

DOI: [10.7242/1999-6691/2021.14.2.12](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.2.12)

УДК 552.5

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕРМОГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЕРЗАНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

М.С. Желнин¹, А.А. Костина¹, А.Е. Прохоров¹, О.А. Плехов¹, М.А. Семин², К.А. Агутин³¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*²*Горный институт УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*³*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Морозное пучение промерзающих влагонасыщенных грунтов является важной инженерной проблемой во всем мире. В регионах с холодным климатом оно оказывает значительное механическое воздействие на основания и фундаменты строений и дорожных покрытий. При проведении искусственного замораживания для подземного строительства морозное пучение может приводить к нежелательному поднятию дневной поверхности и повышению давления на крепь и ледопородное ограждение. В настоящей работе предлагается математическая модель промерзания грунта, позволяющая рассчитать его деформирование в результате льдообразования из поровой влаги. Основу модели составляет система нелинейных уравнений массопереноса, теплопереноса и равновесия, из которых находятся переменные пористости, температуры и перемещения. Соотношения поромеханики вместе с эффективным напряжением вида Бишопа используются как для определения напряженно-деформированного состояния грунта в процессе замерзания поровой влаги, так и порового давления в зависимости от изменения пористости и объемной деформации. Также в модель включен ассоциированный закон пластического течения для вычисления неупругой объемной деформации грунта, возникающей при его растяжении под воздействием порового давления льда. Проверка применимости модели к описанию процесса промерзания проведена путем сравнения результатов двух лабораторных опытов с данными последующих численных расчетов. В первом опыте измерялись температура и уровень поднятия верхней поверхности образцов алевролитовой глины, которые подвергались одностороннему замораживанию в условиях открытой системы. Показано, что в случае промерзания грунта с образованием массивной криогенной структуры модель адекватно воспроизводит экспериментальные данные. При численном моделировании второго опыта результаты расчета деформирования грунта в радиальном направлении показали хорошее согласование с экспериментальными данными, полученными с помощью волоконно-оптического датчика при радиальном замораживании кварцевого песка в условиях закрытой системы.

Ключевые слова: искусственное замораживание грунта, морозное пучение, численное моделирование, волоконно-оптический датчик

VALIDATION OF A THERMO-HYDRO-MECHANICAL MODEL OF FREEZING OF WATER-SATURATED SOIL BASED ON LABORATORY TESTS RESULTS

M.S. Zhelnin¹, A.A. Kostina¹, A.E. Prokhorov¹, O.A. Plekhov¹, M.A. Semin², K.A. Agutin³¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation*²*Mining Institute UB RAS, Perm, Russian Federation*³*Institute of Nature Management of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Frost heave of freezing water-saturated soils is an important worldwide problem from an engineering point of view. In cold regions, this phenomenon significantly affects foundations of buildings and road pavements. Application of artificial ground freezing to underground construction due to frost heave can cause an undesirable uplift of the ground surface and an increase in pressure acting on a lining and frozen wall. In the present paper, a mathematical model of soil freezing enabling one to predict soil deformation due to phase transformation of pore water into ice is proposed. The model is based on a set of nonlinear equations of water transfer, heat transfer, and equilibrium which are solved relative to porosity, temperature, and displacement variables. Constitutive relations of the poromechanics theory along with Bishop-type effective stress are used to simulate the mechanical behavior of soil during the process of pore water freezing and to evaluate pore pressure depending on a change in porosity and volumetric strain. Moreover, equations of the associated flow rule of plasticity are incorporated into the model to describe an inelastic volumetric expansion of the freezing soil induced by pore ice pressure. The ability of the model to capture essential features of the freezing process of water-saturated soils is demonstrated by numerical simulation of two laboratory tests. For the first test, a comparison between results of the numerical simulation and experimental measurements of variations of temperature and uplift of the top surface of silty clay specimens with time has been conducted. It has been shown that the numerical results are highly consistent with the measurements when the soil specimen is frozen with the growth of a massive cryogenic structure. In the numerical simulation of the second test, the calculated radial deformation of freezing soil is in good agreement with the experimental measurements, obtained by a fiber-optical sensor during the radial freezing of the quartz sand sample in a closed system.

Key words: artificial ground freezing, frost heave, numerical simulation, fiber-optic sensor

1. Введение

Масштабное освоение территорий с холодным климатом неразрывно связано с гражданским и промышленным строительством в условиях сезоннопромерзающих и многолетнемерзлых грунтов. Известно, что процесс промерзания мелкодисперсных водонасыщенных грунтов зачастую сопровождается их интенсивным морозным пучением, которое влечет за собой появление дополнительного механического воздействия на возведенные фундаменты зданий [1, 2], дорожные покрытия [3, 4] и подземные

трубопроводы [5, 6]. Проблема морозного пучения промерзающих грунтов имеет также большую значимость в практике проходки вертикальных шахтных стволов и туннелей способом искусственного замораживания. В этом случае развитие сил морозного пучения в области замораживания может привести к повреждению наземных сооружений [7, 9], а также к увеличению нагрузки на ледопородное ограждение [9] и крепь шахтных выработок [10, 11]. В связи с этим изучение явления морозного пучения грунтов — важное инженерное и научное направление.

В Советском Союзе систематическое исследование морозного пучения грунтов началось в 20-30-х годах XX века с появлением работ основоположника отечественного мерзлотоведения М.И. Сумгина [12], который предложил теоретическое объяснение возникновения объемной деформации в промерзающем грунте, а также опытным путем показал наличие в замораживаемом образце передвижения воды к фронту промерзания. В это же время в зарубежной литературе публикуются результаты научных изысканий S. Taber [13, 14], свидетельствующие, что приток влаги из области с положительной температурой является ключевым механизмом в поднятии поверхности промерзающего грунта. Начиная с 30-х годов усилия исследователей по всему миру становятся направленными на выявление закономерностей между льдообразованием, возникновением миграции влаги и развитием морозного пучения в промерзающих грунтах, построение на их основе математических методов расчета вертикальных перемещений грунта при замерзании, а также на оценку воздействия сил морозного пучения на инженерные сооружения [15–17]. В этот период в рамках термодинамики фазовых переходов разрабатываются первые термогидравлические модели промерзающего грунта [18, 19], математически описывающие взаимовлияния процессов переноса тепла и влаги в пористых средах. Исходя из них в 70-х годах создается модель твердого льда (the rigid ice model) [20], позволяющая предсказывать морозное пучение в промерзающем слое грунта с учетом перераспределения влаги и образования прослоек льда (ледяных шпиров).

Ранние модели главным образом были нацелены на расчет одномерного промерзания массива грунта: с их помощью рассчитывалось поднятие дневной поверхности или оценивались воздействия сил морозного пучения на подошвы фундаментов. Вследствие этого в моделях отсутствуют соотношения для расчета напряженно-деформированного состояния. Однако в геотехнических задачах, связанных с искусственным замораживанием грунтов, а также при оценке взаимодействия подземного трубопровода с промерзающим грунтом, возникает необходимость в определении распределений полей напряжений и деформаций, поэтому в последнее время активно разрабатываются термогидромеханические модели промерзания грунта.

Согласованную с термодинамическими принципами математическую основу для описания механического поведения промерзающего грунта предоставляет теория поромеханики O. Coussy [21]. В рамках данной теории построены модели [22, 23], позволяющие в процессе искусственного замораживания горных пород при строительстве туннелей и разработке подземных месторождений учитывать морозное пучение, вызванное как объемным расширением поровой воды при ее кристаллизации, так и криогенными течениями. Промерзающий грунт предполагается поропругим материалом, а давление льда на твердый скелет вводится посредством эффективного напряжения вида Бишопа. Также модели включают в себя выражение, устанавливающее взаимозависимость между изменением пористости, поровым давлением и объемными деформациями. В свою очередь, неупругое механическое поведение промерзающего грунта рассмотрено в термогидромеханической модели [24], разработанной на основе Базовой Модели Барселоны (Barcelona Basic Model — BBM) для ненасыщенных грунтов, включающей в себя два переменных напряжения: первое является аналогом эффективного напряжения, а второе призвано описать влияние на напряженно-деформированное состояние криогенного всасывания. Предложенный подход позволяет рассчитать в замороженной зоне неупругое растяжение грунта вследствие воздействия давления льда и предсказать повышение прочности на сдвиг с увеличением содержания льда. Разработанная модель применена для численного расчета влияния сил морозного пучения на подземный трубопровод. Модификация ее определяющих соотношений проведена в [25]; здесь объемное расширение грунта при замерзании представляется как упругая и неупругая объемные деформации, зависящие от переменной криогенного всасывания. Однако разработанная модель нашла приложение только к описанию механических испытаний замороженных грунтов.

