

УДК 624.131.433

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Оригинальная статья

Воздействие циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей песка с высокодисперсной глиной

А. Л. Невзоров[✉], Ю. В. Саенко, А. М. Ширанов, С. В. Чуркин

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Российская Федерация
[✉]a.l.nevzorov@yandex.ru

Аннотация

Для изоляции твердых бытовых и промышленных отходов используются смеси песков с высокодисперсными глинами. В отличие от природных глинистых грунтов им присущи однородность состава, удобоукладываемость, высокие деформационно-прочностные характеристики. Целью настоящих исследований было изучение воздействия на водопроницаемость указанных смесей циклического промерзания-оттаивания. Испытывались смеси четырех типов песков с глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды, сложенной преимущественно сапонитом – слоистым минералом той же группы, что и монтмориллонит. Смеси готовились из расчета содержания глинистых частиц 4 и 8 % от массы песков. Эксперименты проводились в лабораторной установке, состоящей из четырех приборов для определения морозного пучения и водопроницаемости, размещенных в емкости с водой. В ходе опыта уровень воды в емкости постепенно снижался, обеспечивая требуемый темп перемещения фронта промерзания, или повышался для оттаивания образцов. Деформации морозного пучения смесей песков с 4 % глинистых частиц при внешней нагрузке на образцы 2 кПа составляли 10,0–16,4 %, а пять циклов промерзания-оттаивания привели к росту коэффициента фильтрации смеси в 2,0–4,7 раза. Смеси песков с 8 % глинистых частиц из-за существенно большей пучинистости испытывались под внешней нагрузкой 12 кПа, в результате увеличение коэффициента фильтрации оказалось примерно таким же, как и в первом случае, – в 1,2–2,0 раза. Эксперименты показали, что исследованные смеси могут применяться для изоляции отходов, но для устранения выявленного эффекта роста водопроницаемости водозащитный экран следует покрывать слоем инертного грунта, обеспечивающим сокращение глубины промерзания экрана и создающим на него нагрузку.

Ключевые слова: сапонит, промышленные отходы, твердые бытовые отходы, водопроницаемость грунта, промерзание-оттаивание, морозное пучение

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-20013).

Для цитирования: Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М., Чуркин С.В. Воздействие циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей песка с высокодисперсной глиной. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):69–79. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Original article

Effect of freeze-thaw cycles on water permeability of sand mixtures with nanoclay

Alexander L. Nevzorov[✉], Yuri V. Saenko, Alexey M. Shiranov, Sergey V. Churkin

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation
[✉]a.l.nevzorov@yandex.ru

Abstract

The mixtures of sands and nanoclays are used to isolate municipal and industrial solid wastes. Compared with natural clayey soils, these mixtures are characterized by homogeneous composition, workability, and low compressibility. This study investigated the effect of freeze-thaw cycles on their permeability. The mixtures of four sands and a

saponite clay suspension generated by diamond ore processing were studied. The mixtures were prepared on the basis of 4 % and 8 % clay from sand weight. The tests were performed using an apparatus consisting of four devices for measuring frost heave and permeability, which were placed in containers with water. The water level was decreased gradually to ensure sample freezing or increased to ensure sample thawing. The frost heave of the mixtures with 4 % clay was 10.0–16.4 % under an external load of 2 kPa, and the five freeze–thaw cycles resulted in an increase in the hydraulic conductivity by 2.0–4.7 times. The mixtures with 8 % clay were tested under a load of 12 kPa, because of their high frost susceptibility. The hydraulic conductivity increased by approximately the same value as in the first case, i.e., by 1.2–2.0 times. The experiments have shown that the examined mixtures are suitable for isolating wastes. However, to eliminate the above effect, a waterproof liner should be covered with inert soil, which would reduce the depth of frost penetration and apply the load on it.

Keywords: saponite, industrial waste, municipal solid waste, hydraulic conductivity, freezing-thawing, frost heave
Funding. This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-27-20013).

For citation: Nevzorov A.L., Saenko Y.V., Shiranov A.M., Churkin S.V. Effect of freeze–thaw cycles on water permeability of sand mixtures with nanoclay. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):69–79. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Введение

Для защиты геологической среды от загрязнения фильтратом на участках складирования промышленных и бытовых отходов применяют одно- или двухслойные экраны из глинистых грунтов. Недостатками таких экранов являются неоднородность состава, например, наличие в глинистом грунте линз песка или включений крупнообломочных грунтов, сложность укладки и уплотнения, а также чувствительность к атмосферным воздействиям, тем более что при постепенном заполнении участка складирования экран долгое время подвергается увлажнению и сезонному промерзанию. Причем из-за длительных оттепелей может наблюдаться более одного цикла промерзания-оттаивания в течение года, так, например, на опытном участке в Норвегии за 8 лет наблюдений грунт промерзал и оттаивал 15 раз [1].

