

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ

УДК 551.328/340/345; 624.131

DOI: 10.15372/KZ20230102

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОМЕРЗАНИЯ ПУЧИНИСТОГО ГРУНТАВ.Г. Чеверев¹, А.В. Брушков¹, Е.В. Сафронов¹, Ю.А. Кайнов², А.Л. Федотов²¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; cheverev44@mail.ru²Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО “НИИ Транснефть”),
Центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта,
117186, Москва, Севастопольский просп., 47а, Россия; KaynovYA@niitn.transneft.ru

Приведены результаты физического лабораторного моделирования процесса промерзания модельного грунта, в качестве которого выбрана глина каолинитового состава. Экспериментально определены основные характеристики компонентного и фазового состава воды в глине, а также ее тепло- и массообменные и деформационные свойства. В ходе физического моделирования отслеживались параметры процесса промерзания, дифференциального пучения мерзлой и усадки немерзлой зон, теплового переноса и порового давления. Сегрегационное льдовыделение в промерзающем грунте, послойное осевое и горизонтальное деформирование, а также динамика плотности и влажности водонасыщенных образцов грунта во времени наблюдались путем применения маркеров положения и цейтраферной видеосъемки.

Ключевые слова: физическое моделирование, промерзание, пучение, характеристики глины, параметры процесса.

RESULTS OF PHYSICAL MODELING OF FREEZING OF HEAVING SOIL

V.G. Cheverev¹, A.V. Brushkov¹, E.V. Safronov¹, Yu.A. Kaynov², A.L. Fedotov²¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; cheverev44@mail.ru²Research Institute of Pipeline Transport,
Sevastopolsky prosp. 47a, Moscow, 117186, Russia; KaynovYA@niitn.transneft.ru

The article presents the results of physical modeling of soil freezing in laboratory. The samples of silty clay of kaolinite composition were used as model soil. The main characteristics of the component and phase composition of water, as well as the heat and mass transfer and deformation properties of the soil were experimentally determined. During the physical modeling, parameters of the freezing process, differential heaving of frozen and shrinkage of thawed zones, heat and moisture transfer, and pore pressure were monitored. The appearance of segregated ice in the freezing soil, layered axial and horizontal deformation, and the dynamics of density and water content of water-saturated soil samples over time were determined using position markers and time-lapse video.

Keywords: physical modeling, freezing, heaving, characteristics of clay, process parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Широко распространенным опасным геокриологическим процессом для зданий и инженерных сооружений в криолитозоне России является морозное пучение промерзающих грунтов [Гарагуля и др., 2000]. В связи с этим прогноз и управление данным процессом весьма актуальны.

Несмотря на многолетние исследования механизма и закономерностей процесса пучения, проблема разработки математического прогноза этого процесса пока далека от окончательного решения. Существующие модели тепло- и массообмена и деформаций для численных методов прогноза процесса промерзания и пучения грунтов не

нашли экспериментального подтверждения в плане количественного соответствия.

Для математического моделирования процесса промерзания и пучения актуальна такая физическая постановка задачи, в которой учитывались бы существенные факторы процесса, имеющие место при испытании однородных образцов, с фиксированными граничными условиями. В настоящее время целесообразно проводить исследование при более простых условиях, чем в природе, и не учитывать неоднородности грунтов и непостоянство внешних термодинамических условий.

Всю совокупность существенных элементов системы и параметров процесса промерзания можно разбить на три группы: 1) внутренние характеристики (минералогический состав, содержание органического вещества, дисперсность, плотность, пористость, суммарная влажность, влажность за счет незамерзшей воды, льдистость, химический состав и ионная сила порового раствора, тепловые, массообменные и механические свойства); 2) внешние факторы (характер тепло- и массообмена, механическое, гидравлическое и пневматическое воздействия на промерзающий грунт и способы их задания в эксперименте); 3) наблюдаемые параметры внутренних процессов промерзания и пучения (распределение температуры и порового давления, тепловые и массовые потоки, характер деформаций и льдовыделения и т. д.).

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАОЛИНИТОВОЙ ГЛИНЫ КАК МОДЕЛЬНОГО ГРУНТА

Для физического моделирования была выбрана пылеватая каолинистая глина, как яркий представитель, даже эталон, в ряду пучинистых грунтов. Ниже представлены результаты определения гранулометрического и микроагрегатного состава, анализа водной вытяжки, коэффициентов влагопроводности, теплопроводности каолинистой глины в талом и мерзлом состоянии, а также влажность за счет незамерзшей воды и температура начала замерзания (табл. 1–3, рис. 1). Максимальная молекулярная влагоемкость каолинистой глины $W_{ММВ} = 20.6\%$, влажность пределов текучести $W_L = 45.8\%$ и пластичности $W_p = 34.0\%$, число пластичности $I_p = 11.8\%$, плотность твердых частиц грунта $\rho_s = 2.72$, начальная влажность $W = 42\%$, нагрузка при компрессии составляла 0.3 МПа. Методы определения специальных характеристик (кроме обычных методов определения дисперсности и состава водной вытяжки) описаны в работе [Чеве́рев, 2004].

На рис. 1 видно, что зависимость влажности каолинистой глины за счет незамерзшей воды имеет стандартный характер. Температура начала замерзания зависит от плотности глины и закономерно понижается по мере уплотнения (см. табл. 3).

Зависимости теплопроводности глины от температуры при переходе от талого в мерзлое состояние грунта, и обратно, имеют более сложный характер. В положительной области зависимость полностью определяется линейной зависимостью теплопроводности воды от температуры и имеет линейный вид (рис. 2).

По мере охлаждения (от температуры начала замерзания глины и далее) появление льда за счет снижения удельного содержания воды существенно повышает теплопроводность до пикового значения. Это объясняется четырехкратным превышением теплопроводности льда (2.2 Вт/(м·К)) над теплопроводностью воды (0.55 Вт/(м·К)).