С теоретической точки зрения большой интерес вызывают одномерные модели промерзания грунта [26, 27], выведенные в рамках теории твердого льда. В данных моделях напряженно-деформированное состояние определяется через эффективное напряжение Бишопа, которое рассчитывается аналитически, исходя из зависимости упругой деформации от изменения пористости (коэффициента пустотности) грунта. При этом пористость грунта находится из уравнения массопереноса. В качестве критерия образования ледяных шпиров предлагается условие превышения пористостью грунта максимальной величины, устанавливаемой экспериментально для каждого типа грунта. Проведенное в [27] численное моделирование лабораторных экспериментов по замораживанию пучинистого грунта показало, что полученные результаты хорошо согласуются с наблюдаемым в эксперименте распределением ледяных шпиров, а также с измерениями поднятия поверхности образца и температуры. При этом, в отличие от модели твердого льда, предложенные модели позволяют описать консолидацию незамороженного грунта — уплотнение водонасыщенного грунтового слоя со временем вблизи фронта промерзания вследствие оттока влаги в замороженную зону.

Результаты численного моделирования, представленные в [26, 27], позволяют заключить, что расчет пористости промерзающего грунта по уравнению массопереноса дает возможность более адекватно учитывать перераспределение влаги в грунте, а также оценивать его усадку перед фронтом промерзания вследствие криогенного всасывания, в сравнении с другими существующими моделями, в которых уравнение массопереноса разрешается относительно порового давления. Кроме этого, в [28] показано, что использование метода конечных элементов для решения уравнения массопереноса относительно порового давления приводит к чрезмерному сглаживанию решения вблизи фронта промерзания, вследствие чего рассчитанная величина криогенного всасывания является заниженной. Однако модели [26, 27] могут применяться только для решения задач с однонаправленным вертикальным промерзанием грунта в силу необходимости аналитического определения упругой деформации. Данная особенность существенно ограничивает возможность их приложения к инженерным задачам, например, связанным с искусственным замораживанием.

Для того чтобы преодолеть указанное ограничение, в настоящей работе предлагается модифицированная термогидромеханическая модель, в которой взаимосвязанное изменение пористости, порового давления воды и льда, полей напряжений и деформаций описывается определяющими соотношениями поромеханики с эффективным напряжением вида Бишопа и уравнением Клаузиуса–Клапейрона. Также в модель включены выражения для неупругой объемной деформации, вызванной поровым давлением льда. Проверка применимости модели к расчету промерзания грунта осуществляется путем численного моделирования двух лабораторных экспериментов. Первый эксперимент заключается в одностороннем замораживании образцов алевролитистой глины в условиях открытой системы при различных условиях; его результаты опубликованы в [27]. Второй эксперимент проведен авторами данной работы и состоит в радиальном замораживании песка в условиях закрытой системы с целью измерения его механической деформации. Измерение деформации выполняется с помощью волоконно-оптического датчика на базе решетки Брэгга. Известно, что такие датчики обладают довольно высокой точностью, незначительным затуханием сигнала на больших расстояниях, невосприимчивостью к воздействиям электромагнитных полей, а также имеют малые габариты [29, 30]. В силу перечисленных преимуществ волоконно-оптические датчики активно используются для исследования механического поведения грунтов и бетонов, в частности, для анализа давления грунта на опорные конструкции при строительстве новых линий метро [31], измерения деформации в грунте [32] и бетоне [33] при замораживании. Также на их основе создаются методики оценки влагосодержания грунтов и построения кривых водоудерживания [34, 35].

2. Математическая модель промерзания влагонасыщенного грунта

Предполагается, что промерзающий грунт — это трехфазная пористая среда, состоящая из твердых частиц (индекс s), жидкой воды (индекс l) и кристаллов льда (индекс i). В соответствии с существующими представлениями о процессе промерзания грунта [22, 23, 26, 27] для построения термогидромеханической модели принимаются следующие гипотезы:

1. В начальный момент времени пористая среда полностью насыщена водой; не учитывается влияние воздуха и пара на замерзание влаги.
2. При замораживании сохраняется локальное термодинамическое равновесие, вследствие чего все фазы пористой среды имеют одинаковую температуру.
3. Температура замерзания воды постоянна; роль миграции растворенных солей и внешней нагрузки в понижении температуры замерзания поровой воды считается незначительной.
4. Изменение плотности каждой фазы пористой среды не рассматривается.
5. Движение льда относительно твердых частиц не учитывается, то есть лед и твердые частицы движутся как единое целое.
6. Формирование ледяных шпиров при замораживании во внимание не принимается.
7. Материал твердого скелета пористой среды предполагается изотропным.
8. Деформации пористой среды при замерзании влаги описываются в рамках теории малых деформаций.

В дальнейшем в пористой среде выделим две зоны. Температура в одной из них ниже температуры замерзания поровой воды (будем называть ее замороженной зоной); в этой зоне находятся частицы грунта, лед и незамёрзшая вода. В замороженной зоне выделим область — область промерзания, в которой существуют криогенные течения. Другую зону среды, в которой температура выше температуры замерзания воды, назовем незамороженной зоной; она состоит только из частиц грунта и жидкой воды.

Система уравнений для описания промерзания грунта включает:

– уравнение массопереноса

$$\frac{\partial(\rho_l S_l n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i S_i n)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_l \mathbf{v}_l) = 0; \quad (1)$$

– уравнение теплопереноса

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + C_l \mathbf{v}_l \cdot \operatorname{grad} T = Q_{ph}; \quad (2)$$

– уравнение равновесия

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\gamma} = 0. \quad (3)$$

Здесь: $\rho_j S_j n$ — массовое содержание воды ($j=l$) и льда ($j=i$) в момент времени t ; ρ_j — плотность и S_j — насыщенность фазы j ; n — пористость; C_l, \mathbf{v}_l — объемная теплоемкость воды и ее скорость движения относительно твердого скелета; $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор полного напряжения; $\boldsymbol{\gamma}$ — удельный вес пористой среды; T — температура; C — объемная теплоемкость и λ — теплопроводность пористой среды; Q_{ph} — тепловой источник, вызванный выделением скрытой теплоты фазового перехода при кристаллизации воды.

В уравнении баланса массы (1) льдонасыщенность S_i представляет собой степенную функцию температуры, которая выражается как [26]:

$$S_i = \begin{cases} 1 - [1 - (T - T_{ph})]^\alpha, & T \leq T_{ph}, \\ 0, & T > T_{ph}, \end{cases}$$

где T_{ph} — температура замерзания поровой влаги, α — экспериментально определяемый параметр. Из условия полного насыщения следует, что влагонасыщенность S_i равна: $S_i = 1 - S_l$.

В (1) скорость движения влаги \mathbf{v}_l относительно твердого скелета задается законом Дарси:

$$\mathbf{v}_l = -k \operatorname{grad} \psi,$$

где k — коэффициент влагопроводности, ψ — потенциал грунтовой влаги. Коэффициент влагопроводности k выражается в виде степенной функции температуры T [36]:

$$k = \begin{cases} k_0 [1 - (T - T_{ph})]^\beta, & T \leq T_{ph}, \\ k_0, & T > T_{ph}, \end{cases}$$

где k_0 — коэффициент влагопроводности незамороженного грунта, β — параметр, который находится из эксперимента. Потенциал грунтовой влаги ψ определяется как

$$\psi = \frac{p_l}{\rho_l g} + z,$$

где p_l — поровое давление воды, g — ускорение свободного падения, z — вертикальная координата.

Для того чтобы установить величину порового давления воды p_l , следуя работам [26, 27], воспользуемся уравнением Клаузиуса–Клапейрона и соотношением Бишопа для эффективного порового давления в зоне промерзания. Тогда давление воды можно записать как

$$p_l = \frac{(1 - \chi)(\rho_l - \rho_i) p_0 + (1 - \chi) \rho_l \rho_i L \ln(T/T_{ph}) + \rho_l p}{\chi \rho_l + (1 - \chi) \rho_i},$$

где L — удельная теплота кристаллизации воды, p_0 — начальное поровое давление воды, χ — параметр порового давления, зависящий от льдонасыщенности S_i :

$$\chi = (1 - S_i)^{1.5}.$$

В уравнении теплопереноса (2) объемный источник тепла, вызванный фазовым переходом, имеет вид:

$$Q_{ph} = L\rho_i \frac{\partial(nS_i)}{\partial t}.$$

Объемная теплоемкость C и теплопроводность λ вычисляются как [38]

$$C = (1-n)c_s\rho_s + nS_i c_l \rho_l + nS_i c_i \rho_i,$$

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_l^{nS_i} \lambda_i^{nS_i},$$

где c_j , λ_j — удельная теплоемкость и теплопроводность фазы j ($j = s, l, i$).

