Начальная температура грунта, °С	10
Температура хладоносителя в замораживающей колонке, °С	-40
Коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающей колонкой, Bt/(м ² .°C)	150
Удельная теплоемкость сухого скелета грунта, Дж/(кг·°С)	776
Удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С)	4200
Удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·°С)	2100
Теплопроводность сухого скелета грунта, Вт/(м·°С)	1.95
Теплопроводность воды, Вт/(м·°С)	0.56
Теплопроводность льда, Вт/(м·°С)	2.20
Удельная теплота кристаллизации соли, Дж/г эвтектического рассола	235
Плотность влажного грунта, кг/м ³	2070
Время моделирования, сут	50
Параметр ξ	1; 1.25; 2

Важно отметить, что соль NaCl вносилась в исследуемые образцы грунта уже в лабораторных условиях. Количество вносимой соли определялось исходя из условия понижения температуры начала замерзания поровой влаги на заданную величину [12].

Удельная теплоемкость и теплопроводность влажной глины рассчитывались по формулам [21]:

$$\rho C_{p} = (\rho C_{p})_{s} (1-n) + n(\rho C_{p})_{w} \gamma + (\rho C_{p})_{i} (1-\gamma)], \qquad (10)$$

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^{n\gamma} \lambda_i^{n(1-\gamma)}, \tag{11}$$

здесь индекс "s" соответствует твердым частицам глины, "w" — воде, "i" — льду. Таким образом, принята гипотеза о том, что растворенная и выпавшая в осадок соль влияют на теплофизические свойства глины только опосредованно (через параметр γ).

Численная реализация модели (4)–(11) и графический анализ решения осуществлялись в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Для дискретизации уравнений использовался метод конечных объемов, явная схема по времени первого порядка. Численное интегрирование уравнения (4) в зоне температур выше точки эвтектики осуществлялось методом эффективных теплоемкостей [30]. При достижении точки эвтектики для учета выделения большого количества скрытой теплоты кристаллизации соли применялся численный прием, заключающийся в последовательном изотермическом подводе соответствующей теплоты фазового перехода соли. В момент t_1 при достижении температуры эвтектики рассола, равной –21.2 ξ , мгновенный удельный тепловой поток

$$q = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

поступающий к данному малому объему замораживаемой глины, не сообщался этому объему до тех пор, пока не становилось справедливо условие

$$\int_{t_1}^t q dt \ge \rho_e L_{sc} n ,$$

т. е. вся теплота, поступавшая к данному малому объему замораживаемой глины, тратилась только на компенсацию скрытой теплоты кристаллизации соли, чем достигалась продолжительность процесса по времени. Применение такого подхода обусловлено тем, что метод эффективных теплоемкостей оказался не продуктивен при моделировании резкого выделения теплоты фазового перехода при заданной фиксированной температуре эвтектики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Все кривые построены для конечного времени моделирования 50 сут. Видно, что без учета теплоты кристаллизации соли температурные кривые для глины с разной минерализацией практически не различаются (рис. 5*a*). Такой вывод связан со сложным характером влияния соли NaCl на тепловые процессы в глине. С одной стороны, минерализация поровых рассолов приводит к ускорению охлаждения глины, так как для снижения ее температуры до заданного значения требуется отвести уже меньшее количество теплоты за счет сохранения бо́льшего количества незамерзшей влаги. С другой, теплопроводность и температуропроводность незамороженной глины меньше, чем замороженной, а значит, с ростом минерализации поровых рассолов теплота будет медленнее отводиться к замораживающей колонке. Данный факт может быть ошибочен для других типов грунтов и пород.