Дальнейшее охлаждение от температуры момента завершения интенсивного фазового перехода воды в порах глины в лед приводит к понижению теплопроводности, что объясняется образованием микротрещин.

При обратном ходе температуры с приближением к области интенсивных фазовых переходов микротрещины мерзлого грунта заполняются незамерзшей водой, что восстанавливает высокие значения теплопроводности. При дальнейшем повышении температуры мерзлой глины снижение теплопроводности идет в результате резкого падения льдистости грунта и роста влажности за счет незамерзшей воды.

На рис. 3 приведены зависимости влагопроводности каолинистой глины в талом состоянии от градиента порового (гидравлического) давления воды. Методика определения подробно изложена в работе [Чеве́рев, 2004]. Опытные данные показали, что при малых градиентах гидравличе-

Таблица 1. Гранулометрический и микроагрегатный состав каолинистой глины

Геол. индекс	Место отбора	Содержание частиц по фракциям (мм), %								Наименование (по В.В. Охотину)
		>0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	
eP ₂	Челябинская область, пос. Новокаолиновый	0.7 (1.5)	0.5 (0.2)	0.4 (0.2)	2.9 (1.2)	19.5 (32.2)	11.2 (24.0)	40.2 (34.5)	24.6 (6.2)	Глина пылеватая

Таблица 2. Анализ водных вытяжек каолинистой глины

рН	Содержание ионов, мг-экв./100 г							Сухой остаток, %
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
6.9	0.125	0.075	0.407	0.100	0.100	0.019	0.370	0.051

Таблица 3. Зависимость температуры начала замерзания водонасыщенной каолинистой глины от плотности и влажности

Номер образца	Влажность весовая, д.е.	Плотность, г/см ³	Температура начала замерзания, °С
1	0.36	1.82	-0.26
2	0.39	1.78	-0.24
3	0.42	1.76	-0.16

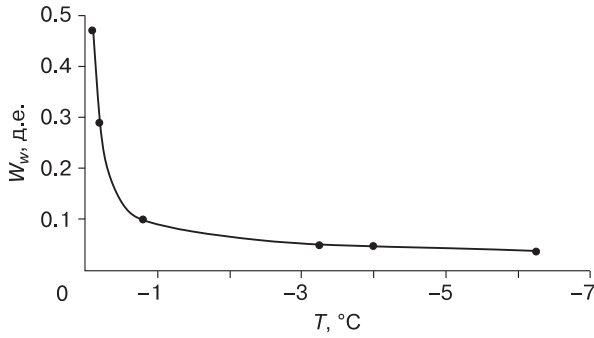


Рис. 1. Зависимость влажности мерзлой пылеватой глины каолинитового состава за счет содержания незамерзшей воды W_w от температуры T , по методу десорбции [Чеверев и др., 2005].

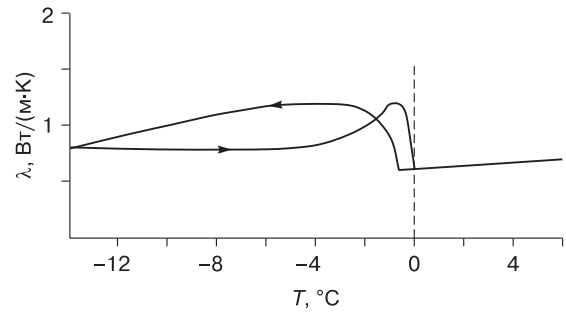


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры T водонасыщенной каолинитовой глины в цикле промерзания–оттаивания, по методу стационарного теплового режима [Чеверев, 2004].

ского порового давления (менее 87 м/м) имеет место пороговый градиент влагопереноса поровой воды. Как следует из опытных данных, пороговый градиент растет при уплотнении глины, а именно, при плотности 1,24, 1,30, 1,42 г/см³ он составляет 23, 34, 87 м/м соответственно. При увеличении градиента давления (напора) влагопроводность глины растет, достигая постоянного значения при градиентах давления, характерных для этой глины, ее температуры и плотности, и только тогда начинает выполняться линейный закон Дарси.

В мерзлой зоне промерзающего грунта несоблюдение закона Дарси в пределах точности определения экспериментально не установлено (рис. 4). В промерзающей зоне грунта изменение градиентов температуры и порового давления с сохранением средней температуры не изменяет пропорциональность плотности потока криогенной миграции и градиента порового давления, рассчитанного по уравнению

$$I_w = \lambda_w \text{grad}P_w,$$

где λ_w – коэффициент влагопроводности грунта, м/с; I_w – плотность потока криогенной миграции

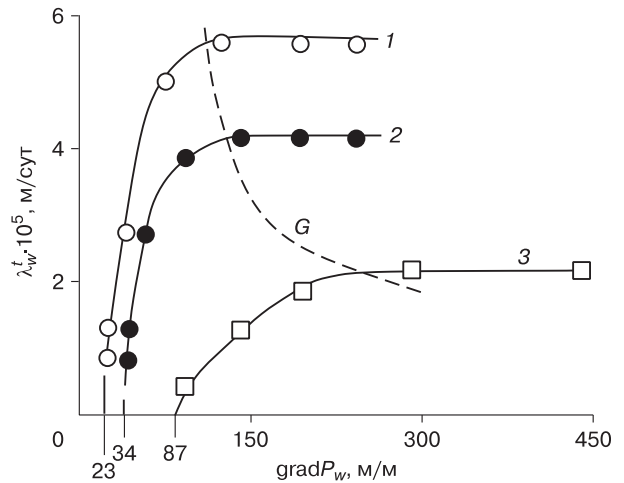


Рис. 3. Зависимость коэффициента влагопроводности талой каолинитовой глины (λ_w^t) от градиента порового давления $\text{grad}P_w$ при различной плотности ρ_d :

1 – 1,24 г/см³; 2 – 1,3 г/см³; 3 – 1,42 г/см³. G – граница по $\text{grad}P_w$ между линейным и нелинейным законом влагопереноса.