В уравнении равновесия (3) тензор полного напряжения σ выглядит следующим образом [21]:

$$\sigma = \sigma' - b(p - p_0)\mathbf{I}, \quad (4)$$

где σ' — тензор эффективного напряжения, p_{por} — поровое давление, b — эффективный коэффициент Био, \mathbf{I} — единичный тензор. Для изотропного материала тензор эффективного напряжения σ' вычисляется по закону Гука:

$$\sigma' = \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{vol}^{el} \mathbf{I} + 2G\varepsilon^{el},$$

где K — эффективный объемный модуль, G — эффективный модуль сдвига, ε^{el} — тензор упругой деформации, ε_{vol}^{el} — величина объемной упругой деформации.

Согласно принципу аддитивного разложения тензора полной деформации ε , тензор упругой деформации ε^{el} может быть выражен как

$$\varepsilon^{el} = \varepsilon - \varepsilon^{th} - \varepsilon^{in},$$

где ε^{th} — тензор температурной деформации, ε^{in} — тензор неупругой деформации. При этом тензор полной деформации ε определяется из геометрического соотношения теории малых деформаций:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\text{grad } \mathbf{u} + \text{grad } \mathbf{u}^T),$$

где \mathbf{u} — вектор перемещения. Тензор температурной деформации записывается как

$$\varepsilon^{th} = \alpha_T (T - T_0)\mathbf{I},$$

где α_T — коэффициент температурного расширения, T_0 — начальная температура незамороженного грунта.

Для расчета порового давления p используется выражение, предложенное в теории поромеханики [21]:

$$p = p_0 + N(n - n_0 - b\varepsilon_{vol}^{el} + 3\alpha_T(b - n_0)(T - T_0)), \quad (5)$$

где n_0 — начальная пористость, N — эффективный касательный модуль Био.

Эффективные механические параметры вычисляются по формуле [22]:

$$X = S_i X_{fr} + S_l X_{un},$$

где X — эффективное значение параметра, X_{fr} и X_{un} — значения параметров в замороженной и незамороженной зонах грунта.

В процессе промерзания грунт в замороженной зоне может претерпевать значительное объемное расширение под действием сил морозного пучения. Использование в этом случае только определяющих соотношений пороупругости может привести к чрезвычайно завышенной оценке среднего эффективного

напряжения в замороженной зоне. Более реалистичного описания напряженно-деформированного состояния промерзающего грунта можно достичь, если предположить неупругое механическое поведение твердого скелета при растяжении. В соответствии с [24] неупругая объемная деформация возникает, если под влиянием порового давления льда среднее эффективное напряжение превышает предел прочности твердого скелета на растяжение. В [25] дополнительно вводятся упругая и неупругая составляющие объемной деформации, зависящие от криогенного всасывания. Причем неупругая объемная деформация появляется, если величина криогенного всасывания превосходит свое пороговое значение, зависящее от типа грунта.

Согласно данному подходу в модель добавляется неупругая объемная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}^{fn}$, вызываемая силами морозного пучения:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{fn} = \varepsilon_{vol}^{fn} \mathbf{I},$$

где ε_{vol}^{fn} — величина объемной неупругой деформации грунта. В качестве условия возникновения неупругой деформации используется критерий текучести следующего вида:

$$F = A\sigma'_m - B,$$

где σ'_m — эффективное среднее напряжение. Коэффициенты A и B определяются так же, как и в критерии Друкера–Прагера:

$$A = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)},$$

где c — коэффициент сцепления частиц в незамороженном грунте, φ — угол внутреннего трения незамороженного грунта. Расчет величины объемной неупругой деформации $\boldsymbol{\varepsilon}^{fn}$ выполняется с использованием функции текучести F согласно ассоциированному закону пластического течения.

Таким образом, объемная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}^{fn}$ возникает в промерзающем грунте вследствие превышения эффективным средним напряжением σ'_m предела прочности на растяжение твердого скелета грунта. Согласно выражению (5) поровое давление p определяется пористостью грунта n , поэтому рост пористости в замороженной зоне, вызванный объемным расширением замерзающей поровой воды и притоком дополнительного количества воды со стороны незамороженной зоны, приводит к увеличению порового давления p , что, в свою очередь, способствует повышению напряжения σ'_m , которое вычисляется из соотношения (4). Вместе с тем объемная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}^{fn}$ описывает только объемное расширение грунта, связанное с формированием массивной криогенной структуры, то есть в отсутствие толстых ледяных шпиров. Если же процесс промерзания грунта сопровождается интенсивным сегрегационным льдовыделением с образованием толстых ледяных шпиров, то в этом случае в твердом скелете происходит формирование трещин, вследствие чего для расчета деформации морозного пучения необходимо применять другие подходы, например, разрабатываемые в теории твердого льда. В связи со сделанными предположениями такой характер промерзания грунта не учитывается разрабатываемой моделью.

Система нелинейных дифференциальных уравнений массопереноса (1), теплопереноса (2) и равновесия (3) имплементирована в пакет Comsol Multiphysics®. Уравнение массопереноса вносилось в пакет с помощью Weak Form PDE интерфейса, позволяющего дискретизировать задачу в слабой формулировке с использованием выбранных базисных функций. Для решения уравнений теплопереноса и равновесия применялись модули Heat Transfer и Solid Mechanics. Пористость n , температура T и вектор перемещений \mathbf{u} рассматривались в качестве неизвестных полевых переменных, которые определялись из численного решения уравнений (1)–(3). Пространственная дискретизация уравнений выполнялась методом конечных элементов. Пористость n и температура T аппроксимировались линейными полиномами Лагранжа, а перемещение \mathbf{u} — квадратичным полином Лагранжа. Дискретизация по времени осуществлялась на основе неявной схемы Эйлера. Решение дискретного аналога исходной задачи, представляющего собой систему нелинейных алгебраических уравнений, производилось численно с помощью метода Ньютона.

3. Результаты численного моделирования

Проверка адекватности и работоспособности разработанной термогидромеханической модели применительно к процессу промерзания влагонасыщенных грунтов выполнена путем численного моделирования двух лабораторных экспериментов. Результаты первого эксперимента — одностороннего замораживания образцов алевитистой глины в условиях открытой системы — взяты из работы [27].

Второй эксперимент проведен авторами настоящей статьи. В данном эксперименте с помощью волоконно-оптических датчиков исследовалось деформирование песка при его радиальном замораживании.

3.1. Численное моделирование одностороннего замораживания (эксперимент 1)

Во взятом для численного моделирования эксперименте 1 — лабораторном эксперименте Y. Lai с соавторами [27], выполнялось одностороннее искусственное замораживание цилиндрических образцов алевролитистой глины в условиях открытой системы. Диаметр и высота каждого образца составляли 10 см. На их верхних и нижних торцах поддерживались постоянные отрицательная и положительная температуры. Также к нижнему торцу обеспечивался приток воды. Боковые поверхности образцов были теплоизолированы. Выбор этой работы обусловлен тем, что представленная в ней одномерная термогидромеханическая модель промерзания грунта послужила основой для построения модели, описанной в разделе 2.

При проведении численного моделирования рассмотрено два режима замораживания. При замораживании в условиях первого температурного режима на верхнем торце образцов поддерживалась отрицательная температура $T_{fr} = -1,6^\circ\text{C}$, а на нижнем — положительная температура $T_w = 1,0^\circ\text{C}$. Во втором режиме температура замораживания T_{fr} на верхнем торце составляла $-4,0^\circ\text{C}$, а на нижнем торце поддерживалась $T_w = 1,5^\circ\text{C}$. При обоих режимах к верхним торцам образцов прикладывалась внешняя осевая нагрузка P_{ob} , равная, соответственно, 50 и 100 кПа.

Условия экспериментов обеспечивали однонаправленное промерзание образцов грунта от верхнего торца к нижнему. Исходя из этого расчетная область представляла собой прямоугольник, совпадающий с половиной осевого сечения цилиндра, которая разбивалась на 620 четырехугольных элементов. Оптимальный размер расчетной сетки определялся по результатам анализа сеточной сходимости.

На верхней границе прямоугольника температура T_{fr} и пористость n_b были постоянны. Согласно [26], предполагалось, что в начале охлаждения поровая влага, содержащаяся в грунте вблизи верхнего торца образца, быстро кристаллизуется в лед в отсутствие притока дополнительной влаги со стороны незамороженной зоны. Поскольку при кристаллизации воды ее объем увеличивается примерно на 9%, то величина пористости грунта вблизи верхнего торца в 1,09 раз возрастает по сравнению с начальным значением. Вследствие этого пористость n_b равнялась $1,09n_0$, где n_0 — начальная пористость. На нижней границе расчетной области поддерживались постоянная положительная температура T_w и начальная пористость n_0 , так как в этом эксперименте к нижнему торцу образца обеспечивался приток воды. На стороне прямоугольника, отвечающей наружной цилиндрической поверхности образцов, тепловой и массовый потоки полагались нулевыми. На стороне прямоугольника, совпадающей с осью образцов, накладывалось условие симметрии. Для расчета напряженно-деформированного состояния грунта в процессе промерзания на верхнюю границу прямоугольника действовала вертикальная нагрузка P_{ob} , на боковых сторонах перемещение разрешалось только в вертикальном направлении (по оси z), на нижней границе перемещение ограничивалось во всех направлениях.