Рис. 5. Радиальные распределения температуры T(a) и остаточного влагосодержания $r(\delta)$ при разных начальных минерализациях поровой воды s_0 и смещениях точки эвтектики ξ

В случае учета теплоты кристаллизации соли ($\xi = 1$) температура опускается быстрее в глине с бо́льшим содержанием соли, несмотря на учет дополнительной теплоты фазовых переходов. Максимальное отклонение температур между кривыми для минерализаций 0 и 20 г/100 г составляет 2.8 °C. Данная разница увеличивается с ростом начальной влажности глины: при w = 0.26 кг/кг максимальное отклонение температур равно 4.2 °C. Анализ показал, что ключевой момент — не теплота фазового перехода соли, эффект от которой сравнительно невелик, а влияние начальной минерализации вод s_0 и смещения точки эвтектики ξ на распределение остаточного влагосодержания в глине (рис. 5*б*). Для несмещенной точки эвтектики влагосодержание глины в среднем становится ниже, что дополнительно усиливает процессы передачи и отвода теплоты через замораживающую колонку.

С практической точки зрения данный вывод важен, поскольку определяет наиболее пессимистичный случай замораживания глины, содержащей соль, т. е. смещение температуры эвтектики за пределы исследуемого диапазона температур. Данная ситуация характеризуется как максимальными температурами глины, так и максимальным остаточным влагосодержанием.

выводы

Проведенный анализ диапазона возможных параметров раствора поверенной соли, содержащегося в искусственно замораживаемых грунтах надсолевых толщ соляных месторождений, показал, что раствор может достигнуть температуры эвтектики, в то время как эвтектическая концентрация не достигается.

Предложена математическая модель теплопереноса в замораживаемом засоленном грунте, учитывающая теплоту кристаллизации соли при достижении температуры эвтектики раствора поваренной соли, а также зависимость теплоты замерзания воды от температуры и минерализации поровых вод.

Разработан и реализован численный алгоритм последовательного изотермического подвода скрытой теплоты фазового перехода при расчете кристаллизации соли при достижении параметров эвтектического раствора.

Температура грунта понижается медленнее в ситуации, когда точка эвтектики поваренной соли не смещена и составляет – 21.2 °С (как в случае нестесненного раствора). Это объясняется особенностями распределения остаточного влагосодержания и его влияния на процессы передачи и отвода теплоты из грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Levin L. Y., Semin M. A., and Parshakov O. S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells, J. Min. Institute, 2019, Vol. 237. — P. 268–274.
- 2. Барях А. А., Смирнов Э. В., Квиткин С. Ю., Тенисон Л. О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горн. пром-сть. 2022. № 1. С. 41–50.
- **3.** Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. М.: Недра, 1984. 238 с.
- 4. Yong R. N., Cheung C. H., and Sheeran D. E. Prediction of salt influence on unfrozen water content in frozen soils, Developments Geotech. Eng., 1979, Vol. 26. P. 137–155.
- Bing H. and Ma W. Laboratory investigation of the freezing point of saline soil, Cold Regions Sci. Technol., 2011, Vol. 67, No. 1–2. — P. 79–88.
- 6. Banin A. and Anderson D. M. Effects of salt concentration changes during freezing on the unfrozen water content of porous materials, Water Resources Res., 1974, Vol. 10, No. 1. P. 124–128.
- Qin B., Rui D., Ji M., Chen X., and Wang S. Research on influences of groundwater salinity and flow velocity on artificial frozen wall, Transportation Geotech., 2022, Vol. 34. — 100739.
- 8. Семин М. А., Левин Л. Ю., Желнин М. С., Плехов О. А. Моделирование искусственного замораживания породного массива в условиях неоднородной минерализации поровых вод // Теплофизика высоких температур. — 2022. — Т. 60. — № 3. — С. 434–442.
- Rouabhi A., Jahangir E., and Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid, Int. J. Heat Mass Transfer, 2018, Vol. 120. P. 523-533.