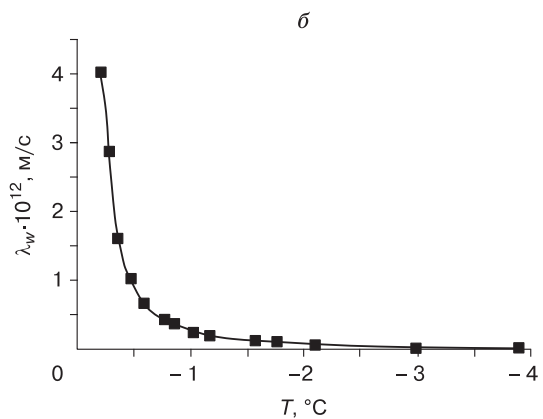
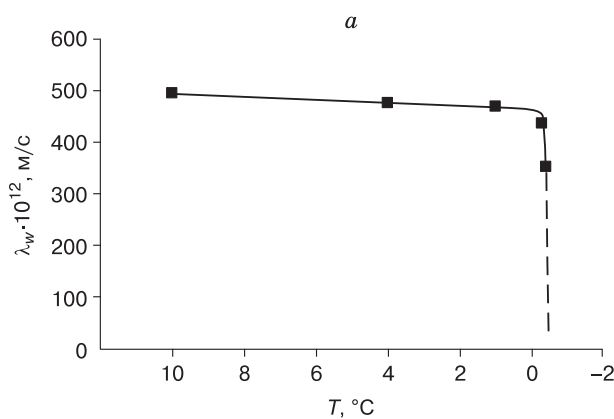


Рис. 4. Зависимость коэффициента влагопроводности λ_w каолинитовой глины в талом (а) и мерзлом (б) состоянии от температуры T .

воды в грунте, м/с; $\text{grad}P_w$ – градиент гидравлического порового давления, м/м. Давление P_w измеряется в метрах водяного столба (1 атм = 10.33 м вод. ст.). Эта размерность давления удобнее, чем в паскалях, и широко применяется в агрофизике при описании термодинамики почвенной влаги и в гидрогеологии.

С понижением температуры глины в отрицательной области влагопроводность резко уменьшается, качественно соответствуя зависимости влажности грунта за счет незамерзшей воды от температуры [Чеве́рев, 2004].

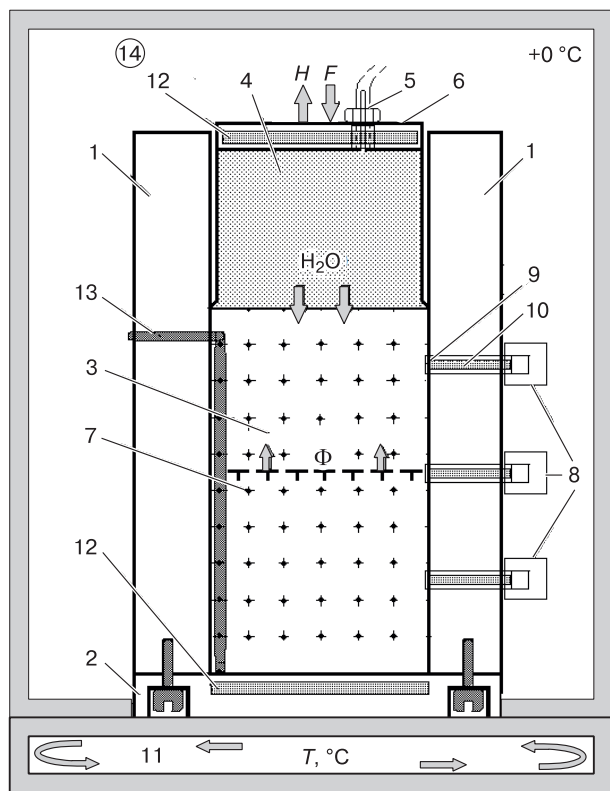


Рис. 5. Устройство для физического моделирования промерзания и пучения грунта с управлением граничными условиями и определением параметров процесса.

1 – гильза, 2 – дно гильзы, 3 – образец грунта, 4 – капиллярно-пористый камень (или мелкозернистый песок), 5 – штуцер для подвода воды и формирования давления в ней, 6 – дно стакана, 7 – датчики положения (метки), 8 – тензодатчики порового гидравлического давления, 9 – керамический пористый диск по торцу датчика, 10 – трубка с дегазированной водой, 11 – зона охлаждения (замораживания), 12 – датчик теплового потока, 13 – гирлянда термодатчиков, 14 – зона нулевых температур; H – вектор пучения; F – вектор статической нагрузки; Φ – положение фронта промерзания; H_2O – вода в капиллярно-насыщенном песке; стрелки – направление движения воды в промерзающий образец из внешнего источника.

МЕТОДИКА

ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментальное исследование параметров процесса промерзания и пучения грунтов проводилось путем лабораторного физического моделирования. Полученные данные использовались в дальнейшем для описания физической постановки задачи математического моделирования процесса с учетом тепломассообмена и ее верификация предварительной одномерной математической моделью [Чеве́рев и др., 2021а,б].

В ходе экспериментальных исследований определялись граничные условия процессов промерзания и пучения глины; динамика температурного поля; движение фронта промерзания; поток криогенной миграции; деформации морозного пучения промерзающей зоны и усадки талой зоны; параметры формирования криогенной текстуры, фиксируемые цейтраферной видеосъемкой.

Задаваемые параметры процесса и характеристики глины были следующие: одномерное промерзание с фиксированными граничными условиями по температуре и с открытой системой по влагообмену, начальные плотность и влажность как зависимые характеристики промерзающего грунта при полной степени заполнения пор.