Промерзание глинистого экрана сопровождается морозным пучением, формированием линз и прослоек льда из влаги, мигрирующей к фронту промерзания. В глине появляются микротрещины, изменяются ее микроструктура и размер пор, что ведет к увеличению водопроницаемости экрана после оттаивания [2–5]. Установлено, что наибольший эффект дает первый цикл промерзания-оттаивания, а после 4–5 циклов значения водопроницаемости практически стабилизируются [2, 3, 6–9]. В зависимости от вида и состояния глинистого грунта и режима промерзания коэффициент фильтрации может увеличиваться на один-два и даже на три порядка [10–13].

В последние десятилетия для изоляции отходов, в том числе радиоактивных, применяют песчано-бентонитовые смеси (ПБС) [14–16]. Указанным смесям кроме низкой водопроницае-

мости присущи однородность состава, удобоукладываемость, отсутствие набухания-усадки [17–19]. Существенно меньше по сравнению с глинистыми грунтами чувствительность ПБС к циклическому промерзанию-оттаиванию. В экспериментах J. Kraus и C. Venson такое воздействие привело к увеличению коэффициента фильтрации ПБС в 1,3–3,4 раза, а в полевых экспериментах A. Erickson и др. всего лишь в 1,25 раза [9, 20]. C. Chen с соавторами в опытах со смесями песка с Na-бентонитом также получил незначительное увеличение водопроницаемости, тогда как у смесей с Ca-бентонитом имел место обратный эффект [21]. Z. Zhang высказал предположение, что причиной роста водопроницаемости смесей может служить не только формирование и последующее таяние линз льда, но еще и образование агрегатов глинистых частиц [22].

В лабораторных экспериментах, связанных с морозным пучением грунтов, существенное влияние на результаты оказывает методика испытаний, в частности, температурный градиент, условия подпитки образца водой и действующая на него нагрузка.

При испытаниях на пучинистость обычно на верхнем торце образца поддерживают температуру около $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на нижнем $1\ldots 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает перемещение фронта промерзания со скоростью, близкой к природным значениям. Тем не менее, в ряде работ, связанных с изучением воздействия промерзания-оттаивания на водопроницаемость, образцы выдерживались при весьма низкой температуре – вплоть до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 7, 23, 24]. Высокий темп промерзания, конечно, не способствовал миграционному льдовыделению.

В экспериментах S. Xian и др. с испытанием на циклическое промерзание-оттаивание изоли-

рованных образцов и образцов с подпиткой водой со стороны нижнего теплого торца, т. е. по закрытой и открытой схемам, в первом случае приrost коэффициента фильтрации оказался в шесть раз меньше, чем во втором [3]. Шведские авторы для подобных испытаний предложили использовать полузакрытую схему, при которой образец изолирован снизу, но сверху ограничен пористым штампом, не препятствующим отводу поровой влаги при консолидации под нагрузкой [4]. Заметим, что закрытая и полузакрытая схемы испытаний соответствуют редко встречающемуся на практике случаю эксплуатации защитных экранов.

Рост нагрузки на образец ведет к снижению деформаций пучения и коллапсу пор, образовавшихся при таянии линз и прослоек льда. В опытах А. Othman и С. Benson нагрузка 70 кПа устраняла эффект роста водопроницаемости глинистого грунта после циклического промерзания-оттаивания [13]. Заметим, что для создания указанной нагрузки поверх экрана следует отсыпать защитный слой непучинистого грунта или слой отходов толщиной несколько метров. По данным В.Н. Жиленкова, коэффициент фильтрации глинистого грунта при отсутствии нагрузки увеличивался после промерзания-оттаивания на 2–3 порядка, а под нагрузкой 100 кПа – в 20 раз, при этом по истечении 2 суток он достигал исходного значения [11].

Источником ошибок может служить практикуемое рядом авторов применение двух приборов – для испытаний на морозное пучение и компрессионно-фильтрационного, так как свойства образцов при переносе из одного прибора в другой претерпевают существенные изменения. Устранить эту погрешность позволяют комбинированные компрессионно-фильтрационные приборы с охлаждаемым штампом, однако малая высота образцов в таких приборах не позволяет исследовать миграционное льдовыделение [6, 25]. В приборе В.Н. Жиленкова образец промораживается сверху вниз, а вода после его оттаивания фильтруется в радиальном направлении – от расположенной в центре перфорированной трубки к дренирующей оболочке [11]. Кубические образцы с размером стороны 7–8 см испытываются в приборе весьма сложной конструкции, созданном G. Hirose и Y. Ito, где нагрузка на образец прикладывается сверху, а его промораживание и поток воды при определении водопроницаемо-

сти могут быть направлены как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении [26].

Ранее нами было предложено для устройства экранов на свалках, например бытовых отходов, использовать смеси местных песков с глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды. Указанная фракция сложена преимущественно сапонитом – слоистым минералом той же группы, что и монтмориллонит, преобладающий в составе бентонита. Суспензия этой высокодисперсной глины скапливается в пруде-отстойнике хвостохранилища. Опыты показали, что возможно внесение частиц глины в слой песка при фильтрации суспензии, т. е. путем кольматации пор или перемешиванием песка с суспензией [27, 28]. Получаемый состав по водопроницаемости практически идентичен песчано-бентонитовым смесям. Внесение 4 % глинистых частиц снижает коэффициент фильтрации песка в среднем на один порядок, 8 % – на два, 16 % и более – на четыре–пять порядков.