Начальная температура образца T_0 составляла: $3,0^\circ\text{C}$ для первого режима замораживания и $2,6^\circ\text{C}$ для второго режима. Теплофизические параметры воды и льда представлены в таблице 1. Материальные параметры алевролитистой глины приведены в таблице 2. Значения теплофизических и упругих характеристик взяты из [27]. Недостающие параметры модели определялись путем проведения последовательной серии расчетов.

Таблица 1. Теплофизические свойства воды и льда

ρ_l , кг/м ³	λ_l , Вт/(м·К)	c_l , кДж/(кг·К)	ρ_i , кг/м ³	λ_i , Вт/(м·К)	c_i , кДж/(кг·К)	L , кДж/кг
1000	0,58	4,18	917	2,22	2,043	334,56

Таблица 2. Материальные параметры алевролитистой глины

n_0 , м ³ /м ³	ρ_s , кг/м ³	λ_s , Вт/(м·К)	c_s , Дж/(кг·К)	k_0 , м/с	α	β	α_T , 1/К	c , кПа
0,32	2360	1,5	1000	$1,58 \cdot 10^{-10}$	-3,0	-3,8	$2,0 \cdot 10^{-6}$	14,0
φ , град	K_{in} , МПа	G_{in} , МПа	N_{in} , МПа	b_{in}	K_{fr} , МПа	G_{fr} , МПа	N_{fr} , МПа	b_{fr}
18	2,75	1,05	18,4	0,75	8,60	3,30	18,7	0,73

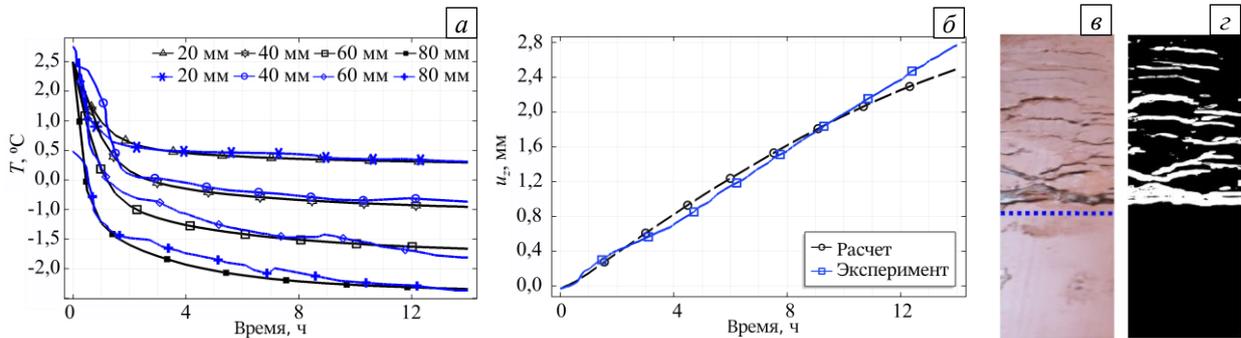


Рис. 1. Первый режим замораживания; рассчитанные экспериментальные графики изменения со временем температуры в точках, расположенных внутри образца на высоте 20, 40, 60, 80 мм от нижнего торца (верхний ряд маркеров обозначает рассчитанные кривые) (а), и вертикального перемещения u_z верхнего торца образца при $P_{об} = 50$ кПа (б); образец алевролитистой глины с ледяными шлирами на фотографии (в) и его бинарный вид (г) (изображения взяты из [27])

Рисунок 1 содержит графики изменения со временем температуры T во внутренних точках образцов и вертикального перемещения u_z верхнего торца, полученные в результате численного моделирования искусственного замораживания образца в условиях первого температурного режима. Данные отвечают периоду времени 14 часов, после этого температура в образце стабилизировалась, а увеличение перемещения u_z происходило только за счет роста толщины финального ледяного шлира, расположенного вблизи фронта промерзания.

Из представленных на рисунке 1а графиков эволюции температуры видно, что в первые 2 часа замораживания происходит быстрое падение температуры во всех рассматриваемых точках. После этого наступает стадия медленного и плавного снижения температуры до минимально возможной. Вследствие малого значения температуры замораживания ($T_{fr} = -1,6$ °C) переход температуры ниже отметки 0 °C совершается только в двух точках: на высоте 60 и 80 мм вблизи верхнего торца образца. Процесс замораживания грунта в данных точках протекает плавно, с постепенным фазовым переходом поровой влаги в лед. В двух других точках, на высоте 20 и 40 мм, расположенных ближе к нижнему торцу, температура стабилизируются быстрее, что обусловлено более интенсивной компенсацией потери тепла за счет теплопритока со стороны незамороженного грунта.

В точках на высоте 60 и 80 мм видны колебания измерений. При этом рассчитанная величина температуры имеет наибольшее отклонение от экспериментальных данных. Экспериментальные кривые, построенные по измерениям в точках, находящихся дальше от верхнего торца, имеют меньшие колебания. Для этих точек наблюдается минимальное расхождение между вычисленной и экспериментальной кривыми изменения температуры со временем.

Из представленного на рисунке 1б графика изменения со временем вертикального перемещения u_z верхнего торца видно, что он монотонно поднимается. Отсюда следует, что при замораживании происходит объемное расширение грунта, вызванное морозным пучением вследствие фазового перехода воды в лед и дополнительным притоком воды со стороны нижнего торца образца. Величина перемещения u_z , полученная в численном расчете, хорошо согласуется с экспериментальными измерениями в течение 10 часов. После этого рассчитанная величина перемещения становится меньше измеренной по причине значительного увеличения толщины финального ледяного шлира, который не может быть описан разработанной моделью (Рис. 1в).

Аналогичные результаты для второго температурного режима замораживания показаны на рисунке 2. Как и в предыдущем случае, данные приводятся до момента стабилизации температуры, здесь — для периода 20 ч. По сравнению с первым режимом замораживания, температуры в точках внутри образца при втором режиме стабилизируются медленней, что связано с более глубоким промерзанием грунта вследствие большей величины температуры замораживания: $T_{fr} = -4,0$ °C. Также в данном случае графики эволюции температуры, построенные по данным расчета в точках, расположенных вблизи верхнего торца на высоте 60 и 80 мм, лучше согласуются с экспериментальными кривыми. Это может быть связано с повышением интенсивности замораживания, что способствует меньшему колебанию температуры и более быстрому образованию льда без значительного переохлаждения воды. Наибольшее отклонение вычисленной температуры от измеренной наблюдается в точке, находящейся на расстоянии 40 мм от верхнего торца. Здесь рассчитанная температура плавно уменьшается со временем, тогда как в эксперименте температура быстро стабилизируется.

Замораживание грунта при более низкой температуре и большей вертикальной нагрузке, с одной стороны, приводит к ускорению промерзания грунта, а с другой, — к формированию массивной криогенной структуры без толстых ледяных шлиров. Сравнение кривых на рисунке 2б позволяет

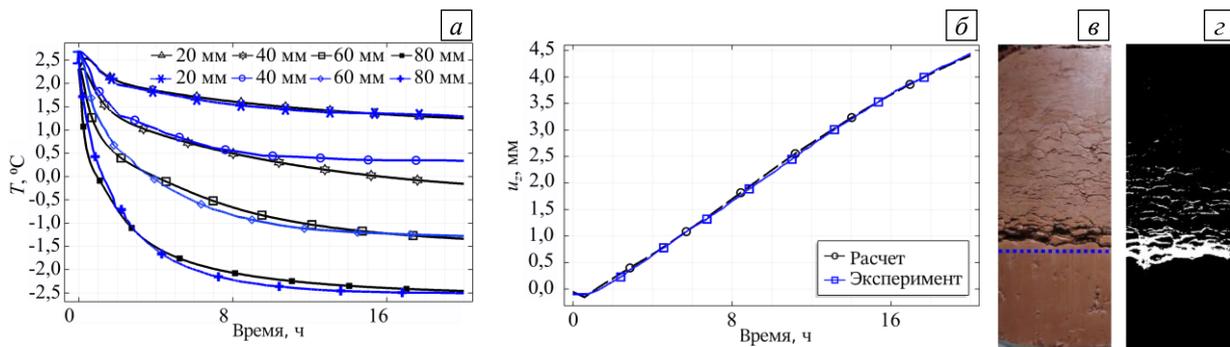


Рис. 2. Второй режим замораживания: рассчитанные и экспериментальные графики изменения со временем температуры в точках внутри образца, расположенных на высоте 20, 40, 60, 80 мм от нижнего торца (верхний ряд маркеров обозначает рассчитанные кривые) (а) и вертикального перемещения u_z верхнего торца образца при $P_{об} = 50$ кПа; образец алевролитистой глины с ледяными шлирами на фотографии (в) и его бинарный вид (г) (изображения взяты из [27])

заключить, что в данном случае рассчитанная зависимость изменения со временем вертикального перемещения u_z достаточно точно совпадает с построенной по экспериментальным данным. В первый час замораживания на обеих кривых наблюдается участок, в пределах которого перемещение u_z остается постоянным, что свидетельствует о сдерживании морозного пучения внешней вертикальной нагрузкой. После превышения силами морозного пучения грунта величины внешней нагрузки перемещение u_z монотонно увеличивается. Спустя 20 часов замораживания в образце возникает финальный ледяной шпир, поэтому дальнейшее численное моделирование не проводится (Рис. 2в, г).

