

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ**

УДК 551.328/340/345;624.131

DOI: 10.15372/KZ20220403

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПУЧИНИСТОГО ГРУНТА.
СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА****В.Г. Чеверев¹, С.А. Половков², Е.В. Сафронов¹, А.С. Чернятин²**¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии, лаборатория криолитогеоза, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; cheverev44@mail.ru, evgenii567@yandex.ru²Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), Центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, 117186, Москва, Севастопольский просп., 47а, Россия; PolovkovSA@niitm.transneft.ru, ChernyatinAS@niitm.transneft.ru

Дано обоснование выбора способов и устройств для физического лабораторного моделирования процесса промерзания и пучения грунтов с целью исследования их пучинистых свойств, а также параметров процесса промерзания для верификации разрабатываемых математических методов моделирования процесса. Рассматриваемые методы позволяют в промерзающих грунтах задавать и контролировать в автоматизированном режиме динамику температурного состояния, потоков тепла и воды, деформаций пучения и усадки, влажности и плотности, порового гидравлического давления и сегрегационного льдо-выделения путем применения цейтраферной видеосъемки, моделирования внешних механической и гидравлической нагрузок.

Ключевые слова: физическое моделирование, методы, устройства, промерзание, грунты, пучение, параметры процесса.

PHYSICAL MODELING OF FREEZING OF DEEP SOIL. METHODS AND DEVICES**V.G. Cheverev¹, S.A. Polovkov², E.V. Safronov¹, A.S. Chernyatin²**¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology, laboratory of cryolithogenesis, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; cheverev44@mail.ru²Scientific Research Institute of Pipeline Transport (Transneft Research Institute, LLC), center for monitoring and geoinformation systems of pipeline transport facilities, Sevastopolsky prosp. 47A, Moscow, 117186, Russia

We give the substantiation of the choice of methods and devices for physical laboratory modeling of the process of freezing and heaving of soils in order to study their heaving properties, as well as the parameters of the freezing process to verify the developed mathematical methods of the process modeling. The methods under consideration make it possible in freezing soils to set and control in automated mode the dynamics of the temperature state, the heat and water flows, the sheaving and shrinkage deformations, the moisture and density, the pore hydraulic pressure and the segregation ice release through the use of time-lapse video recording, the simulation of external mechanical and hydraulic loads.

Key words: physical modeling, methods, devices, freezing, soils, heaving, process parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Морозное пучение промерзающих грунтов является опасным геокриологическим процессом для зданий и инженерных сооружений на территории распространения мерзлых грунтов. Поэтому прогноз и управление этим процессом весьма актуальны.

В настоящее время, несмотря на многолетние исследования механизма и закономерностей процесса пучения и поиск методов снижения негативного влияния на сооружения, проблема прогноза этого процесса пока далека от окончательного ре-

шения. Предложен ряд математических формул и уравнений тепло- и массообмена и деформаций в промерзающих грунтах для полуэмпирического и численного методов прогноза процесса промерзания и пучения грунтов, которые пока не нашли экспериментального подтверждения. В существенном развитии нуждается физическая постановка задачи для математического моделирования процесса промерзания и пучения, в которой учитывались бы все основные факторы этого сложного процесса.

Для верификации физической постановки численной математической модели промерзания и пучения грунтов с учетом тепломассопереноса, льдообразования, деформаций пучения и усадки, порового давления нужны результаты лабораторного физического моделирования, а для их получения необходимы соответствующие способы и устройства.

Для определения методически важных характеристик и параметров при проведении физического моделирования процесса промерзания грунтов необходимо рассмотреть механизм их морозного пучения.

Деформации пучения промерзающих грунтов обусловлены протеканием комплекса тепло- и массообменных, физико-химических и физико-механических процессов, зависящих от свойств грунтов и внешних термодинамических условий.

Общая деформация пучения складывается из разнонаправленных деформаций, обусловленных сегрегационным льдовыделением, усадкой и расширением, что может быть выражено следующим уравнением [Методы..., 2004]:

$$H = h_f + h_{iw} - h_s, \quad (1)$$

где H – результирующая деформация пучения; h_f – деформация расширения за счет фазового перехода вода–лед в грунте; h_{iw} – деформация расши-

рения грунта за счет замерзания воды, пришедшей из талой в мерзлую зону путем криогенной миграции, включая поток воды через талую зону транзитом из нижележащего водоносного горизонта; h_s – деформация усадки талой зоны за счет оттока воды в мерзлую зону в количестве, превышающем влажность предела усадки.

На рис. 1 представлена в общем виде многослойная динамическая структура промерзающего образца тонкодисперсного грунта. В ней выделяются мерзлая и талая зоны. В мерзлой зоне имеются два слоя – мерзлый и промерзающий. В талой зоне выделяется слой транзитного влагопереноса и слой с начальной влажностью. Между мерзлой и талой зонами обозначен фронт промерзания ($\Phi_{пр}$).

Более упрощенная схема промерзания образца, которая состоит из мерзлой зоны, линзы льда, зоны промерзания и талой зоны, приведена в работе [Горелик, 2010, с. 51]. Линза льда растет на границе мерзлой и промерзающей зон. Это частный случай. Общий случай – это когда шпильки возникают и растут в промерзающей зоне одновременно на разных уровнях, но с разной интенсивностью [Чеведев, 2004].

Из рис. 1 следует, что методика физического моделирования должна включать контроль и измерение во времени как деформационных, массообменных и теплофизических параметров процессов, так и граничных условий по тепло- и массообмену и внешней нагрузке. Рассмотрим это положение подробнее.

Деформационные параметры. Из уравнения (1) следует необходимость контроля во времени над деформациями пучения мерзлой зоны, над усадкой талой зоны и над общей деформацией пучения грунта по высоте и ширине образца. При промораживании водонасыщенного образца грунта возможен расчет зависимостей от времени влажности и плотности грунта по высоте и ширине образца при условии определения этих характеристик до опыта как исходных значений.