- Tounsi H., Rouabhi A., and Jahangir E. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid, Comp. Geotech., 2020, Vol. 119. — 103382.
- 11. Liu Q. and Hu R. Simulation of heat and mass transfer during artificial ground freezing in saturated saline groundwater, Excerpt from the Proc. of the 2017 COMSOL Conf. in Rotterdam, 2017.
- Semin M., Levin L., Bublik S., Brovka G., Brovka A., and Agutin K. Parameterization of the model of artificial clay freezing considering the effect of pore water salinity, Fluids, 2022, Vol. 7, No. 6. — 186.
- Николаев П. В. Определение технологических параметров безрассольного способа искусственного замораживания горных пород одиночной колонкой // Горн. журн. — 2022. — № 8. — С. 44-50.
- Lucas T., Chourot J. M., Bohuon Ph., and Flick D. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: numerical modelling of coupled heat and mass transport, Int. J. Heat Mass Transfer, 2001, Vol. 44, No. 11. — P. 2093–2106.
- **15.** Han B., Choi J. H., Dantzig J. A., and Bischof J. C. A quantitative analysis on latent heat of an aqueous binary mixture, Cryobiology, 2006, Vol. 52, No. 1. P. 146–151.
- 16. Archer D. G. and Carter R. W. Thermodynamic properties of the NaCl⁺ H₂O system. 4. Heat capacities of H₂O and NaCl (aq) in cold-stable and supercooled states, J. Physical Chemistry B, 2000, Vol. 104, No. 35. P. 8563–8584.
- 17. Koniorczyk M. and Bednarska D. Kinetics of water freezing from inorganic salt solution confined in mesopores, Thermochimica Acta, 2019, Vol. 682. 178434.
- Wan X., Tan D., Lai Y., Li S., Lu J., and Yan Z. Experimental study on pore water phase transition in saline soils, Cold Regions Sci. Technol., 2022, Vol. 203. — 103661.
- **19.** Dove P. M. The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions, Geoch. Cosmochimica Acta, 1999, Vol. 63, No. 22. P. 3715–3727.
- **20.** Nishimura S., Gens A., Olivella S., and Jardine R. J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application, Geotechnique, 2009, Vol. 59, No. 3. P. 159–171.
- 21. Alzoubi M. A., Xu M., Hassani F. P., Poncet S., and Sasmito A. P. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects, Tunnelling Underground Space Technol., 2020, Vol. 104. 103534.
- Бровка А. Г., Бровка Г. П., Дедюля И. В., Агутин К. А. Зависимость теплофизических и прочностных характеристик мерзлых грунтов от температуры // Природопользование. 2017. № 31. С. 45–49.
- 23. Kurylyk B. L. and Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils, Advances in Water Resources, 2013, Vol. 60. P. 160-177.
- 24. Wang M., Zhu Y., Zhao T., Cui L., Mao W., Ye M., and Yang J. Chemical characteristics of salt migration in frozen soils during the freezing-thawing period, J. Hydrology, 2022, Vol. 606. 127403.
- Leys J., Losada-Perez P., Glorieux C., and Thoen J. The melting behaviour of water and water-sodium chloride solutions studied by high-resolution Peltier-element-based adiabatic scanning calorimetry, J. Thermal Analysis Calorimetry, 2017, Vol. 129. P. 1727–1739.
- 26. Xu J., Lan W., Ren C., Zhou X., Wang S., and Yuan J. Modeling of coupled transfer of water, heat and solute in saline loess considering sodium sulfate crystallization, Cold Regions Sci. Technol., 2021, Vol. 189. 103335.

- **27.** Feistel R. and Wagner W. A new equation of state for H₂O ice IH, J. Phys. Chem. Reference Data, 2006, Vol. 35, No. 2. P. 1021–1047.
- 28. Левин Л. Ю., Семин М. А., Паршаков О. С. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 154–161.
- 29. Семин М. А., Левин Л. Ю., Паршаков О. С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины ледопородного ограждения // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 194–205.
- 30. Романова Е. К., Курилко А. С., Хохолов Ю. А. Регулирование теплового режима прибортового породного массива карьера криолитозоны с помощью гидро- и теплоизоляции // ГИАБ. 2015. № S30. С. 379–386.

Поступила в редакцию 07/IV 2023 После доработки 30/V 2023 Принята к публикации 30/VI 2023