Определяемые параметры и характеристики: распределение по высоте и во времени температуры (T), порового давления (P_w), деформации усадки и пучения (H_y , H_p), удельного содержания незамерзшей воды (W_w), тип криогенной текстуры.

В исследовании было использовано автоматизированное устройство, главной особенностью которого, дающей существенный положительный эффект, является то, что образцы грунтов промораживаются снизу вверх, а вода подается сверху вниз. Аналогичная схема промораживания была ранее обоснована и успешно использована в работах [Чеве́рев, 2004; Чеве́рев и др., 2013; Penner, 1986]. При этом внешняя нагрузка прикладывается сверху, со стороны талой зоны (рис. 5).

Ниже при описании конструкции испытательного оборудования приводится обоснование правомерности применения предложенной методики для определения характеристик морозной пучинистости грунтов, в том числе в случае промораживания снизу.

Устройство для физического моделирования промерзания и пучения грунта имеет форму гильзы, которая со съёмным дном образует стакан для размещения образца грунта (см. рис. 5). На верхнем торце образца размещается капиллярно-пористый камень в перевернутом стакане с дном, в котором имеется штуцер для подвода воды и формирования давления в ней, отличающегося от атмосферного в ту или иную сторону при необходимости.

Для послойного измерения деформаций в грунт (по сетке 10×10 мм) установлены игольчатые датчики положения, место нахождения которых фиксируется во времени в ходе видеосъемки. Тензометрические датчики для измерения отрицательного порового давления в талой зоне промерзающего грунта введены через боковую стенку гильзы. Они снабжены с торца керамическим пористым диском и трубкой, заполненной дегазированной водой. К устройству также относятся охлаждающие и нагрузочные системы, не показанные на рис. 5, и блок автоматизации контроля и управления.

Устройство работает следующим образом. В гильзу загружается образец грунта, в боковой стенке которого (по трафарету 1×1 см) размещены "игольчатые" датчики положения для наблюдения за изменением плотности и влажности образца грунта. К образцу грунта в стакане подводится насыщенный водой капиллярно-пористый камень (обожженный карборунд или спеченный мелкозернистый песок), насыщенный водой. Ко дну стакана подводится заданная нагрузка. К штуцеру подключается система подачи воды в образец через пористый камень.

Вода в пористом камне в ходе опыта гарантированно находится в капиллярно-взвешенном состоянии. Это исключает ее гравитационное стекание в образец грунта. В то же время через штуцер может быть подано как повышенное, так и пониженное давление, моделирующее либо напор водоносного горизонта, либо гидросопротивление талой зоны, или нейтральное атмосферное давление, которое приравнивается к нулю. Такие граничные условия возможны в природных условиях промерзания грунтов и поэтому конструктивно были предусмотрены.

Для контроля над передвижением фронта промерзания в грунте с внутренней стороны гильзы установлена гирлянда термодатчиков.

Нагрузка на промерзающий образец грунта осуществляется через датчик силы блоком пневмопривода. Управление давлением осуществляется АСУ. Общее давление в системе создается с помощью компрессора.

Теоретическое обоснование применимости определения степени морозной пучинистости грунта путем промораживания испытуемого образца снизу подкреплено соответствующими экспериментами [Чеврев и др., 2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 6 в качестве примера представлены результаты промораживания одного и того же образца каолинитовой пылеватой глины, полученные во время испытаний с проведением цейтра-

ферной съемки, на момент начала опыта (0 ч) и через 20 ч.

Для проведения эксперимента были приготовлены влагонасыщенные образцы каолинитовой глины с влажностью 42 %. Образцы помещали в гильзы, имеющие форму параллелепипеда, и уплотняли при нагрузке 0.3 МПа в течение недели до промораживания.

Было проведено четыре эксперимента по промораживанию: опыты 2, 3, 4 и 5, при этом каждый образец в ходе испытания имел свои особенности с точки зрения граничных условий. В опыте 2 температура на верхнем и нижнем торцах образца поддерживалась в течение 36 ч при значениях $+2$ и -1.5 °С соответственно, после чего условия изменили и установили соответственно температуры $+1.7$ и -3 °С. Остальные опыты таких существенных изменений не имели: в опыте 3 температуры составили $+0.9$ и -3.2 °С; в опыте 4 равны $+0.9$ и -4.9 °С; в опыте 5 соответственно $+0.5$ и -7 °С. К образцам осуществляли неограниченный подвод воды (за исключением опыта 3). В опыте 3 было решено оставить для пучения лишь тот объем влаги, который находился в слое водонасыщенного песка сверху, удерживающего ее за счет капиллярных сил. Кроме того, образцы имели разную начальную высоту: 150, 121, 103 и 121 мм в опытах 2, 3, 4, 5 соответственно.

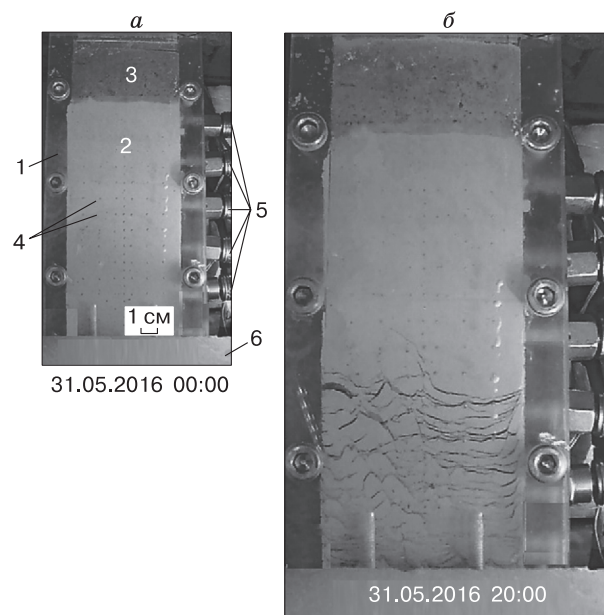


Рис. 6. Образец каолинитовой глины до промерзания (а) и через 20 ч после промерзания (б) в опыте 2.