Целью настоящих исследований было изучение эффекта циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей местных песков с высокодисперсной глиной из отходов обогащения алмазоносной руды.

Эксперименты проводились на специально изготовленном приборе, который обеспечивал испытание водонасыщенных образцов с заданным темпом перемещения фронта промерзания и определение коэффициента фильтрации при градиентах напора до 15.

Материалы исследования

Исследовались смеси четырех типов песков различного состава и генезиса с сапонитсодержащей суспензией из прудковой зоны хвостохранилища горно-обогатительного комбината.

Гранулометрический состав песков, степень неоднородности $c_u = d_{60}/d_{10}$ и плотность частиц ρ_s приведены в таблице 1.

Твердая фаза суспензии на 92–94 % состоит из частиц размером менее 0,001 мм. В ее составе преобладает сапонит (62,8 %), присутствуют частицы кварца (7,6), монтмориллонита (7,3), палыгорскита (6,8 %) и других минералов.

Смеси готовили из расчета содержания твердой фазы суспензии 4 и 8 % от массы твердой фазы песков. При большей добавке глины испытания на водопроницаемость следует проводить при градиенте напора до 120, что требует приме-

Таблица 1

Гранулометрический состав песков

Table 1

Particle-size distribution of sands

Пески	Содержание фракций, %, с размерами частиц, мм					d_{60} , мм	d_{10} , мм	c_u	ρ_s , г/см ³
	более 0,50	0,50 – 0,25	0,25 – 0,10	0,10 – 0,05	менее 0,05				
1. Мелкий (<i>a</i>)	0,20	31,70	61,36	5,44	1,30	0,23	0,11	2,2	2,65
2. Мелкий (<i>am</i>)	0,49	13,68	64,59	12,10	9,14	0,19	0,05	3,5	2,66
3. Средней крупности (<i>f</i>)	18,82	33,36	34,04	5,85	7,93	0,34	0,07	5,0	2,66
4. Мелкий (<i>lg</i>)	0,07	0,32	82,57	12,32	4,72	0,18	0,07	2,5	2,65

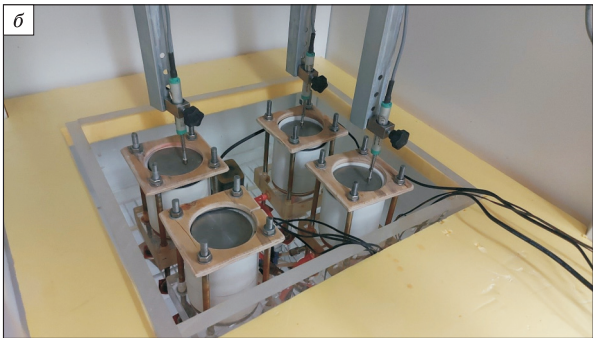
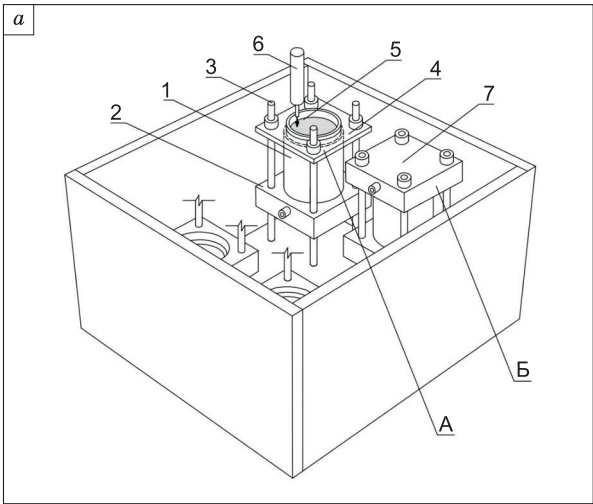


Рис. 1. Лабораторная установка: *a* – схема прибора: 1 – гильза, 2 – основание, 3 – шпилька, 4 – ограничительная пластина, 5 – штамп, 6 – датчик перемещений, 7 – крышка. Варианты сборки приборов: А – при циклическом промерзании-оттаивании, Б – при определении водопроницаемости; *б* – фото установки при циклическом промерзании-оттаивании

Fig. 1. Experimental apparatus: *a* – apparatus scheme, 1 – shell, 2 – base, 3 – screw, 4 – restrictor plate, 5 – stamp, 6 – displacement sensor, 7 – top. Apparatus assembly options: А – during cyclic freezing-thawing, Б – during determining water permeability; *б* – apparatus photo during cyclic freezing-thawing

нения весьма сложного оборудования, например камер трехосного сжатия, в которых сложно обеспечить замораживание части образцов [27, 28]. Коэффициент уплотнения смесей составлял 0,94–0,96. Испытания проводили с двух-, трехкратной повторяемостью для каждого из составов. Всего было испытано 32 образца.