Характер промерзания грунта с массивным льдообразованием без формирования толстых ледяных шпиров, наблюдаемый при втором режиме замораживания (Рис. 2в), до стабилизации температуры в образце хорошо соответствует предположениям, сделанным при разработке модели. Проведенное сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает, что в этом случае модель достаточно точно описывает увеличение высоты замораживаемого образца вследствие морозного пучения с максимальным отклонением менее 0,07 мм. В тоже время результаты численного моделирования медленного промерзания образца грунта с малой температурой замораживания предсказывают заниженную величину перемещения верхнего торца образца с максимальным отклонением менее 0,26 мм, что обусловлено формированием толстых ледяных шпиров (Рис. 1в). Рассчитанное изменение со временем температуры внутри образцов для обоих режимов замораживания имеет приемлемое (с величиной отклонения в замороженной зоне не более 0,35°C) согласование с измерениями.

3.2. Численное моделирование радиального замораживания (эксперимент 2)

В разделе 3.1 рассматривается эксперимент по искусственному замораживанию образцов алевролитистой глины, для которой характерна интенсивная миграция влаги в замороженную зону, вызванная криогенным всасыванием. Однако во многих геотехнических задачах, связанных с подземным строительством в сложных гидрогеологических условиях, возникает необходимость в искусственном замораживании обводненных песчаных грунтов. Песчаные грунты состоят из более крупных, по сравнению с глинами, минеральных частиц, вследствие чего их морозное пучение в значительной степени обусловлено объемным расширением замерзающей воды, изначально содержащейся в поровом пространстве. При этом миграция влаги к фронту промерзания выражена слабо либо полностью отсутствует.

Для того чтобы исследовать, способна ли модель описывать деформирование грунта под воздействием сил морозного пучения, вызванных объемным расширением воды при ее фазовом переходе в лед, выполнено численное моделирование эксперимента по радиальному замораживанию влагонасыщенного кварцевого песка в условиях закрытой системы. Перечислим ключевые особенности эксперимента 2.

Насыщенный дистиллированной водой песок помещался в жесткий пластиковый контейнер 1, имеющий форму цилиндра с толщиной стенки 28 мм (Рис. 3а). Снизу и сверху контейнер закрывался крышками толщиной 2 мм. По оси контейнера устанавливалась медная трубка 2. Получающийся после упаковки песка образец грунта в итоге представлял собой полый цилиндр высотой 5 мм, с внутренним и внешним радиусами 10 и 57 мм. Радиальное замораживание грунта осуществлялось хладагентом, циркулирующим по медной трубке (Рис. 3б). Кроме этого, охлаждающая система состояла из теплоизолированного короба, морозильного ларя, расширительного бачка и насоса. Во время эксперимента пластиковый контейнер с песком находился внутри теплоизолированной камеры, чтобы уберечь грунт от внешнего притока тепла со стороны окружающей среды. Медная трубка в центре контейнера соединялась с насосом и расширительным бачком, заполненным хладагентом. Расширительный бачок устанавливался внутри морозильного ларя, где поддерживалась постоянная температура около -30°C . Циркуляция хладагента по медной трубке обеспечивалась насосом.

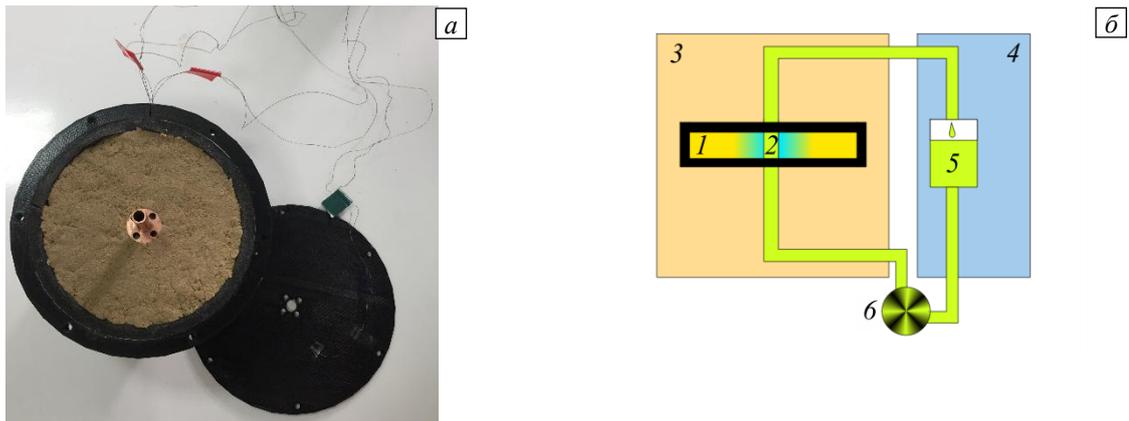


Рис. 3. Фотография (вид сверху) пластмассового контейнера, заполненного влагонасыщенным песком (а); схема охлаждающей системы (б): контейнер с грунтом (1), медная трубка (2), теплоизолированный короб (3), морозильный ларь (4), расширительный бачок с хладагентом (5), насос (6)

В процессе замораживания грунта проводилось измерение его температуры и смещения в радиальном направлении. Измерение температуры в грунте выполнялось с помощью трех термопар (см. Рис. 4а). Первая термопара TC1 находилась на медной трубке, чтобы отслеживать температуру замораживания грунта T_{fr} . Вторая термопара TC2 располагалась на внутренней боковой поверхности пластикового контейнера. Третья термопара TC3 прикреплялась к датчику деформации BR. Датчик помещался в толщу грунтового образца на высоте 2,5 мм от его нижней поверхности и на расстоянии 28 мм от центра пластикового контейнера. Схема датчика деформации показана на рисунке 4б.

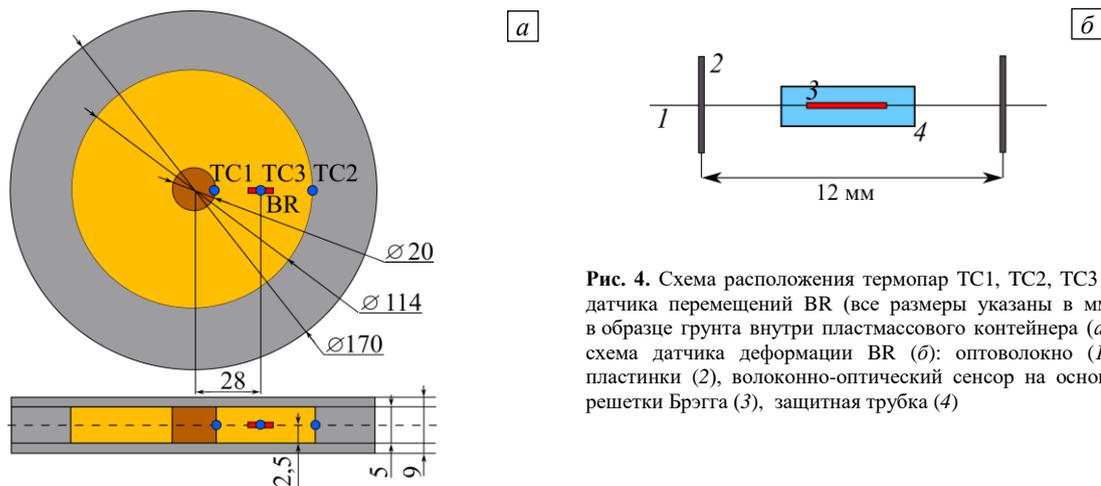


Рис. 4. Схема расположения термопар TC1, TC2, TC3 и датчика перемещений BR (все размеры указаны в мм) в образце грунта внутри пластмассового контейнера (а); схема датчика деформации BR (б): оптоволокно (1), пластинки (2), волоконно-оптический сенсор на основе решетки Брэгга (3), защитная трубка (4)

Предполагалось, что вызванное замораживанием деформирование грунта в точках расположения пластинок датчика приводило к их перемещению, которое регистрировалось чувствительным элементом — волоконно-оптическим сенсором. Для защиты сенсора от механического воздействия грунта он помещался в металлическую трубку, что позволяло предотвратить изгиб оптоволокну в месте его нахождения и связанное с этим изменение спектральной картины сигнала. Температурная компенсация показаний волоконно-оптического элемента выполнялась с использованием измерений температуры, полученных с помощью термопары TC3.