Теплофизические параметры. При физическом моделировании необходимо поддержание температуры и контроль ее на холодном и теплом торцах образца, а также обеспечение входящих и выходящих тепловых потоков. Требуется также запись распределения температуры по высоте образца грунта во времени. Кроме того, необходимо регистрировать движение фронта промерзания во времени.

Массообменные параметры. В ходе физического моделирования необходимо определение плотности потока воды, идущей извне через теплый торец образца, и распределение порового давления по высоте талой зоны во времени. По распределению температуры в мерзлой зоне можно рассчитать динамику порового давления и его гра-

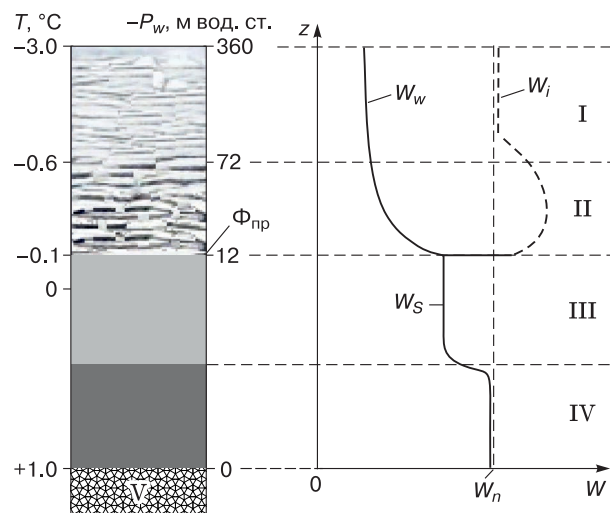


Рис. 1. Схема характерных зон, слоев пылевато-глинистого грунта и параметров процесса его промерзания.

I – мерзлый слой мерзлой зоны; II – промерзающий слой мерзлой зоны; III – слой транзитного влагопереноса талой зоны; IV – слой начальной влажности талой зоны; V – капиллярно-насыщенный водой слой песка. T – температура (критические и характерные значения); P_w – поровое гидравлическое давление; z – высота; W_w, W_i, W_{ip}, W_n – влажности за счет незамерзшей воды, льдистости, предела усадки, начальной влажности соответственно; $\Phi_{пр}$ – фронт промерзания.

диенты. С учетом плотности потока влаги и градиента порового давления рассчитывается зависимость коэффициента влагопроводности грунта от температуры.

Криогенное строение. Для наблюдения за процессом формирования криогенной текстуры грунта на боковой поверхности образца в ходе его промерзания необходимо предусмотреть возможность проведения цейтраферной видеосъемки. Цейтраферная видеосъемка – специальный вид кино- и фотосъемки, при котором осуществляется фотографирование серии кадров одного и того же объекта с одной и той же точки съемки через равные промежутки времени. Она предназначена для фотографирования медленно протекающих процессов.

Используя специальные дополнительные методы, необходимо определить зависимости от температуры следующих характеристик грунта: коэффициентов теплопроводности и теплоемкости в талой и мерзлой зонах, влажности мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, а также начальные плотности и влажности промораживаемого грунта.

На боковой поверхности образца по сетке 10×10 мм устанавливаются игольчатые метки для фиксации во времени послойных деформаций промерзающего образца грунта по высоте и ширине путем видеосъемки.

Вышеизложенный подход является методологической основой подбора способов и устройств для достижения поставленной цели работы – физического моделирования процесса промерзания и пучения грунта.

Краткий анализ существующих методов физического моделирования

На пучение промерзающих грунтов, как опасного для инженерных сооружений процесса, обратили внимание инженеры-путейцы России в конце XIX в. [Штукенберг, 1894; Войслав, 1896]. С тех пор по проблеме морозного пучения опубликовано несколько сотен научных работ, что говорит как о значимости процесса, так и о его сложности.

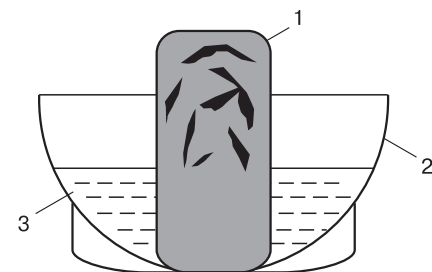


Рис. 2. Схема опыта по промораживанию образца грунта в воде [Войслав, 1896].

1 – грунт; 2 – чаша; 3 – вода.

Первый простой эксперимент в 1896 г. провел С.Г. Войслав. Он опытным путем установил пучение промерзающего грунта, находящегося в чаше с водой, которую грунт впитывал (рис. 2).

Экспериментальное исследование процесса промерзания и пучения грунтов более детально осуществлялось в начале XX в. (рис. 3) [Taber, 1930]. Образец глины для промораживания устанавливали со штампом в гильзу с пористым дном. Образец промораживали с помощью криостата, корпус которого имел теплоизоляцию для обеспечения одностороннего промораживания образца. Гильзу с пористым дном устанавливали в емкость, в которой была вода, а под ней песок с водой.

Для своего времени эксперименты С.Г. Войслава и С. Тебера имели важное значение, однако для современного физического моделирования потенциала таких устройств недостаточно.

В период изучения механизма криогенной миграции и морозного пучения до 1990 г. следует отметить авторов, которые исследовали процесс пучения грунтов в лабораториях, применяя принципиально однотипные приборы, обеспечивающие одностороннее промораживание образцов грунта [Баженова, Бакулин, 1957; Нерсесова, 1961; Ананян, 1970; Алексеев, 2020].