Приборы и методика испытаний

Эксперименты проводили в специально созданной лабораторной установке, конструкция которой защищена патентом на изобретение [29]. Установка содержит четыре прибора для определения морозного пучения и водопроницаемости, размещенных в емкости с водой (рис. 1). В ходе опыта уровень воды в емкости постепенно снижается, обеспечивая требуемый темп перемещения фронта промерзания, или повышается, вызывая оттаивание образцов.

Каждый из приборов содержит гильзу 1 из полиэтилентерефталата, в которой размещается образец высотой 100 мм и диаметром 70 мм. Для предотвращения смерзания образца с гильзой ее внутреннюю поверхность покрывают полиэтиленом по слою парафина. Гильза устанавливается в основание прибора 2 на перфорированный диск и крепится с помощью четырех шпилек 3 и пластины 4 (вариант сборки А на рис. 1, *a*). Сверху на образец укладывается металлический штамп 5. Его перемещения измеряются с помощью закрепленного на кронштейне датчика перемещений 6.

В одном из четырех приборов в стенке гильзы выполнены каналы, через которые в образец на глубине 25, 50 и 75 мм от верхнего торца заводятся термисторы. Термисторы располагаются также под штампами на верхних торцах всех образцов.

Приборы размещаются в емкости с водой, а вся установка – в морозильной камере с температурой $-(5...6)^\circ\text{C}$. С помощью нагревательного элемента и циркуляционного насоса температура воды в емкости поддерживается в течение всего опыта $1...1,5^\circ\text{C}$.

Уровень и температура воды в емкости, температура в морозильной камере, под штампами и внутри одного из образцов, перемещение штампов регистрируются автоматически каждые 5 мин. Управление работой установки осуществляется автоматически, соответствующая программа написана на языке C++.

Уровень воды в емкости регулируется с помощью насоса, связанного через модуль управления с установленными под ее дно силоизмерительными датчиками. С помощью указанных датчиков до начала эксперимента определяют вес установки с образцами и водой, заполняющей емкость до верха образцов и до требуемой глубины их промерзания. Работа насоса программируется из условия обеспечения заданной скорости понижения уровня воды.

Для определения водопроницаемости смесей штампы 5 снимаются, на верхние торцы образцов по тканевому фильтру отсыпается дренирующий слой гравия с размером частиц $2...5\text{ мм}$. Устанавливаются и крепятся с помощью шпилек 3 крышки 7 (вариант сборки Б на рис. 1, а).

Вода подается к образцам снизу с помощью насоса со встроенным расходомером.

Собранную установку выдерживают не менее суток при температуре $1...1,5^\circ\text{C}$, после чего определяют исходную водопроницаемость смесей. Затем температуру в камере понижают до $-(4...6)^\circ\text{C}$ и опускают уровень воды в емкости со скоростью 10 мм/сут . Через 5 сут, когда он достигнет середины образцов, промораживание останавливают, поднимая уровень воды до верха образцов.

В первых опытах при циклическом промерзании-оттаивании наблюдался кумулятивный эффект – деформации пучения от цикла к циклу нарастали.

Анализ температурного режима образцов был выполнен путем численного моделирования прибора в ПК Geostudio. Решалась осесимметричная задача, где учитывались теплофизические свойства материала гильзы и образца, теплота фазовых переходов поровой влаги и влажность за счет незамерзшей воды, температурный режим в камере, температура и уровень воды в емкости (рис. 2, а). Моделирование показало, что при сохранении температуры в камере $-(5...6)^\circ\text{C}$ полностью погруженный в воду образец в течение суток полностью не оттаивал, т. е. под штампами постепенно нарастали линза льда и прослойка мерзлого грунта (рис. 2, б). На основании