Для согласования с условиями эксперимента 2 численный расчет промерзания грунта проводился в осесимметричной постановке для прямоугольной области, совпадающей по размерам с сечением, проходящим через перпендикулярную плоскости наблюдателя ось вращения z пластикового контейнера, показанного на рисунке 4а. Расчетная сетка состояла из 820 четырехугольных элементов. Оптимальный размер сетки определялся путем анализа сеточной сходимости.

Теплофизические параметры воды и льда приведены в таблице 1, материальные параметры кварцевого песка — в таблице 3. Начальная температура T_0 грунта равнялась $24,0^{\circ}\text{C}$. Показания термопары TC1, представленные на рисунке 5а, задавались в качестве температуры замораживания T_{fr} на боковой границе расчетной области, соответствующей границе медной трубки. На этой границе пористость n_b предполагалась равной $1,09n_0$, а перемещения ограничивались в радиальном направлении. Для того чтобы учесть потери тепла, на внешние границы накладывались граничные условия третьего рода

Таблица 3. Материальные параметры кварцевого песка

n_0 , м ³ /м ³	ρ_s , кг/м ³	λ_s , Вт/(м·К)	c_s , Дж/(кг·К)	k_0 , м/с	α	β	α_T , 1/К
0,35	1850	1,3	800	$3,5 \cdot 10^{-4}$	-5,5	-12,0	$1,0 \cdot 10^{-6}$
$K_{ин}$, МПа	$G_{ин}$, МПа	$N_{ин}$, МПа	$b_{ин}$	K_{fr} , МПа	G_{fr} , МПа	N_{fr} , МПа	b_{fr}
154	4,62	7,13	0,89	722	615	8,92	0,86

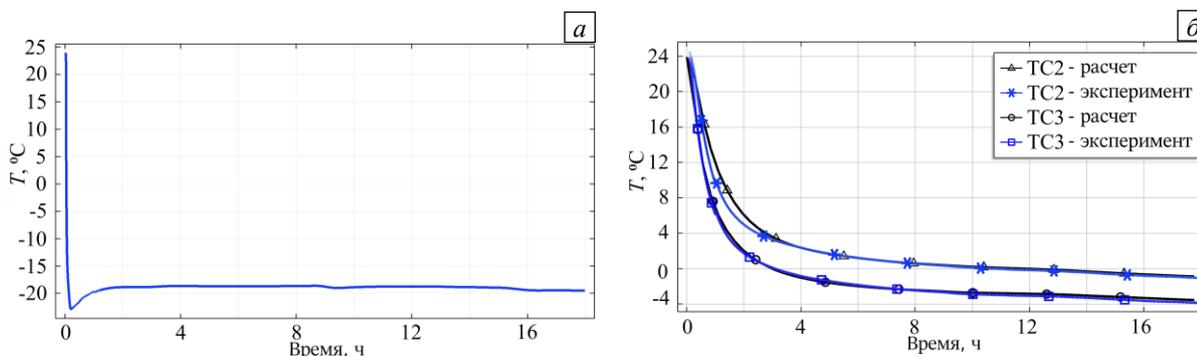


Рис. 5. Графики изменения во времени температуры замораживания T_{fr} , соответствующей показаниям термопары TC1 (а) и температуры T (б), измеренной термопарами TC2, TC3 и рассчитанной

с коэффициентом теплообмена $0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ на вертикальной границе расчетной области, соотносящейся с боковой поверхностью контейнера, $1,64 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $0,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ — на верхней и нижней сторонах, имитирующих в расчете крышки контейнера. Податливость стенок контейнера вводилась путем задания на границе контакта между грунтом и контейнером условия упругого основания с параметром жесткости $0,72 \text{ ГПа}/\text{м}$ на вертикальной границе и $0,12 \text{ ГПа}/\text{м}$ — на верхней и нижней горизонтальных границах.

Рисунок 5б содержит изменение во времени температуры на внешней границе образца грунта и на датчике перемещений, измеренное термопарами TC2, TC3 и найденные численно. Рассчитанные графики температуры демонстрируют хорошее качественное и количественное соответствие кривым, построенным по данным эксперимента 2. Максимальное отклонение между рассчитанной и измеренной температурами имеет место в начале процесса охлаждения в точке положения термопары TC2 и составляет 2°C .

Минимальное значение температуры, измеренное термопарами TC2 и TC3, равняется -2 и -4°C . Падение температуры грунта от начальной величины в 24°C до 0 в точке с термопарой TC3 происходит за первые 3 часа замораживания, тогда как за последующие 15 часов температура уменьшается всего до -4°C . В точке с термопарой TC2 температура грунта достигает 0°C за 10,5 часов, а за оставшиеся 8 часов замораживания температура падает лишь до -2°C .

Наблюдаемое снижение скорости промерзания обусловлено увеличением объема незамороженного влагонасыщенного грунта, примыкающего к фронту промерзания по мере его отдаления от замораживающей медной трубки. Поскольку это приводит к повышению теплопритока к замороженной зоне и выделению дополнительного количества скрытой теплоты кристаллизации, то распространение фронта промерзания замедляется.

Рисунок 6 содержит кривые изменения со временем радиальной деформации; одна из них построена по показаниям деформационного датчика, другая — по результатам численного моделирования. Из сравнения рассчитанного и экспериментального графиков можно заключить, что они хорошо согласуются. Анализ представленных данных позволяет сделать некоторые выводы о характере деформирования грунта в процессе промерзания.

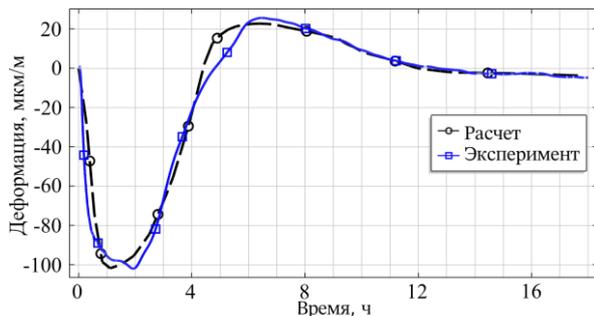


Рис. 6. Изменение со временем радиальной деформации, полученное в результате расчета и измеренное деформационным датчиком BR

Итак, в начале процесса охлаждения грунт в местах расположения пластинок деформационного датчика BR находится в незамороженной зоне. Вследствие механического воздействия сил морозного пучения, возникающих в замороженной зоне возле медной трубки, и отрицательной температурной деформации, вызванной уменьшением температуры, незамороженный грунт в указанной области сжимается, о чем свидетельствует отрицательная радиальная деформация. При распространении фронта промерзания до места расположения датчика

ВР происходит объемное расширение грунта, связанное с фазовым переходом поровой воды в лед, которое характеризуется увеличением радиальной деформации. После того как датчик полностью оказывается в замороженной зоне, наблюдается уменьшение радиальной деформации, вызванное сжатием уже замороженного грунта силами морозного пучения, являющимися реакцией на сдерживание объемного расширения вновь промерзающего грунта стенками пластмассовой формы. Однако по причине более высокой жесткости грунта в замороженном состоянии уменьшение радиальной деформации не так значительно, как в начале эксперимента. Следует отметить, что аналогичное механическое поведение промерзающей горной породы зафиксировано с помощью тензодатчиков в эксперименте по замораживанию известняка, результаты которого представлены в [39].

В отличие от экспериментов с односторонним замораживанием грунта, которые направлены на исследование особенностей процесса промерзания грунта на территориях с холодным климатом, описанная экспериментальная установка, которую используют авторы данной работы, позволяет воссоздавать условия промерзания грунта вокруг замораживающей колонки, применяемой для искусственного замораживания породного массива при строительстве подземных сооружений. Создаваемое пластиковым контейнером ограничение объемного расширения промерзающего грунта имитирует ситуацию, когда искусственно замораживаемый грунтовый слой сверху и снизу заключен между жесткими породными слоями, а с боковой стороны перемещение грунта сдерживается окружающей незамороженной грунтовой толщей.