1 – гильза, 2 – образец каолинитовой глины, 3 – мелкозернистый песок, капиллярно-насыщенный водой, 4 – датчики положения (метки), 5 – датчики порового давления, 6 – охлаждающая термоплита.

В ходе опытов с помощью встроенных датчиков измеряли поровое давление по высоте гильзы, температуры и плотности потока тепла на верхнем и нижнем торцах образца (см. рис. 6).

Для изучения эволюции криогенной текстуры ход эксперимента непрерывно записывался на камеру. Примеры такой эволюции в ходе эксперимента в открытой по влагообмену системе при начальной влажности 42 % приведены на рис. 7.

Путем применения цейтраферной видеосъемки получены динамика сегрегационного льдовыделения в промерзающем грунте, послойное осевое и горизонтальное деформирование (пучение и усадка), а также динамика плотности и влажности образца во времени, по высоте и ширине образца. В ходе охлаждения образца глины скорость движения фронта промерзания закономерно замедляется, так как с увеличением высоты мерзлой зоны при фиксированных граничных условиях снижается градиент температуры.

В итоге появляется оптимальная скорость промерзания для формирования наиболее крупных ледяных прослоев и пучения (0.01–

0.02 м/сут). Криогенная текстура постепенно сменяется от массивной и мелко-, частошлировой к средне- и крупношлировой. При максимальном замедлении движения фронта промерзания вырастают наиболее крупные шпильки, и при достижении критически малой скорости движения фронта рост шпильки вблизи него прекращается. Такой вывод логически следует из установленного факта, что при малых градиентах порового давления (менее 87 м/м) имеет место пороговый градиент влагопереноса поровой воды (см. рис. 3). В результате криогенная миграция к фронту промерзания прекращается. Дальнейшее крайне медленное охлаждение грунта может сопровождаться образованием только массивной криогенной текстуры.

Прослеживание послойного осевого и горизонтального деформирования, а также динамики плотности образца во времени, по высоте и ширине образца показало следующее. В промерзающем грунте отток воды из талой зоны в мерзлую вызывает в ней понижение порового давления. В результате этого талая зона испытывает объемную усадку. В ходе промерзания зона усадки удлиняет-

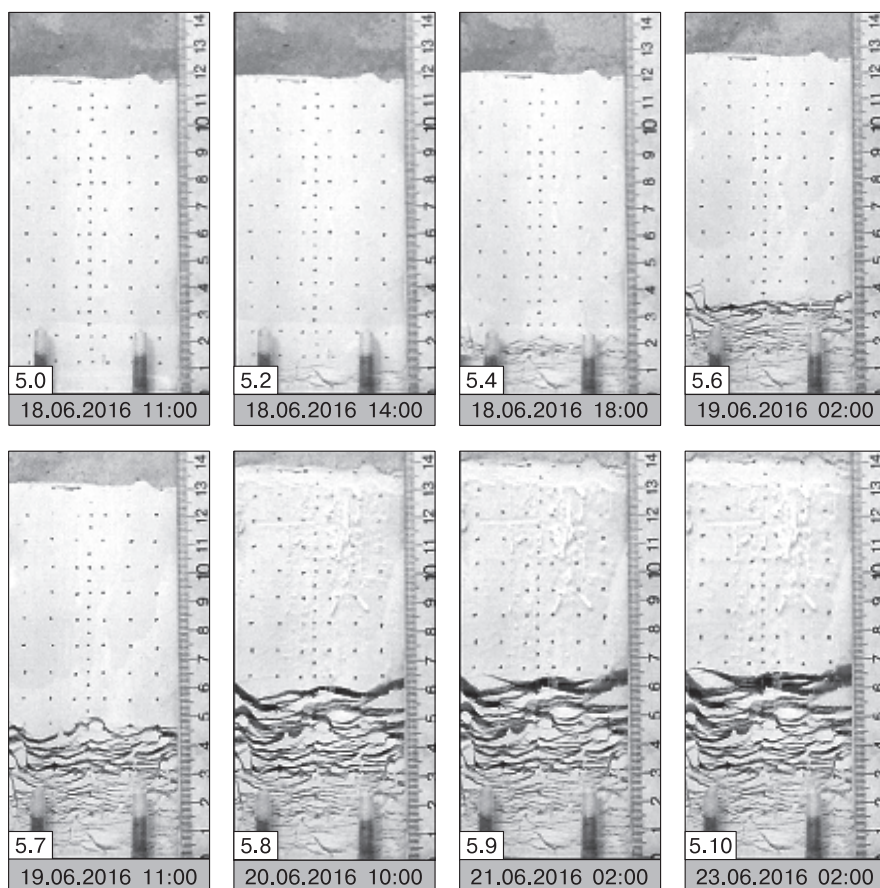


Рис. 7. Фрагменты динамики формирования криогенной текстуры в образце каолинитовой глины на разные моменты времени в опыте 5.

5.0–5.10 – лабораторные номера кадров цейтраферной видеосъемки. Состояние образца до промерзания: время 11:00 на 18.06.2016 г.

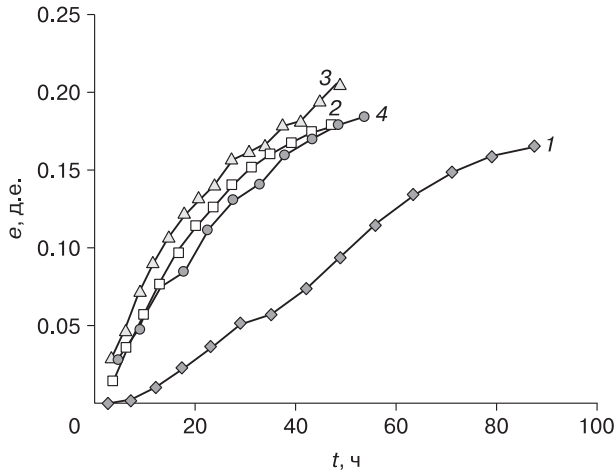


Рис. 8. Изменение относительной деформации промерзающих образцов e во времени t при различных температурных граничных условиях.