В.Я. Лапшин и Л.Б. Ганелес [1979] на крупно-размерных образцах (высотой около 0,2, 1 и 3 м) установили, что максимальное пучение грунты проявляют при скорости промерзания порядка 1,5–2 см в сутки. Примером аппаратурной реализации методического подхода к физическому моделированию промерзания грунта служит прибор, схема которого дана на рис. 4. Прибор устанавливался в морозильную камеру и состоял из цилинд-

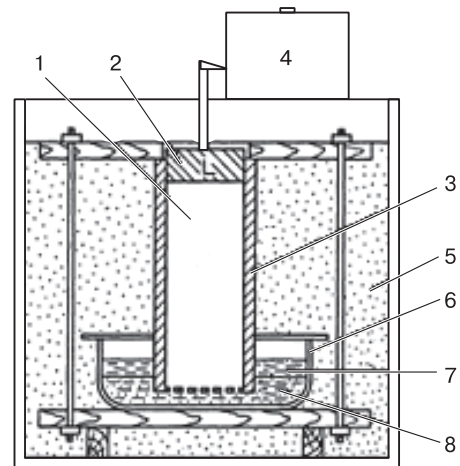


Рис. 3. Устройство для промораживания образца грунта [Taber, 1930].

1 – образец глины; 2 – штамп; 3 – гильза с пористым дном; 4 – криостат; 5 – теплоизоляция; 6 – емкость; 7 – вода; 8 – песок с водой.

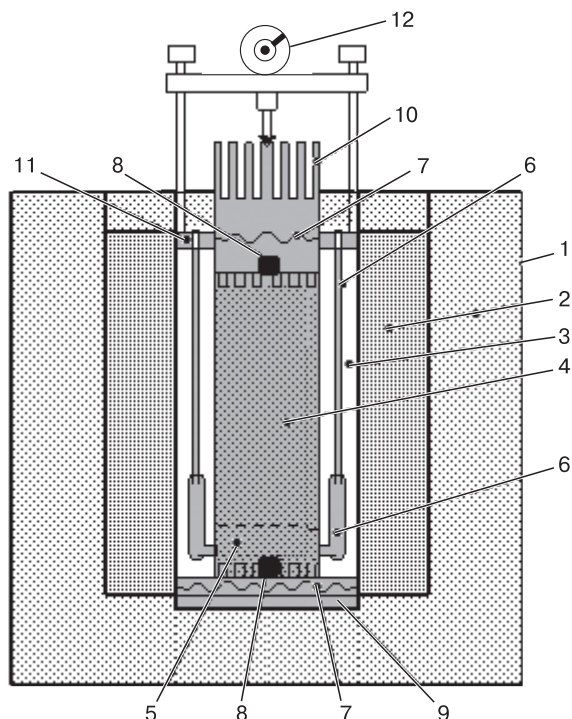


Рис. 4. Измеритель пучинистости грунтов [Лашин, Ганелес, 1979].

1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – цилиндр из оргстекла; 4 – образец грунта; 5 – мелкий песок; 6 – емкость с водой; 7 – электронагреватель; 8 – термоэлемент; 9 – теплообменник нижний; 10 – теплообменник верхний; 11 – кольцо; 12 – датчик деформации.

рического корпуса с теплоизоляцией, цилиндра из оргстекла с образцом грунта. Цилиндр с образцом ставили на водонасыщенный мелкозернистый песок. К песку подводили емкость с водой. Тем самым реализовывался подток воды извне (открытая система массообмена).

Граничные температурные условия задавались электронагревателями с помощью термоэлементов и теплообменников. Прижимное кольцо предохраняло цилиндр от поднятия за счет касательных сил пучения грунта. Общие деформации образца промерзающего грунта измерялись датчиком деформации часового типа. В этом устройстве не было предусмотрено применение измерителей порового гидравлического давления, плотности потока порового раствора и динамики температурного поля.

Недостатки такого устройства состоят в отсутствии возможности наблюдения за формированием криогенной текстуры, продвижением фронта промерзания, послойных деформаций и за интенсивностью потока воды в образец извне.

Э.Д. Ершов, В.Г. Чеве­рев, Ю.П. Лебеденко [Способ..., 1988] предложили способ и устройство для определения гидравлической составляющей

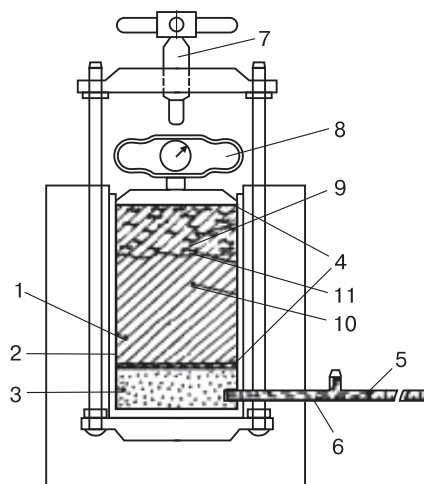


Рис. 5. Устройство для определения давления морозного пучения грунта [Способ..., 1988].

1 – образец грунта; 2 – гильза для образца; 3 – песок мелкий капиллярно-насыщенный; 4 – термоэлементы, не препятствующие потоку воды; 5 – мениск; 6 – капилляр стеклянный калиброванный; 7 – винт; 8 – динамометр; 9 – мерзлая зона; 10 – талая зона образца грунта; 11 – фронт промерзания.

давления морозного пучения грунта путем измерения динамометром максимального давления, при котором криогенная миграция и пучение прекращаются, что определяется по остановке мениска в капиллярной трубке (рис. 5). Идея способа состояла в следующем. Образец полностью водонасыщенного грунта помещают в гильзу, на дне которой находится слой песка для подвода воды к нижнему торцу образца. С помощью термоэлементов задают постоянные величины температур по торцам образца.