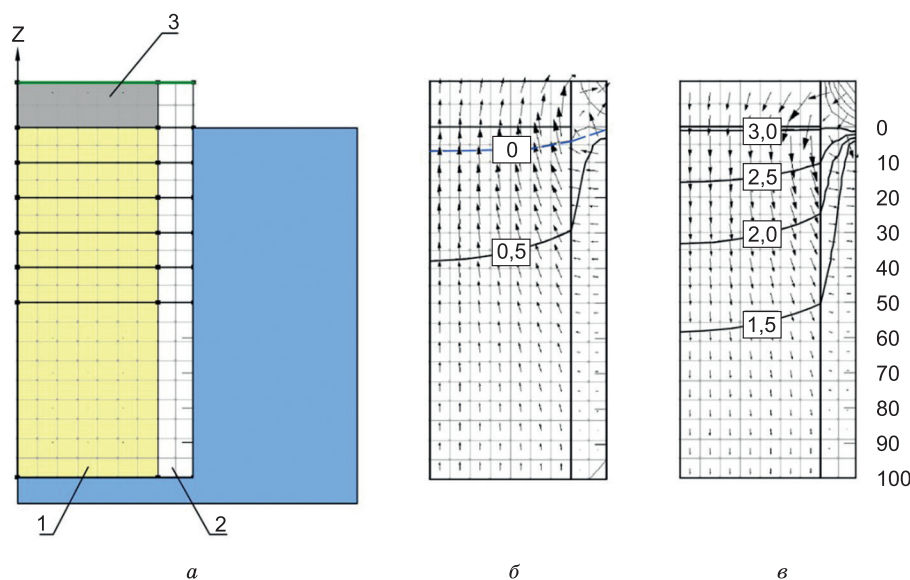


Рис. 2. Результаты численного моделирования процесса оттаивания образца: а – схема осесимметричной модели (1 – образец, 2 – гильза, 3 – штамп); б – изотермы при первом способе оттаивания образца; в – то же при втором способе

Fig. 2. Results of numerical simulation of sample thawing process: а – axisymmetric model scheme, where 1 – sample, 2 – shell, 3 – stamp; б – isotherms for the first method of sample thawing, в – the same for the second method

моделирования методику испытаний откорректировали – для полного оттаивания образцов температуру в камере поднимали до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 4 часа (рис. 2, в).

После завершения пяти циклов промерзания-оттаивания вновь определяли водопроницаемость образцов.

Результаты испытаний

Данные измерений температуры рассмотрим на примере одного из циклов промерзания-оттаивания образца смеси мелкого аллювиально-морского песка с 4 % высокодисперсной глины. Как отмечалось выше, замеры выполнялись под штампом и на глубине 25, 50 и 75 мм от верхнего торца образца каждые 5 мин. Для сокращения числа экспериментальных точек и сглаживания варьирования температуры за счет фазовых переходов поровой влаги при построении представленных на рис. 3, а графиков использовали

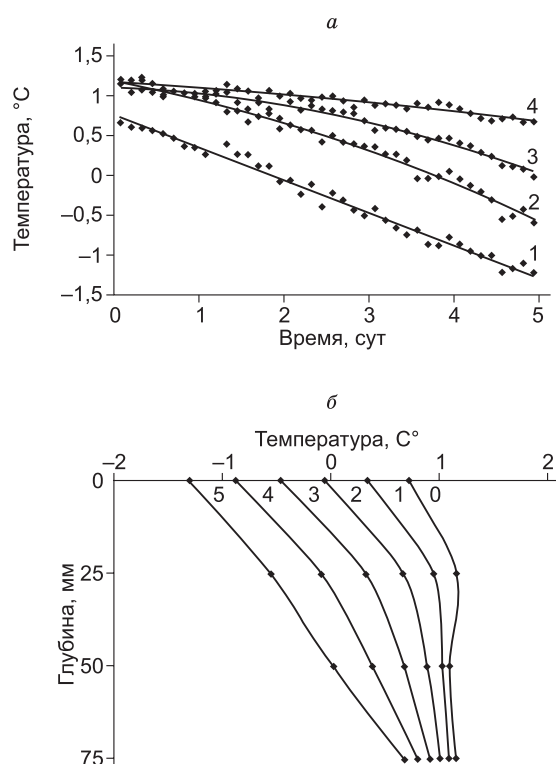


Рис. 3. Температура образца: а – изменение во времени на расстоянии от верхнего торца: 1 – 0, 2 – 25 мм, 3 – 50 мм, 4 – 75 мм; б – изменение с глубиной, числа у графиков показывают время в сутках от начала опыта

Fig. 3. Sample temperature: а – a change over time at the distance from the top end: 1 – 0, 2 – 25 mm, 3 – 50 mm, 4 – 75 mm; б – change in a depth, the numbers show the time in days from the experiment start

средние значения температуры за трехчасовые интервалы. Как видим, фронт промерзания достиг глубины 50 мм за 5 сут, т. е. средняя скорость перемещения фронта промерзания совпадает со скоростью понижения уровня воды в емкости 10 мм/сут. Начальная температура на торце образца ниже температуры воды объясняется быстрым остыванием штампа за первые три часа наблюдений при температуре в камере $-(5...6)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С использованием представленных на рис. 3, а зависимостей построены графики посуточного изменения температуры образца (см. рис. 3, б). Их характер является типичным для подобных испытаний, несмотря на необычный способ управления темпом промерзания. Наблюдающееся выравнивание градиента температуры в верхней и средней частях образца в ходе опыта свидетельствует о незначительных тепловых потерях через стенки гильзы при понижении уровня воды в емкости даже до половины высоты образца. В противном случае температура части образца выше уровня воды была бы значительно ниже.

Далее предметом анализа стала фактическая скорость перемещения фронта промерзания. Заметим, что с некоторой погрешностью температура начала замерзания принята нами равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Графики на рис. 4 показывают, что на протяжении первых 2 суток образец не замерзал, а наблюдавшийся в это время подъем штампа был обусловлен формированием под ним линзы льда. В течение следующих 3 суток фронт промерзания перемещался со скоростью от 13 до 19 мм/сут и догнал смещающуюся со скоростью 10 мм/сут поверхность воды в емкости. В других опытах задержка с промерзанием грунта составляла 1,3–2,2 сут и в среднем составила 1,5 сут, а средняя скорость промерзания образцов была около 15 мм/сут.