4. Заключение

В работе предложена термогидромеханическая модель промерзания влагонасыщенного грунта. В модели предполагается, что грунт является трехфазной пористой средой, состоящей из частиц грунта, жидкой воды и льда. Процесс промерзания грунта описывается системой нелинейных уравнений массопереноса, теплопереноса и равновесия, выражающих такие фундаментальные законы механики сплошных сред, как законы сохранения массы, энергии и импульса. Для связывания уравнений между собой используется уравнение Клаузиуса–Клапейрона, определяющие соотношения поромеханики вместе с выражением для эффективного напряжения вида Бишопа, а также эмпирические зависимости льдонасыщенности, влагопроводности, теплофизических и механических свойств от температуры и пористости. Кроме этого, в модель включен ассоциированный закон пластического течения для расчета неупругой объемной деформации, которая возникает при растяжении грунта под воздействием порового давления льда.

Компьютерная реализация модели выполнена в конечно-элементном программном пакете Comsol Multiphysics® с использованием стандартных интерфейсов. Применимость разработанной термогидромеханической модели к описанию процесса промерзания влагонасыщенных грунтов продемонстрирована путем численного моделирования двух лабораторных экспериментов при различных температурных режимах замораживания. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– в эксперименте 1 по одностороннему замораживанию образцов алевролитистой глины в условиях открытой системы при двух температурных режимах с различной величиной вертикальной нагрузки модель позволяет отобразить как эволюцию температуры внутри образца, так и увеличение абсолютной деформации морозного пучения грунта с течением времени до момента стабилизации температуры. Установлено, что при промерзании образца грунта с формированием массивной криогенной структуры в отсутствие толстых ледяных шпиров результаты численного моделирования более точно предсказывают величину абсолютной деформации морозного пучения, чем в случае промерзания с образованием толстых ледяных шпиров;

– в эксперименте 2 по радиальному замораживанию влагонасыщенного песка в стесненных условиях модель позволяет прогнозировать в грунте изменение температуры со временем и характер его деформирования. Рассчитанные и экспериментальные кривые изменения со временем температуры в точках грунта, расположенных внутри образца и на его границе, хорошо соответствуют друг другу. Кривая деформации грунта в радиальном направлении в процессе промерзания, установленная путем численного моделирования, достаточно точно описывает измерения, осуществленные с помощью волоконно-оптического датчика. При этом наблюдается увеличение количественного расхождения между рассчитанной и экспериментальной кривыми в начале замораживания и при локальном переходе грунта из состояния сжатия в состояние растяжения.

Теоретические исследования в разделах 2 и 3.1 выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-31-90107); экспериментальные исследования в разделе 3.2 выполнены при поддержке Министерства образования и науки Пермского края (соглашение № С-26/563 от 23 марта 2021 года).

Литература

1. *Киселев М.Ф.* Предупреждение деформации грунтов от морозного пучения. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 130 с.
2. *Таюкин Г.И., Фурсов В.В., Балюра М.В.* Воздействие сезонного промерзания грунтов на фундаменты строящихся объектов (терминал хранения сжиженных углеводородов) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 6. С. 186-198. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-6-186-198>
3. *Yang B., Qin Z., Zhou Q., Li H., Li L., Yang X.* Pavement damage behaviour of urban roads in seasonally frozen saline ground regions // Cold Regions Sci. Tech. 2020. Vol. 174. 103035. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103035>
4. *Long X., Cen G., Cai L., Chen Y.* Model experiment of uneven frost heave of airport pavement structure on coarse-grained soils foundation // Construct. Build. Mater. 2018. Vol. 188. P. 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.100>
5. *Горелик Я.Б.* Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением пород промерзающего слоя // Криосфера Земли. 2010. Т. 14, № 1. С. 50-62.
6. *Teng Z.-C., Liu X.-Y., Liu Y., Zhao Y.-X., Liu K.-Q., Teng Y.-C.* Stress-strain assessments for buried oil pipelines under freeze-thaw cyclic conditions // J. Pressure Vessel Technol. 2021. Vol. 143(4). 041803. <https://doi.org/10.1115/1.4049712>
7. *Cai H., Li S., Liang Y., Yao Z., Cheng H.* Model test and numerical simulation of frost heave during twin-tunnel construction using artificial ground-freezing technique // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 115. 103155. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103155>
8. *Zhou J., Zhao W., Tang Y.* Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 107. 103647. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103647>
9. *Хакимов Х.Р.* Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1957. 191 с.
10. *Ким В.Х., Орлов В.О.* Метод оценки давления морозного пучения грунта на ледогрунтовое ограждение подземного сооружения // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1988. № 3. С. 25-28. (English version <https://doi.org/10.1007/BF01709718>)
11. *Ji Y., Zhou G., Hall M.R.* Frost heave and frost heaving-induced pressure under various restraints and thermal gradients during the coupled thermal-hydro processes in freezing soil // Bull. Eng. Geol. Environ. 2019. Vol. 78. P. 3671-3683. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1345-z>
12. *Сумгин М.И.* Физико-механические процессы во влажных и мерзлых грунтах в связи с образованием пучин на дорогах. М.: Транспечать НКПС, 1929. 592 с.
13. *Taber S.* Frost heaving // J. Geol. 1929. Vol. 37. No. 5. P. 428-461.
14. *Taber S.* The mechanics of frost heaving // J. Geol. 1930. Vol. 38. No. 4. P. 303-317.
15. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1973. 448 с.
16. *Hoekstra P.* Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing // Water Resour. Res. 1966. Vol. 2. P. 241-250. <https://doi.org/10.1029/WR002i002p00241>
17. *Penner E., Gold L.W.* Transfer of heaving forces by adfreezing to columns and foundation walls in frost-susceptible soils // Canadian Geotechnical Journal. 1971. Vol. 8. P. 514-526. <https://doi.org/10.1139/t71-053>
18. *Иванов Н.С.* Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1969. 240 с.
19. *Harlan R.L.* Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil // Water Resour. Res. 1973. Vol. 9. P. 1314-1323. <https://doi.org/10.1029/WR009i005p01314>
20. *O'Neill K., Miller R.D.* Exploration of a rigid ice model of frost heave // Water Resour. Res. 1985. Vol. 21. P. 281-296. <https://doi.org/10.1029/WR021i003p00281>
21. *Coussy O.* Poromechanics of freezing materials // J. Mech. Phys. Solid. 2005. Vol. 53. P. 1689-1718. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.04.001>
22. *Zhou M.M., Meschke G.* A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2013. Vol. 37. P. 3173-3193. <https://doi.org/10.1002/nag.2184>
23. *Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F.* Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: Application in mining engineering // Rock Mech. Rock Eng. 2019. Vol. 52. P. 3889-3907. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01786-9>
24. *Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J.* THM-coupled finite element analysis of frozen soil: Formulation and application // Géotechnique. 2009. Vol. 59. P. 159-171. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.159>
25. *Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadivar M., Nordal S.* Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53. P. 1646-1657. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0467>
26. *Zhou J., Li D.* Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil // Cold Regions Sci. Tech. 2012. Vol. 72. P. 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.006>
27. *Lai Y., Pei W., Zhang M., Zhou J.* Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil // Int. J. Heat Mass Tran. 2014. Vol. 78. P. 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
28. *Arzanfudi M.M., Al-Khoury R.* Freezing-thawing of porous media: An extended finite element approach for soil freezing and thawing // Adv. Water Resour. 2018. Vol. 119. P. 210-226. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.07.013>
29. *Коселева Н.А., Сероваев Г.С.* Моделирование напряженного состояния в окрестности встроенного в полимерный композиционный материал оптического волокна с учетом структурных особенностей композита // Вычисл. мех. сплош. сред. 2017. Т. 10, № 4. С. 466-473. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2017.10.4.38>
30. *Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S.* Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // Compos. Struct. 2020. Vol. 239. 111844. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844>
31. *Ren G., Li T., Hu Z., Zhang C.* Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering // Optik. 2019. Vol. 185. P. 759-771. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.019>

32. Желнин М.С., Прохоров А.Е., Костина А.А., Плехов О.А. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 4. С. 19-28. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.02>
33. Zhao X., Lv X., Wang L., Zhu Y., Dong H., Chen W., Li J., Ji B., Ding Y. Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze-thaw tests // Cold Regions Sci. Tech. 2015. Vol. 116. P. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.04.007>
34. Wang M., Li X., Chen L., Hou S., Wu G., Deng Z. A modified soil water content measurement technique using actively heated fiber optic sensor // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 12. P. 608-619. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.11.003>
35. Sun M.-Y., Shi B., Zhang D., Liu J., Guo J.Y., Wei G.-Q., Cheng W. Study on calibration model of soil water content based on actively heated fiber-optic FBG method in the in-situ test // Measurement. 2020. Vol. 165. 108176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108176>
36. Thomas H.R., Cleall P., Li Y.-C., Harris C., Kern-Luetsch M. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils // Géotechnique. 2009. Vol. 59. P. 173-184. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.173>
37. Nixon J.F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils // Canadian Geotechnical Journal. 1991. Vol. 28. P. 843-859. <https://doi.org/10.1139/t91-102>
38. Mu S., Ladanyi B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil // Cold Regions Sci. Tech. 1987. Vol. 14. P. 237-246. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(87\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0165-232X(87)90016-4)
39. Tounsi H., Rouabhi A., Jahangir E. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 119. 103382. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103382>