На верхнем торце задают отрицательную температуру, соответствующую переходу состояния грунта от пластично-мерзлого к твердомерзлому, а на нижнем торце образца поддерживают положительную температуру около $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$. После стабилизации температуры на торцах образца регистрируют движение мениска в капиллярной трубке во времени, что позволяет рассчитывать количество поступления воды в образец через единицу площади в единицу времени. В ходе промерзания возникают мерзлая и талая зоны, разделенные фронтом промерзания. В момент появления твердомерзлого слоя у верхнего торца образца подводят винт к динамометру. Величину гидравлической составляющей давления пучения определяют по динамометру в момент прекращения подтока воды в образец через нижний торец по показанию остановки мениска, что является преимуществом данного устройства.

Следует отметить, что с остановкой криогенной миграции под действием нагрузки фронт про-

мерзания не останавливается и своим продвижением вызывает обратный отток порового раствора от фронта. Аналогичное устройство было реализовано впоследствии В.Г. Чеверевым в первом нормативном документе по лабораторному определению степени морозной пучинистости грунтов [ГОСТ 28622-1990, 1990].

Наиболее близким техническим решением для целей физического моделирования промерзания и пучения грунтов можно считать устройство, принципиальная схема которого дана на рис. 6. Отметим основные особенности устройства. Внешний источник воды во всех случаях находится на одном уровне с пористой пластиной в верхней части камеры. Независимое измерение полного пучения выполнено с помощью датчика перемещения постоянного тока. Десять термисторов смонтированы вдоль образца на контакте с ним.

Эксперименты с морозильной камерой были проведены внутри комнаты с постоянной температурой, близкой к среднему значению температуры на концах образца. Замораживание образца производилось снизу вверх, а сопротивление движению замерзшей части образца было снижено за счет использования тефлоновой смазки внутри камеры. Компьютер в сочетании с мультипрограммным блоком способен менять температуру на каждом торце образца с заданной скоростью.

К недостаткам устройства (см. рис. 6) относятся: отсутствие контроля над послынным пучением промерзающей зоны и усадкой талой зоны грунта в период его промерзания, отсутствие средств измерения порового давления по высоте талой зоны и высокотемпературной мерзлой зоны, также не предусмотрены сейсмометрическая видеосъемка сегрегационного льдовыделения и измерение плотности потока воды в образец извне.

В работе [Чеверев и др., 2013] показано, что ориентация образца, т. е. изменение вектора криогенной миграции к вектору гравитации, не сказывается существенно на конечных результатах, так как всасывающая сила криогенной миграции многократно превышает силу гравитации в образцах грунта относительно небольшой высоты. В результате промораживания грунта снизу при прочих равных условиях, как показали сопоставительные испытания [Чеверев и др., 2013], не влияет на итоговый результат по определению степени морозной пучинистости грунта, но имеет существенную технологическую выгоду. Она состоит в том, что только в этом случае в устройстве может применяться охлаждающая плита большой площади, на которой можно разместить одновременно несколько образцов грунта для промораживания при заданной температуре.

Еще один положительный эффект состоит в том, что при промерзании снизу мерзлый слой неподвижен, а пучение идет вверх. Это снимает про-

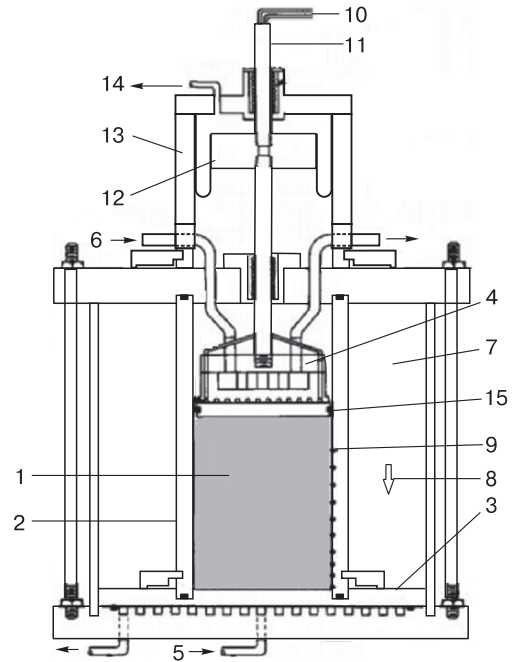


Рис. 6. Схема морозильной камеры [Penner, 1986].

1 – образец грунта; 2 – камера (труба из пластмассы); 3 – холодный штамп; 4 – теплый штамп; 5 – антифриз холодный; 6 – антифриз теплый; 7 – теплоизоляция; 8 – направление теплового потока в образце; 9 – термисторы; 10 – трубка для подачи воды в образец; 11 – трубка для контроля деформации пучения образца; 12 – поршень; 13 – цилиндр; 14 – вход для сжатого воздуха; 15 – пористая пластина.

блему смерзания грунта с внутренней поверхностью гильзы и искусственного сдерживания пучения. Появляется возможность оценки влияния трудноконтролируемых сил смерзания в этом процессе.

Граничные условия промораживания образца грунта для определения степени пучинистости грунта по стандарту [ГОСТ 28622-2012, 2012] предполагают охлаждение одного торца до -4°C и подогрев другого торца до $+1^{\circ}\text{C}$. Использование искусственного подогрева не позволяет проморозить образец полностью, фронт промерзания замедляет свое движение и практически останавливается примерно на 2/3 высоты образца. При этом возникают благоприятные условия для интенсивного роста толстого штира льда у фронта промерзания (рис. 7). В результате этого испытываемый грунт в соответствии с положением стандарта [ГОСТ 28622-2012, 2012] становится чрезмерно пучинистым, хотя изначально таковым может и не являться.