Различие в скоростях понижения уровня воды в установке и фронта промерзания следует учитывать при планировании экспериментов. Точный прогноз хода промерзания может дать численное моделирование прибора. В частности, практически совпадающий с экспериментальной зависимостью график 2 на рис. 4 получен с помощью ПК Geostudio.

Деформации того же образца при циклическом промерзании-оттаивании представлены на рис. 5. В первом цикле при промерзании образца на 50 мм и давлении под штампом $p = 2\text{ кПа}$ пу-

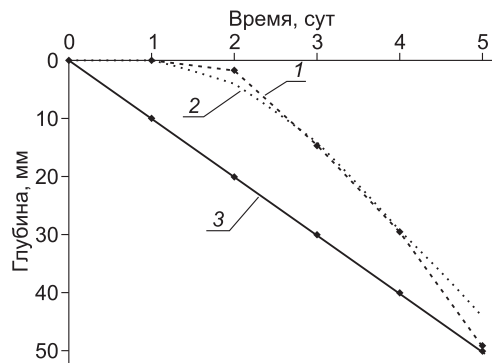


Рис. 4. Ход промерзания образца: 1 – положение нулевой изотермы по данным опыта, 2 – то же по данным численного моделирования, 3 – положение поверхности воды в емкости лабораторной установки

Fig. 4. Process of sample freezing: 1 – position of the zero isotherm according to experimental data, 2 – the same according to numerical simulation data, 3 – position of the water surface in the experimental apparatus

чение достигло 7,4 мм, исследуемая смесь показала себя как сильнопучинистый грунт, так как относительные деформации превысили 14 %. При оттаивании высота образца не достигла исходного значения – остаточные деформации составили 4,0 мм. В следующих четырех циклах деформации пучения были примерно одинаковыми и характерными для среднепучинистых грунтов – 3,0–3,1 мм или около 6 %. Деформации при оттаивании изменялись от 3,4 до 3,7 мм и в среднем составляли 3,5 мм. Превышение деформаций при оттаивании над пучением можно объяснить постепенным снижением пористости верхней части образцов, получившей значительное разуплотнение в первом цикле. Перед повторным определением водопроницаемости остаточные деформации образца составили всего лишь 2,1 мм, или 4,2 % от глубины промерзания.

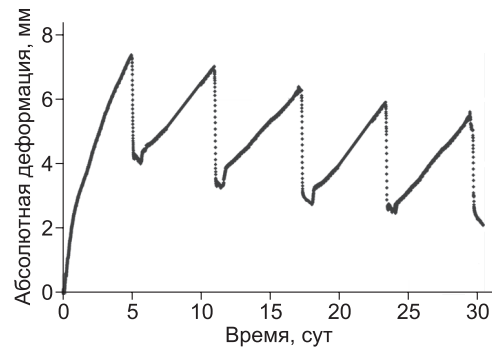


Рис. 5. Деформации образца при циклическом промерзании-оттаивании

Fig. 5. Sample deformations during cyclic freezing-thawing

Деформации морозного пучения смесей четырех песков с 4 % высокодисперсной глины изменялись в пределах 5,0–8,2 мм. Остаточные деформации после пяти циклов промерзания-оттаивания составляли 1,9–3,1 мм.

Циклическое промерзание-оттаивание привело к увеличению скорости фильтрации дистиллированной воды через образец с 0,047 м/сут до 0,063 м/сут, или в 1,34 раза.

В табл. 2 приведены средние значения коэффициентов фильтрации образцов смесей всех песков с 4 % высокодисперсной глины: в исходном состоянии – k_0 , после циклического промерзания-оттаивания – k_f . Там же даны коэффициенты фильтрации песков k_n при равных с образцами смесей коэффициентах пористости.

Известно, что при движении жидкости через двухслойный экран или, в нашем случае, через

Таблица 2
Результаты испытаний смесей песков с 4 % высокодисперсной глины, $p = 2$ кПа

Table 2

Test results for sand mixtures with 4 % nanoclay, $p = 2$ kPa

Песок	Коэффициент пористости	k_n , м/сут	Коэффициенты фильтрации смесей, м/сут			k_f/k_0	k_1/k_0	k_n/k_1
			k_0	k_f	k_1			
1. Мелкий (a)	0,64–0,67	1,35	0,085	0,14	0,40	1,7	4,7	3,4
2. Мелкий (am)	0,57–0,60	0,78	0,047	0,063	0,095	1,3	2,0	8,2
3. Средней крупности (f)	0,47–0,50	0,98	0,022	0,030	0,047	1,4	2,1	20,9
4. Мелкий (lg)	0,64–0,67	1,62	0,10	0,16	0,40	1,6	4,0	4,1

образец после циклического промерзания-оттаивания коэффициент фильтрации можно найти по формуле [30]

$$k_f = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2}}, \quad (1)$$

где h_1 и k_1 – высота и коэффициент фильтрации подвергшейся промерзанию верхней части образца, h_2 и $k_2 = k_0$ то же оставшейся части.