1 – опыт 2, $T = +2, -1.5^\circ\text{C}$ до 30 ч и $T = +1.7, -3^\circ\text{C}$ после 36 ч; 2 – опыт 3, $T = +0.9, -3.2^\circ\text{C}$; 3 – опыт 4, $T = +0.9, -4.9^\circ\text{C}$; 4 – опыт 5, $T = +0.5$ и -7°C .

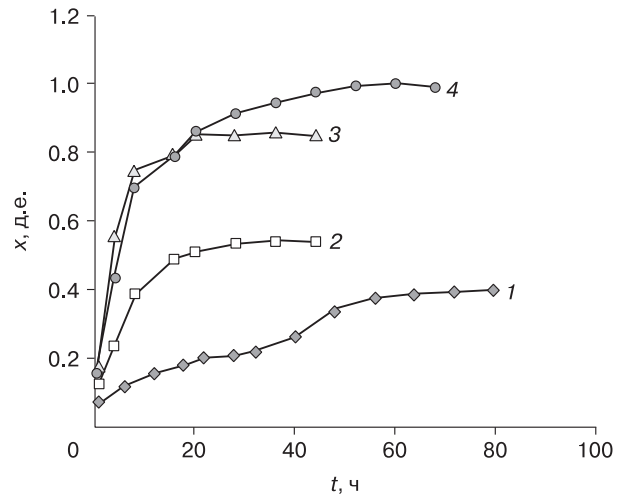


Рис. 9. Изменение относительной доли мерзлой части от общей высоты промерзающих образцов x во времени t при различных граничных условиях.

Усл. обозн. см. на рис. 8.

ся, становясь зоной транзитного переноса воды из внешнего источника в зону промерзания. При этом достигается плотность (и влажность) предела усадки, которая близка к нижнему пределу пластичности каолинитовой глины [Чеве́рев, 2004].

Поскольку высота образцов была разной, в качестве оценочных характеристик использовались различные приведенные величины. Например, на рис. 8 представлены результаты изменения относительной деформации образцов во времени (e), которая вычислялась по формуле

$$e = (H - H_0)/H_0,$$

где H_0 – высота до промерзания; H – высота во время промерзания.

Изменение высоты мерзлого слоя во времени вычислялось на основе данных камеры, на которой граница талой и мерзлой зон была хорошо видна даже при отсутствии ледяных шпиров в переходной зоне (“промерзающей каймы”), где характерно наличие массивной текстуры (мерзлая часть образца грунта вблизи фронта промерзания более темная по сравнению с талой).

На рис. 9 показано изменение доли мерзлой части от общей высоты промерзающих образцов во времени.

Исследование мерзлой части позволило рассчитать относительную деформацию пучения (ε_{fh}) образцов во времени (рис. 10) по формуле

$$\varepsilon_{fh} = h_f/d_i,$$

где h_f – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм; d_i – толщина промерзшего слоя образца грунта за вычетом h_f , мм.

На рис. 9 видно значительное ускорение процесса промерзания и роста доли высоты мерзлой части в образце при изменении граничных условий со стороны холодной части в сторону более низких температур. Интересно, что динамика деформации промерзающего образца с самой низкой температурой холодной зоны -7°C (опыт 5), как видно на рис. 8, сопоставима с промерзающими образцами при более высокой соответствующей граничной температурой (опыты 3 и 4), в то время

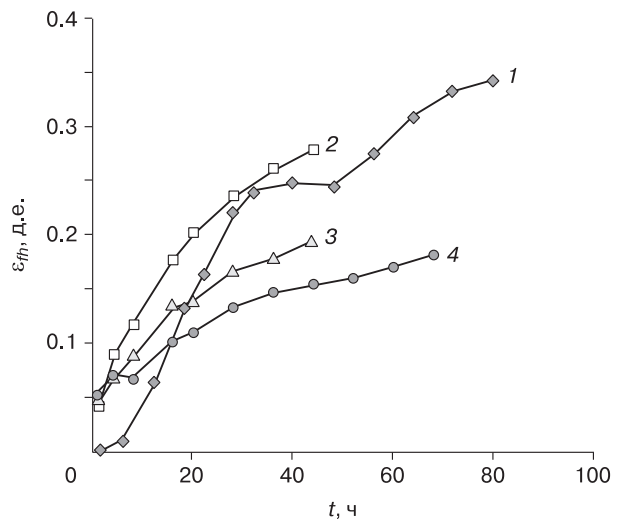


Рис. 10. Изменение относительной деформации пучения ε_{fh} образцов во времени t при различных граничных условиях.

Усл. обозн. см. на рис. 8.

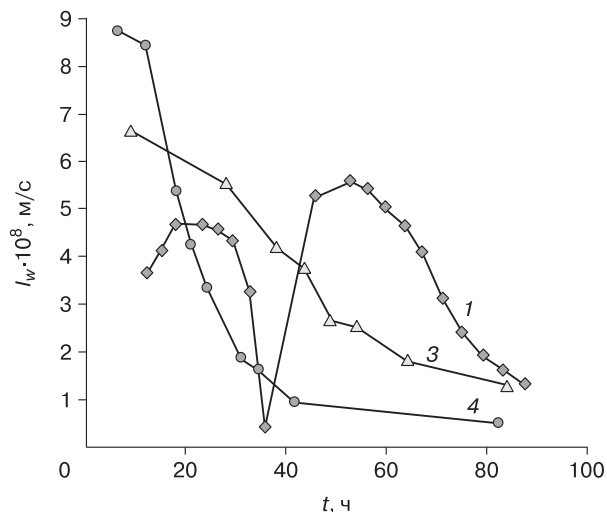


Рис. 11. Изменение величины плотности потока воды в грунте I_w в образцах в зависимости от времени t при различных граничных условиях.