В природной среде промерзание сезонноталого слоя (СТС) обычно происходит в других теплофизических условиях. В осенне-зимний период промерзание СТС идет сверху от поверхности земли и снизу от кровли многолетнемерзлого

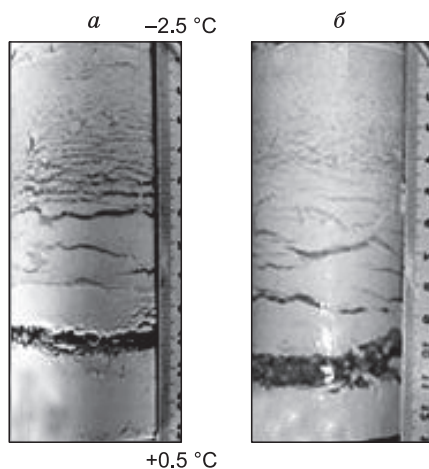


Рис. 7. Криогенная текстура образцов пылеватой глины каолинитового состава, замороженных с граничными условиями -2.5 и $+0.5$ °C и под нагрузками:

a – 0.06 МПа; *б* – 0.04 МПа [Чеве́рев и др., 2013].

грунта. Между двумя фронтами промерзания формируется слой, в котором практически отсутствует градиент температуры, а средняя температура слоя соответствует температуре начала замерзания грунта. Это явление не было учтено в стандарте [ГОСТ 28622-2012, 2012].

Для учета этого природного явления в лабораторных условиях целесообразно создать вокруг гильзы с образцом зону с нулевой температурой, исключив при этом локальный нагрев теплого торца образца. При этом боковая стенка гильзы должна иметь достаточное тепловое сопротивление для защиты температурного поля промерзающего грунта. Например, толщины стенки гильзы из оргстекла в 15 мм, как показали опыты, достаточно.

Целесообразно также предусмотреть способ определения степени пучинистости промерзающего образца грунта с нормальным, повышенным или пониженным гидравлическим давлением со стороны теплого торца образца. Не вникая в детали, отметим, что такие варианты промерзания диктует разнообразие природных гидрогеологических условий, некоторые из них рассмотрены в работе [Горелик, 2010].

Лабораторные эксперименты проводятся и планируются для того, чтобы точно измерить движение воды через талую и промерзающую зоны грунта в зависимости от градиента порового давления, температурных градиентов, химических градиентов потенциала, имеющих место в мерзлой зоне. Именно по этим тщательно измеренным экспериментальным данным определяют, какое математическое моделирование процесса промерзания

будет правильным и точно отражающим физическую сущность процесса пучения.

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами проводилось лабораторное физическое моделирование одностороннего промораживания образцов грунта с подтоком влаги извне при фиксированных граничных условиях по температуре. В качестве испытуемого модельного (эталонного) грунта применялась природная пылеватая пучинистая глина каолинитового состава. В результате исследований были получены характеристики эталонного грунта, параметры процесса его промерзания и пучения при заданных граничных условиях по тепло- и массообмену. Эти данные использовались в дальнейшем для верификации физической постановки математической модели промерзания и пучения грунтов с учетом тепло-массопереноса и усадки талой зоны.

Устройства для физического моделирования

Инструментальная база для проведения исследований состояла из следующих устройств: 1) измерителя морозной пучинистости грунтов; 2) воздушного криотермостата (КТС); 3) специальной пресс-формы для уплотнения испытуемого грунта; 4) универсального измерителя характеристик (термограммы замерзания–оттаивания грунта и влажности за счет незамерзшей воды); 5) устройства для определения коэффициентов влагопроводности тонкодисперсных грунтов в талом состоянии методом стационарного влагообмена; 6) измерителя теплопроводности в мерзлом состоянии методом стационарного теплового режима; прочее вспомогательное оборудование.

Исследуемые характеристики модельного грунта следующие: зависимость его плотности и влажности при капиллярном влагонасыщении от нагрузки в талом состоянии; влажность грунта за счет удельного содержания незамерзшей воды (W_w) в диапазоне температур $0...-5$ °C; термограммы замерзания–оттаивания; теплопроводность и теплоемкость грунта в талом и мерзлом состоянии; эффективная теплоемкость (с учетом теплоты фазовых переходов); зависимости коэффициентов влагопереноса от температуры в мерзлом и талом состоянии.

Методы определения указанных характеристик и результаты их применения изложены в статьях и монографии [Чеве́рев, 2003а,б, 2004; Чеве́рев и др., 2021].

Измеряемые и контролируемые во времени граничные условия, параметры процесса промерзания грунта и его характеристики таковы: граничные условия процесса промерзания и пучения, динамика температурного поля и порового давления [Чеве́рев и др., 2021, рис. 8], движение фронта

промерзания, поток криогенной миграции, послойная деформация морозного пучения промерзающей зоны и усадка талой зоны, видеофиксация формирования криогенной текстуры.

Для достижения цели исследований было разработано автоматизированное устройство, главной отличительной особенностью которого, дающей существенный положительный эффект, являлось то, что образцы грунтов промораживались снизу вверх, а подача воды шла сверху вниз. При этом внешняя нагрузка прикладывалась сверху со стороны талой зоны (рис. 8). Обоснование правомерности применения предложенной методики (речь идет о промораживании снизу) для определения характеристик морозной пучинистости грунтов приводится в работе [Чеверев и др., 2013], а также в описании конструкции испытательного оборудования (см. ниже).

Устройство состоит из высокотемпературной морозильной камеры, во внутреннем объеме которой поддерживается положительная температура $0...0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. На дне камеры расположена охлаждающая термоплита с полостью, в которой циркулирует антифриз криотермостата. На термоплите установлены две опоры, выполняющие с термоплитой роль силовой рамы устройства. На термоплиту устанавливаются трубу квадратного сечения $70 \times 70\text{ мм}$ и высотой 150 мм из прозрачного оргстекла с металлическим дном и с вертикальным каналом. Канал заполняется водным солевым раствором, температура замерзания которого соответствует температуре на фронте промерзания грунта. Эта температура приравнивается к температуре начала замерзания испытуемого грунта по результатам предварительного определения.