В лабораторной установке образцы высотой $h = 100$ мм промораживались на 50 мм, поэтому $h_1 = h_2 = h/2$. Преобразуем приведенную формулу для вычисления коэффициента фильтрации подвергавшейся циклическому промерзанию верхней половины образца:

$$k_1 = \frac{k_f}{2 - m}, \quad (2)$$

где $m = k_f/k_2 = k_f/k_0$.

Вычисленные по формуле (2) значения k_1 и отношение k_1/k_0 приведены в табл. 2. Как видим, результатом циклического промерзания-оттаивания стало увеличение водопроницаемости смесей в 2,0–4,7 раза. Тем не менее эффект за счет внесения в пески 4 % глинистых частиц остался весьма существенным – отношение k_1/k_0 у мелких песков находится в интервале 3,4–8,2, а у песка средней крупности равно 20,9.

Эксперименты со смесями, содержащими 8 % глинистых частиц, показали, что им свойственно пучение до 10,1 мм (20,2 %) и большой прирост водопроницаемости в результате циклического промерзания-оттаивания: $k_f/k_0 > 1,6$ и $k_1/k_0 > 5$. Снизить деформации пучения можно, как отмечалось выше, за счет внешней нагрузки, поэтому испытания образцов указанных смесей проводили при давлении под штампом 12 кПа, соответствующей слою грунта толщиной примерно

0,7 м. Нагрузка позволила снизить деформации пучения до 3,0–4,8 %. Результаты опытов приведены в табл. 3.

Водопроницаемость смеси в результате циклического промерзания-оттаивания увеличилась в 1,2–2,0 раза, т. е. эффект оказался меньше, чем у смесей с содержанием глинистых частиц 4 % и давлением под штампом 2 кПа.

Обсуждение результатов

Проведенные лабораторные эксперименты показали, что исследованным смесям свойственно весьма значительное морозное пучение. Максимальные деформации пучения, когда уровень воды в приборе совпадает с фронтом промерзания, а нагрузка на образцы равна 2 кПа, у смесей песков с 4 % высокодисперсной глины достигали 10,0–16,4 % от глубины промерзания, а у смесей с 8 % глины – 14,0–20,2 %. Нагрузка 12 кПа на образцы вторых смесей позволила снизить деформации пучения до 3,0–4,8 %, что соответствует слабо- и среднепучинистым грунтам.

Результатом циклического промерзания-оттаивания стало увеличение водопроницаемости смесей. Коэффициент фильтрации смесей песков с 4 % глины увеличился в 2,0–4,7 раза, а с 8 % глины – в 1,2–2,0 раза. Тем не менее, даже с учетом воздействия периодического промерзания добавка всего лишь 4 % высокодисперсной глины позволила снизить коэффициент фильтрации мелких песков в 3,4–8,2 раза при нагрузке 2 кПа, а песка средней крупности – в 20,9 раза. У смеси с 8 % глины после промерзания под нагрузкой 12 кПа водопроницаемость оказалась меньше, чем у мелких песков, в 13–211 раз и в 516 раз, чем у песка средней крупности.

Полученные результаты необходимо учитывать при использовании исследованных смесей

Таблица 3
Результаты испытаний смесей песков с 8 % высокодисперсной глины, $p = 12$ кПа

Test results for sand mixtures with 8 % nanoclay, $p = 12$ kPa

Table 3

Песок	Коэффициент пористости	k_n , м/сут	Коэффициенты фильтрации смесей, м/сут			k_f/k_0	k_1/k_0	k_n/k_1
			k_0	k_f	k_1			
1. Мелкий (a)	0,60–0,63	1,35	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,2	182
2. Мелкий (am)	0,53–0,57	0,78	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	1,2	1,5	211
3. Средней крупности (f)	0,45–0,48	0,98	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,3	516
4. Мелкий (lg)	0,58–0,61	1,62	$64 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	$127 \cdot 10^{-3}$	1,3	2,0	13

в защитных экранах на участках складирования твердых бытовых отходов. Для предотвращения роста водопроницаемости под воздействием циклического промерзания-оттаивания экраны следует покрывать слоем инертного грунта, сокращающим глубину их промерзания и создающим нагрузку, ограничивающую деформации морозного пучения.

Отсыпку отходов рекомендуется производить послойно с разравниванием по всей площади участка складирования. При отсыпке сразу на полную высоту по методу «от себя», при котором в течение нескольких зимних периодов подготовленный защитный экран остается незащищенным от климатических воздействий, периодически следует выполнять дополнительное его уплотнение.

Выводы

1. Исследования в специально созданной лабораторной установке смесей четырех типов песков со сложенной преимущественно сапонитом глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды показали, что смесям свойственно весьма значительное морозное пучение. В результате циклического промерзания-оттаивания в условиях полного насыщения и под нагрузкой 2 кПа коэффициент фильтрации смесей песков с 4 % глины увеличился в 2,0–4,7 раза, а с 8 % глины под нагрузкой 12 кПа – в 1,2–2,0 раза.