Усл. обозн. см. на рис. 8.

как промерзающий образец в опыте 2 с самыми высокими граничными температурами заметно от них отстает.

В то же время образец в опыте 5 имеет самую низкую динамику пучения, а образец в опыте 2 – самую высокую (см. рис. 10). Это объясняется прежде всего тем, что образец в опыте 5 промерзал гораздо быстрее, чем в опыте 2 (см. рис. 9). В результате из-за слишком быстрого промерзания высокие начальные значения потока воды в грунте в опыте 5 нивелировались и быстро снижались, при этом величина потока воды в опыте 2 сохраняла высокое значение (рис. 11).

Динамика промерзания образца в опыте 5, по мнению авторов, связана с превалирующим в этом случае расширением грунта за счет заморозания воды, которая была в его порах изначально. Вклад в расширение грунта в этом опыте за счет роста шпиров минимален в сравнении с другими образцами, что дополнительно подтверждается низкими значениями потока воды при испытании (см. рис. 11). Для образца в опыте 2, в самых “теплых” условиях, вклад в расширение грунта за счет роста шпиров превалирует (см. рис. 10, 11).

На рис. 12 показаны графики изменения потоков тепла во времени I_q , при этом “холодному” и “теплому” соответствуют нижний и верхний торцы образца.

Плотности потока тепла измерялись на верхнем и нижнем торцах образца, при этом к нижне-

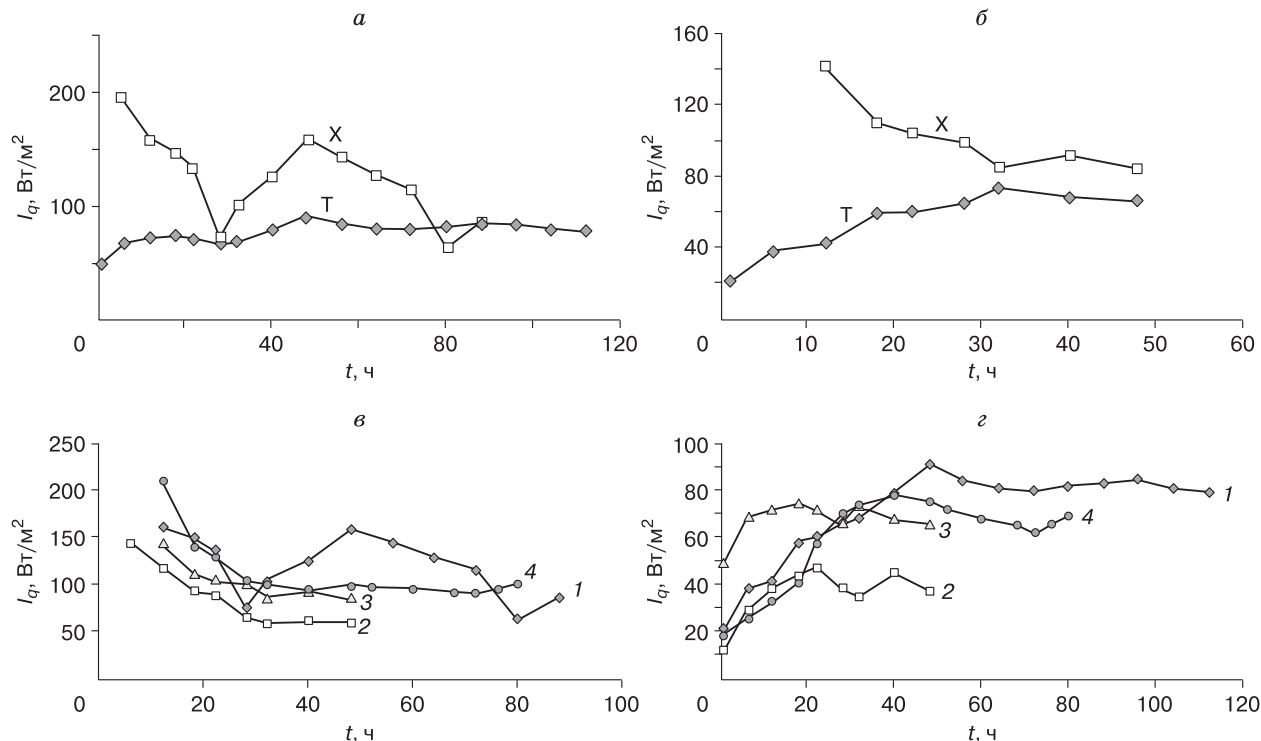


Рис. 12. Динамика плотности тепловых потоков I_q во времени t :

а, б – изменение потоков тепла на теплом (Т) и холодном (Х) торцах при промерзании образца в опытах 2 и 4 соответственно; *в* – изменение потоков тепла на теплом торце; *г* – то же, на холодном торце промерзающего образца каолинитовой глины. Остальные усл. обозн. см. на рис. 8.

му торцу подводилась отрицательная температура, к верхнему – положительная.

Датчики измерения порового давления в образцах стабильно работали лишь первые 6–9 часов, и это естественно. За это время внутри датчиков из-за понижения давления постепенно из растворенного в воде воздуха формировались пузырьки, после которых датчик не мог корректно измерять поровое давление. Этот процесс ускорялся тем сильнее, чем ниже было давление в нем. При замерзании датчика происходил обратный процесс, т. е. замерзание воды в датчике повышало давление в нем до 12 атм и более. Для такого типа датчиков из обожженной каолиновой глины существует естественный диапазон измерения отрицательного давления – не ниже 0,8 атм. Для измерения более низких давлений в засоленных промерзающих грунтах необходимо применять осмометры, которые, к сожалению, для измерения порового давления в промерзающих грунтах пока еще технически недостаточно разработаны.