В нижней части канала установлена плотно прилегающая к термоплите металлическая заглушка, благодаря которой, как установлено опытным путем, уменьшается переохлаждение раствора на начальном этапе промерзания. Положение фронта промерзания в образце грунта во времени определялось визуально с использованием центрифферной видеосъемки, а также по распределению температур по высоте образца с помощью термодатчиков.

В качестве обоснования правомерности приложения нагрузки со стороны талой зоны отметим следующее. Поскольку сила действия равна силе противодействия, прикладывать нагрузку и измерять силу пучения можно как со стороны мерзлой, так и со стороны талой зон, что в данном случае равнозначно. Данное условие обеспечивается тем, что керамическая пористая пластина должна иметь достаточную прочность от разрушения при приложении нагрузки и сохранять при этом влагонепроницаемость величиной не менее влагонепроницаемости грунта талой зоны. Площадь пластины должна

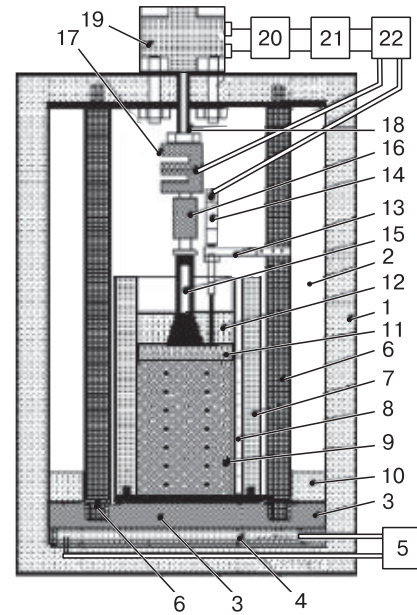


Рис. 8. Устройство для физического моделирования промерзания и пучения грунта с управлением граничными условиями и определением параметров процесса.

1 – высокотемпературная морозильная камера; 2 – внутренний объем камеры для поддержания температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – термоплита с полостью; 4 – полость; 5 – циркуляционный жидкостный термостат для замораживания образца грунта; 6 – опорные стойки; 7 – гильза для размещения испытуемого образца грунта; 8 – цилиндрический канал, заполненный водным раствором; 9 – образец грунта; 10 – теплоизоляционное кольцо; 11 – керамическая, капиллярно-пористая водонасыщенная пластина; 12 – слой капиллярно-насыщенного мелкозернистого песка; 13 – кронштейн; 14 – датчик перемещения; 15 – опорная стойка; 16 – соединительная муфта; 17 – датчик силы; 18 – шток пневмоцилиндра; 19 – пневмоцилиндр; 20 – пневмопривод; 21 – воздушный компрессор; 22 – электронный блок АСУ.

быть максимально приближена к площади образца грунта, обеспечивая свободное скольжение вдоль гильзы. Размер площади основания опорной стойки должен быть меньше, что необходимо для свободного движения воды в промерзающий образец грунта из слоя песка через пористую пластину.

При таком варианте физического моделирования площадь, на которую действует нагрузка, равна площади мерзлой поверхности грунта с учетом поправки на силу трения грунта талой и промерзающей зон о поверхность гильзы. Полученные результаты будут применимы на практике, если площадь пучинистого грунта равна площади фундамента сооружения. Однако если площадь пучинистого грунта больше площади фундамента, то пропорционально этой разнице возрастает действие на фундамент нормальных сил пучения.

Способы физического моделирования

Вышеописанное устройство позволяет провести испытания при следующих влажностных режимах.

Первый режим – закрытая система, поступление воды извне отсутствует. В этом случае между слоем песка и грунтом положена водонепроницаемая пленка.

Второй режим – открытая система, поступление воды извне имеет место, но без напора. В этом случае слой песка увлажнен только до капиллярного насыщения. Капиллярно-взвешенная вода в порах песка – резерв для поступления воды извне в промерзающий грунт. Варьируя толщиной слоя песка, можно управлять объемом резервного влагосодержания. При этом гидростатическое давление со стороны капиллярно-насыщенного мелкозернистого песка на испытуемый грунт отсутствует, так как вода находится в капиллярно-взвешенном состоянии. Слой воды в слое песка толщиной 3 см с учетом его пористости составляет 1 см. Этого количества воды, поступившей в промерзающий водонасыщенный грунт при криогенной миграции и шлировом льдовыделении, будет достаточно для проявления им относительной деформации морозного пучения более 0.1 д.е., если начальная высота образца грунта составляет 10 см. В данном случае грунт оценен как чрезмерно пучинистый. При увеличении высоты испытуемого образца грунта, например до 15 см, толщину слоя капиллярно-насыщенного песка следует пропорционально увеличить до 4.5 см.

Третий режим – открытая система, поступление в промораживаемый образец грунта воды из-

вне происходит под напором. В этом случае над слоем водонасыщенного песка поддерживается слой воды, уровень которого до поверхности образца грунта и определяет величину напора.

Создание различных режимов поступления воды в грунт в данной технической реализации позволяет проводить исследование зависимостей характеристик пучения от различных гидрогеологических условий процесса промерзания грунта.

В конструкции устройства предусмотрена также возможность создания статического давления на образец за счет имеющегося пневмопривода. В ходе физического моделирования пока использовался только второй режим – открытая система по водообмену на уровне атмосферного давления.