References

1. Kiselev M.F. *Preduprezhdeniye deformatsii gruntov ot moroznogo pucheniya* [Prevention of ground deformation due to frost heave]. Leningrad, Stroyizdat. Leningr. otd-niye, 1985. 130 p.
2. Tayukin G.I., Fursov V.V., Balura M.V. Seasonal soil freezing impact on foundations of buildings (liquefied hydrocarbon depot terminal). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*, 2019, no. 6, pp. 186-198. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-6-186-198>
3. Yang B., Qin Z., Zhou Q., Li H., Li L., Yang X. Pavement damage behaviour of urban roads in seasonally frozen saline ground regions. *Cold Regions Sci. Tech.*, 2020, vol. 174, 103035. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103035>
4. Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Model experiment of uneven frost heave of airport pavement structure on coarse-grained soils foundation. *Construct. Build. Mater.*, 2018, vol. 188, pp. 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.100>
5. Gorelik J.B. Metody rascheta deformatsiy inzhenernykh konstruktсий, vyzvannykh pucheniem porod promerzayushchego sloya [On the calculation methods of the engineering construction displacements caused by freezing layer frost heave process]. *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*, 2010, vol. 14, no. 1, pp. 50-62.
6. Teng Z.-C., Liu X.-Y., Liu Y., Zhao Y.-X., Liu K.-Q., Teng Y.-C. Stress-strain assessments for buried oil pipelines under freeze-thaw cyclic conditions. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2021, vol. 143(4), 041803. <https://doi.org/10.1115/1.4049712>
7. Cai H., Li S., Liang Y., Yao Z., Cheng H. Model test and numerical simulation of frost heave during twin-tunnel construction using artificial ground-freezing technique. *Computers and Geotechnics*, 2019, vol. 115, 103155. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103155>
8. Zhou J., Zhao W., Tang Y. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, vol. 107, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103647>
9. Khakimov Kh.R. *Voprosy teorii i praktiki iskusstvennogo zamorazhivaniya gruntov* [Problems in the theory and practice of artificial freezing of soil]. Moscow, Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1957. 191 p.
10. Orlov V.O., Kim V.K. A method of evaluating the frost-heave pressure of soil against the ice-soil enclosure of an underground structure. *Soil Mech. Found. Eng.*, 1988, vol. 25, pp. 129-135. <https://doi.org/10.1007/BF01709718>
11. Ji Y., Zhou G., Hall M.R. Frost heave and frost heaving-induced pressure under various restraints and thermal gradients during the coupled thermal-hydro processes in freezing soil. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2019, vol. 78, pp. 3671-3683. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1345-z>
12. Sumgin M.I. *Fiziko-mekhanicheskiye protsessy vo vlazhnykh i merzlykh gruntakh v svyazi s obrazovaniyem puchin na dorogakh* [Physical and mechanical processes in wet and frozen soils in connection with the formation of abyss on the roads]. Moscow, Transpechat' NKPS, 1929. 592 p.
13. Taber S. Frost heaving. *J. Geol.*, 1929, vol. 37, no. 5, pp. 428-461.
14. Taber S. The mechanics of frost heaving. *J. Geol.*, 1930, vol. 38, no. 4, pp. 303-317.
15. Tsytovich N.A. *The mechanics of frozen ground*. McGraw-Hill, 1975. 426 p.
16. Hoekstra P. Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing. *Water Resour. Res.*, 1966, vol. 2, pp. 241-250. <https://doi.org/10.1029/WR002i002p00241>
17. Penner E., Gold L.W. Transfer of heaving forces by adfreezing to columns and foundation walls in frost-susceptible soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1971, vol. 8, pp. 514-526. <https://doi.org/10.1139/t71-053>
18. Ivanov N.S. *Teplo- i massoperenos v merzlykh gornykh porodakh* [Heat and mass transfer in frozen ground]. Moscow, Nauka, 1969. 240 p.
19. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resour. Res.*, 1973, vol. 9, pp. 1314-1323. <https://doi.org/10.1029/WR009i005p01314>
20. O'Neill K., Miller R.D. Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resour. Res.*, 1985, vol. 21, pp. 281-296. <https://doi.org/10.1029/WR021i003p00281>

21. Coussy O. Poromechanics of freezing materials. *J. Mech. Phys. Solid.*, 2005, vol. 53, pp. 1689-1718. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.04.001>
22. Zhou M.M., Meschke G. A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2013, vol. 37, pp. 3173-3193. <https://doi.org/10.1002/nag.2184>
23. Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: Application in mining engineering. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2019, vol. 52, pp. 3889-3907. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01786-9>
24. Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: Formulation and application. *Géotechnique*, 2009, vol. 59, pp. 159-171. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.159>
25. Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadivar M., Nordal S. Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, vol. 53, pp. 1646-1657. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0467>
26. Zhou J., Li D. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil. *Cold Regions Sci. Tech.*, 2012, vol. 72, pp. 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.006>
27. Lai Y., Pei W., Zhang M., Zhou J. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2014, vol. 78, pp. 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
28. Arzanfudi M.M., Al-Khoury R. Freezing-thawing of porous media: An extended finite element approach for soil freezing and thawing. *Adv. Water Resour.*, 2018, vol. 119, pp. 210-226. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.07.013>
29. Kosheleva N.A., Serovaev G.S. Modeling a stressed state in the vicinity of an optical fiber embedded in a polymer composite material with allowance for the structural features of the composite. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2018, vol. 59, pp. 1271-1278. <https://doi.org/10.1134/S0021894418070088>
30. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 239, 111844. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844>
31. Ren G., Li T., Hu Z., Zhang C. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering. *Optik*, 2019, vol. 185, pp. 759-771. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.019>
32. Zhelnin M.S., Prokhorov A.E., Kostina A.A., Plekhov O.A. Experimental and theoretical study of mechanical deformation of freezing saturated soil. *Vestnik PNIPU. Mekhanika – PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 4, pp. 19-28. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.02>
33. Zhao X., Lv X., Wang L., Zhu Y., Dong H., Chen W., Li J., Ji B., Ding Y. Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze-thaw tests. *Cold Regions Sci. Tech.*, 2015, vol. 116, pp. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.04.007>
34. Wang M., Li X., Chen L., Hou S., Wu G., Deng Z. A modified soil water content measurement technique using actively heated fiber optic sensor. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, vol. 12, pp. 608-619. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.11.003>
35. Sun M.-Y., Shi B., Zhang D., Liu J., Guo J.Y., Wei G.-Q., Cheng W. Study on calibration model of soil water content based on actively heated fiber-optic FBG method in the in-situ test. *Measurement*, 2020, vol. 165, 108176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108176>
36. Thomas H.R., Cleall P., Li Y.-C., Harris C., Kern-Luetsch M. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Géotechnique*, 2009, vol. 59, pp. 173-184. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.173>
37. Nixon J.F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1991, vol. 28, pp. 843-859. <https://doi.org/10.1139/t91-102>
38. Mu S., Ladanyi B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil. *Cold Regions Sci. Tech.*, 1987, vol. 14, pp. 237-246. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(87\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0165-232X(87)90016-4)
39. Tounsi H., Rouabhi A., Jahangir E. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 119, 103382. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103382>

Поступила в редакцию 14.04.2021; после доработки 26.04.2021; принята к опубликованию 28.04.2021

Сведения об авторах

Желнин Максим Сергеевич, мнс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: zhelnin.m@icmm.ru

Костина Анастасия Андреевна, кфмн, нс, ИМСС УрО РАН; e-mail: kostina@icmm.ru

Прохоров Александр Евгеньевич, мнс, ИМСС УрО РАН; e-mail: kostina@icmm.ru

Плехов Олег Анатольевич, дфмн, зам. дир. по науке, ИМСС УрО РАН; e-mail: roa@icmm.ru

Семин Михаил Александрович, ктн, нс, Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78а; e-mail: seminma@inbox.ru

Агутин Кирилл Алексеевич, нс, Институт природопользования НАН Беларуси, 220114, г. Минск, ул. Скорины, д. 1; e-mail: kirill.agutin@gmail.com