Как следует из опытных данных (рис. 13), распределение порового давления по высоте промерзающего грунта в его талой зоне близко к линейному, что говорит о фильтрационном механизме влагопереноса.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено физическое лабораторное моделирование процесса промерзания пылеватой глины каолинового состава, которая относится к сильнопучинистым грунтам. Определены основные характеристики компонентного и фазового состава воды модельной глины, а также ее тепло- и массообменные и деформационные свойства. В ходе физического моделирования осуществлялся контроль над параметрами процесса промерзания, дифференциального пучения мерзлой и усадки талой зон, тепловлагопереноса и порового давления воды.

2. Путем применения цейтраферной видеосъемки выявлена динамика сегрегационного льдовыделения в промерзающем грунте, послонное осевое и горизонтальное деформирование (пучение и усадка), а также динамика плотности (влажности) образца во времени и по высоте.

3. Изменение граничных условий, а именно скачкообразное понижение температуры со стороны холодного источника, приводит вначале к резкому замедлению деформации и пучения образца и процесса переноса влаги к фронту промерзания, а затем, наоборот, к ускорению этих процессов.

4. Промерзание образцов в определенном диапазоне граничных условий приводит к сопоставимой динамике пучения образцов, однако скорости промерзания при этом значительно разнятся

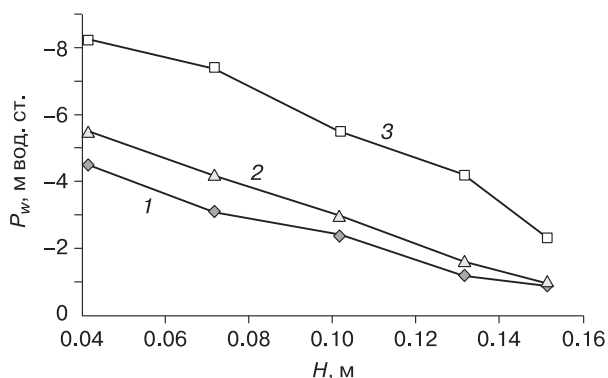


Рис. 13. Профиль порового давления в талой зоне P_w по высоте H образца каолиновой глины в разные моменты времени промерзания (опыт 2): 1 – 1 ч; 2 – 3 ч; 3 – 6 ч.

ся, что в конечном счете приводит к различной конечной деформации пучения уже после того, как фронт промерзания в образце практически остановится.

5. Экспериментально подтвержден фильтрационный механизм влагопереноса в талой зоне промерзающего сильнопучинистого грунта.

Благодарности. Материалы для статьи получены благодаря финансовой поддержке ООО «НИИ Транснефть» (договор № 4220 П/20-511/2015 от 19.11.2015 г.).

Литература

- Гарагуля Л.С., Будлович С.Н., Романовский Н.Н. и др. Природные опасности России. Геокриологические опасности. М., КРУК, 2000, 315 с.
- Чеве́рев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Чеве́рев В.Г., Брушков А.В., Половков С.А. и др. Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах // Криосфера Земли, 2021а, т. XXV, № 5, с. 3–12.
- Чеве́рев В.Г., Бу́рнаев Р.С., Гага́рин В.Е., Сафро́нов Е.В. Влияние внешней нагрузки на степень морозной пучинистости глинистых грунтов // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 57–62.
- Чеве́рев В.Г., Видя́пин И.Ю., Мотенко Р.Г., Кондаков М.В. Определение содержания незамерзшей воды в грунтах по изотермам сорбции–десорбции // Криосфера Земли, 2005, т. IX № 4, с. 29–33.
- Чеве́рев В.Г., Сафро́нов Е.В., Коротков А.А., Чернягин А.С. Физическая постановка задачи для численной модели промерзания и пучения грунтов с учетом тепло-массопереноса // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2021б, т. 11, № 3, с. 244–256.
- Penner E. Aspects of ice lens growth in soils // Cold Regions Sci. and Technol., 1986, vol. 13, p. 91–100.

References

- Garagulya L.S., Buldovich S.N., Romanovsky N.N. et al. Natural hazards of Russia. Geocryological hazards. Moscow, KRUK, 2000, 315 p.
- Cheverev V.G. Priroda kriogennykh svoystv gruntov [The nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Nauchny mir, 2004, 234 p. (in Russian).
- Cheverev V.G., Brushkov A.V., Polovkov S.A., Pokrovskaya E.V., Safronov E.V. Analysis of concepts on the mechanism of cryogenic water migration in freezing soils. Earth's Cryosphere, 2021a, vol. XXV, No. 5, p. 3–10.
- Cheverev V.G., Burnaev R.S., Gagarin V.E., Safronov E.V. Influence of the 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., Vidyapin I.Yu., Motenko R.G., Kondakov M.V. Determination of the content of unfrozen water in ground from sorption–desorption isotherms. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2005, vol. IX, No. 4, p. 29–33 (in Russian).
- Cheverev V.G., Safronov E.V., Korotkov A.A., A. S. Cherniatyn A.S. Physical formulation of the numerical model freezing and frost heaving of soils with consideration of heat and mass transfer. Science and Technology of Pipeline Transport of oil and oil Products, 2021b, vol. 11, No. 3, p. 244–256 (in Russian).
- Penner E. Aspects of ice lens growth in soils. Cold Regions Science and Technology, 1986, vol. 13, p. 91–100.

*Поступила в редакцию 5 июля 2021 г.,
после доработки – 12 декабря 2022 г.,
принята к публикации 19 декабря 2022 г.*