Перед началом промораживания температура образцов должна быть понижена до 0...0.1 °С. С этой целью на циркуляционном охлаждающем термостате задается соответствующая температура. Полая плита охлаждается до указанной температуры путем перекачки антифриза термостата по замкнутому кругу и тем самым охлаждает испытуемые образцы грунта. Теплоизоляция корпуса морозильной камеры достаточно эффективна, чтобы исключить существенный приток тепла извне. Предварительное охлаждение образцов грунта в целом завершается после достижения в верхней части камеры температуры 0...0.1 °С. Этот этап длится несколько часов.

Термостат переводится на температуру промораживания грунта (например, –2.5 °С) и включается циркуляция антифриза. Плита, приобретая отрицательную температуру, охлаждает нижние слои образца грунта, которые становятся мерзлыми, когда их температура достигнет температуры начала замерзания и ниже. При этом возникает фронт промерзания, разделяющий образовавшийся мерзлый и вышележащий пока еще не мерзлый (талый) слой грунта. Контроль над продвижением фронта промерзания во времени и по глубине выполняется с помощью цилиндрического канала (см. рис. 8).

При промораживании пучинистого грунта поровый раствор из немерзлой зоны перемещается в промерзающую зону, где происходит замерзание избытка воды с образованием прослоев льда и пучением грунта. В ходе промораживания образца грунта его послойная деформация пучения фиксируется сеткой датчиков положения путем цейтраферной видеосъемки. Фиксация деформаций идет как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Нулевые деформации в горизонтальном направлении могут возникать при достижении грунтом предела усадки в измеряемом слое. При этом система пневмопривода работает на поддержание статического давления на промерзаю-

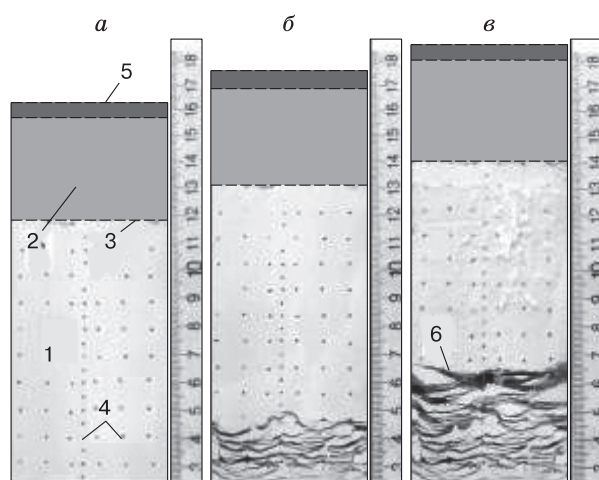


Рис. 9. Результаты промораживания образца каолиновой глины (опыты без нагрузки).

а – перед опытом (0 ч); *б, в* – во время опыта (*б* – 23 ч, *в* – 63 ч); 1 – образец грунта; 2 – капиллярно-насыщенный водой мелкозернистый песок; 3 – граница между песком и глиной; 4 – датчики положения; 5 – металлическая пластина с дренажными отверстиями; 6 – ледяные прослои.

щий образец грунта, который пучится, оказывая противодавление на датчик силы и шток пневмоцилиндра.

На рис. 9 в качестве примера приведены результаты промораживания одного и того же образца каолинитовой пылеватой глины, полученные во время испытаний с проведением сейсграферной съемки, на момент перед опытом (0 ч) и в период опыта – через 23 и 63 ч.

Образец грунта размещен в обойме из оргстекла толщиной 15 мм в форме параллелепипеда с поперечными размерами 70 × 70 мм и начальной высотой 120 мм. На нем расположен капиллярно-насыщенный водой песок, на котором, в свою очередь, лежит металлический штамп с отверстиями. Датчики положения игольчатого типа.

На рис. 9 видно, что за счет промерзания снизу формируется криогенная текстура волнисто-слоистого горизонтального типа. В ходе промерзания через 63 ч величина шлиров существенно увеличилась до 3–5 мм, а скорость промерзания и пучения закономерно снизилась. Общая деформация пучения образца глины при неполном промерзании (включая пучение промерзшей и усадку талой зон) составила 24 мм.

ВЫВОДЫ

1. Приведен краткий аналитический обзор разработок в области лабораторного (физического) моделирования процесса пучения при промерзании грунтов, наиболее значимых, по мнению авторов, для достижения поставленной цели. При этом выполнено сравнение способов и устройств, реализующих моделирование процесса пучения двумя существенно разными способами: промерзание сверху, подток воды снизу; промерзание снизу, подток воды сверху. Показано, что второй способ обладает рядом преимуществ. Так, он устраняет влияние сил смерзания грунта с внутренней поверхностью гильзы, позволяет увеличить количество одновременно испытываемых образцов, при этом температурные условия лабораторного моделирования приближены к промерзанию в природных условиях сезонномерзлого слоя, и создает новые возможности для исследования процесса промерзания с учетом изменения гидрогеологических факторов.

2. Предложен конструктивно оптимальный комплекс для определения характеристик и параметров процесса пучения, обеспечивающий полную физическую характеристику исследуемого процесса и соответствующих этому внешних условий с перспективой дальнейшего использования его для верификации существующих и разрабатываемых математических моделей процесса промерзания и пучения грунтов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке ООО “НИИ Транснефть” (договор № 4220 П/20-511/2015 от 19.11.2015).

Литература

- Алексеев А.Г.** Лабораторные исследования давления криогенного пучения грунтов // Вестн. НИЦ Строительство. М., 2020, № 3, с. 5–12.
- Ананян А.А.** Вода в горных породах, миграция ее при промерзании // Связанная вода в дисперсных системах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1970, вып. 1, с. 146–154.
- Баженова А.П., Бакулин Ф.Г.** Экспериментальные исследования механизмов передвижения влаги в промерзающих грунтах // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1957, № 3, с. 117–123.
- Войслав С.Г.** Краткое описание исследований причины пучения полотна Николаевской железной дороги // Труды Бюро исследований почвы. СПб., 1896, 133 с.
- Горелик Я.Б.** Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением пород промерзающего слоя // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 50–62.
- ГОСТ 28622-1990.** Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. М., Стандартинформ, 1990, 12 с.
- ГОСТ 28622-2012.** Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. М., Стандартинформ, 2012, 12 с.
- Лапшин В.Я., Ганелес Л.Б.** Рекомендации по определению морозной пучинистости грунтов оснований зданий и сооружений. Свердловск, Урал. политехн. ин-т, 1979, 34 с.
- Методы геокриологических исследований:** Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.
- Нересова З.А.** Влияние обменных катионов на миграцию воды и пучение грунтов при промерзании // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1961, вып. 4, 251 с.
- Способ** определения давления морозного пучения грунта: А.С. № 1596241; 1988 / Ершов Э.Д., Чеверев В.Г., Лебеденко Ю.П. Опубл. 30.09.90, Бюл. 36.
- Чеверев В.Г.** Классификация форм связи воды в мерзлых тонкодисперсных грунтах // Криосфера Земли, 2003а, т. VII, № 3, с. 31–40.
- Чеверев В.Г.** Свойства связанной воды в криогенных грунтах (аналитический обзор) // Криосфера Земли, 2003б, т. VII, № 2, с. 30–41.
- Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Чеверев В.Г., Бурнаев Р.С., Гагарин В.Е., Сафронов Е.В.** Влияние внешней нагрузки на степень морозной пучинистости глинистых грунтов // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 57–62.
- Чеверев В.Г., Сафронов Е.В., Коротков А.А., Чернятин А.С.** Физическая постановка задачи для численной модели промерзания и пучения грунтов с учетом теплоемкости // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2021, т. 11, № 3, с. 244–256.
- Штукенберг В.И.** О борьбе с пучинами на железных дорогах // Журн. Министерства путей сообщения. М., 1894, кн. 2, с. 24–30.
- Penner E.** Aspects of ice lens growth in soils // Cold Regions Science and Technol., 1986, vol. 13, p. 91–100.
- Taber S.** The mechanics of frost heaving // J. Geology, 1930, vol. 38, No. 4, p. 303–313.

References

- Alekseev A.G. Laboratory studies of the pressure of cryogenic heaving of soils. Vestnik SIC Construction. Moscow, 2020, No. 3, p. 5–12 (in Russian).
- Ananyan A.A. Water in rocks, its migration during freezing. In: Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh [Sat. Bound water in dispersed systems]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1970, iss. 1, p. 146–154 (in Russian).
- Bazhenova A.P., Bakulin F.G. Experimental studies of the mechanisms of moisture movement in freezing soils. In: Materialy po laboratornym issledovaniyam merzlykh gruntov [Materials on laboratory studies of frozen soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1957, No. 3, p. 117–123 (in Russian).
- Voislav S.G. A brief description of the causes of heaving of the Nikolaev railway // Proceedings of the Bureau of Soil Research. St. Petersburg, 1896, 133 p. (in Russian).
- Gorelik J.B. On the calculation methods of the engineering construction displacements caused by freezing layer heave process. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XIV, No. 1, p. 50–62 (in Russian).
- GOST 28622-1990. Soils. The method of laboratory determination of the degree of heaviness. Moscow, Standartinform, 1990, 12 p.
- GOST 28622-2012. Soils. The method of laboratory determination of the degree of heaviness. Moscow, Standartinform, 2012, 12 p.
- Ershov E.D., Cheverev V.G., Lebedenko Yu.P. Method for determining the pressure of frost heaving of soil: Patent No. 1596241, 1988. Publ. 30.09.90, Bull. 36.
- Lapshin V.Ya., Ganeles L.B. Recommendations for determining the frost heaving of soils of the bases of buildings and structures. Sverdlovsk, Ural Politechnical Institute, 1979, 34 p. (in Russian).
- Methods of geocryological research: A textbook. E.D. Yershova (Ed.). Moscow, Plzd-vo Mosk. un-ta, 2004, 512 p. (in Russian).
- Nersesova Z.A. Influence of exchange cations on water migration and soil heaving during freezing. In: Issledovaniya po Fizike i mekhanike marzlykh gruntov [Research on the physics and mechanics of frozen soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961, iss. 4, 251 p. (in Russian).
- Cheverev V.G. Classification of water bond forms in the frozen fine-grained soils. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2003a, vol. VII, No. 3, p. 31–40 (in Russian).
- Cheverev V.G. Properties of bound water in cryogenic soils (analytic review). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2003b, vol. VII, No. 2, p. 30–41 (in Russian).
- Cheverev V.G. Priroda kriogennykh svoistv gruntov [The nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Nauchny mir, 2004, 234 p. (in Russian).
- Cheverev V.G., Burnaev R.S., Gagarin V.E., Safronov E.V. Influence of external pressure on the degree of frosty heaving of clay soils. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 4, p. 57–62 (in Russian).
- Cheverev V.G., Safronov E.V., Korotkov A.A., Chernyatin A.S. Physical formulation of the problem for a numerical model of freezing and heaving of soils taking into account heat and mass transfer. In: Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products, 2021, vol. 11, No. 3, p. 244–256 (in Russian).
- Shtukenberg V.I. On the fight against the depths on the railways. Zurnal Ministerstva putei soobshcheniya [Journal of the Ministry of Railways]. Moscow, 1894, book 2, p. 24–30 (in Russian).
- Penner E. Aspects of ice lens growth in soils. Cold Regions Science and Technology, 1986, vol. 13, p. 91–100.
- Taber S. The mechanics of frost heaving. J. Geology, 1930, vol. 38, No. 4, p. 303–313.

*Поступила в редакцию 5 июля 2021 г.,
после доработки – 6 июля 2022 г.,
принята к публикации 16 июля 2022 г.*