2. Для устранения выявленного эффекта изоляционный экран из смеси песка и высокодисперсной глины следует покрывать защитным слоем инертного грунта, сокращающим глубину промерзания экрана и создающим на него нагрузку, а отсыпку отходов следует производить послойно с разравниванием по всей площади участка складирования.

Список литературы / References

1. Fouli Y., Cade-Menun B.J., Cutforth H.W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 2013;93:485–496. <https://doi.org/10.4141/CJSS2012-060>
2. Xu W., Li K., Chen Lo., et al. The impacts of freeze-thaw cycles on saturated hydraulic conductivity and microstructure of saline-alkali soils. *Scientific Reports*. 2021;11:18655. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98208-0>
3. Xian Sh., Lu Zh., Yao Ha., et al. Comparative study on mechanical properties of compacted clay under freeze-thaw cycles with closed and open systems. *Advances in*

Materials Science and Engineering. 2019;2019:9206372. <https://doi.org/10.1155/2019/9206372>.

4. Makusa G., Macsik J., Holm G., Knutsson S. A laboratory test study on effect of freeze-thaw cycles on strength and hydraulic conductivity of high-water content stabilized dredged sediments. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016;53(6). <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-029>.

5. Leuther F., Schluter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties. *Soil*. 2021;7:179–191. <https://doi.org/10.5194/soil-7-179-2021>.

6. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology*. 1979;13(1-4):73–92. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90022-x](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90022-x)

7. Ma Q., Zhang K., Jabro J.D., et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different degraded conditions in Northeast China. *Environmental Earth Sciences*. 2019;78(321). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8323-z>.

8. Xie Sb., Jian-jun Q., Yuan-ming, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*. 2015;12:999–1009. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3384-7>.

9. Kraus J.F., Benson C.H. *Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity of Barrier Materials: Laboratory and Field Evaluation*. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory; 1995.

10. Korshunov A., Doroshenko S., Nevzorov A., Boldyrev G. Effect of freezing and thawing on soil permeability: newly equipment and experimental results. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1928:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012012>

11. Жиленьков В.Н. Усовершенствованная методика определения фильтрационных свойств грунтов, подвергшихся промораживанию и оттаиванию. *Геоэкология*. 2001;(4):46–51.

Zhilentkov V. Improved methodology for determining the filtration properties of soils subjected to freezing and thawing. *Geoecologiya*. 2001;(4):46–51. (In Russ.)

12. Dalla Santa G., Cola S., Tateo F., Galgaro A. Hydraulic conductivity changes in compacted clayey barriers due to temperature variations in landfill top covers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020;(79):289302905. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01726-w>.

3. Othman M.A., Benson C.H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1993;30(2): 236–246.

14. Chapuis R.P. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002;39(2): 417–439. <https://doi.org/10.1139/T01-092>.

15. Sakita T., Komine H., Yamada A., et al. Influence of bentonite type and producing method on hydraulic

- conductivity of sand-bentonite mixture. *E3S Web Conference*. 2020;205:10005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020510005>.
16. Kayode A.D., et al. Clay soil modification techniques for the adsorption of heavy metals in Aqueous Medium: A Review. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*. 2019;6(6):14–31. <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0606003>.
17. Ghazi A.F. *Engineering characteristics of compacted sand-bentonite mixtures*. Edith Cowan University; 2015. 84 p.
18. Otoko G., Otoko G. The permeability of ocean sand with bentonite. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2014;2(1):1–6.
19. Proia R., Croce P., Modoni G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures. *Procedia Engineering*. 2016;158:51–56. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.404>.
20. Erickson A., Chamberlain E., Benson C. Effects of frost action on covers and liners constructed in cold environments. *Proceedings, 17th International Madison Waste Conference*, September 21–22, 1994: University of Wisconsin-Madison, WI, 1994, pp. 198–220.
21. Chen C., Peng W., Li J., et al. Effects of freeze-thaw cycle on permeability and compression properties of aeolian soil-bentonite mixture. Preprint. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3165981/v1>.
22. Zhang Z., Ma W., Qi J.L. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*. 2013;43(6):1904–1914. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2013.06.017>.
23. Al-Mahbashi A.M., Dafalla M., Al-Shamrani M. Long-Term Performance of Liners Subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Water*. 2022;14(20):3218. <https://doi.org/10.3390/w14203218>.
24. Wong L.C., Haug M.D. Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 1991;28(6):784–793. <https://doi.org/10.1139/t91-095>.
25. Konrad J.M. Hydraulic conductivity changes of a low-plasticity till subjected to freeze–thaw cycles. *Geotechnique*. 2010;60(9):679–690. <https://doi.org/10.1680/geot.08.P.020>.
26. Hirose G., Ito Y. Experimental estimation of permeability of freeze-thawed soils in artificial ground freezing. *Procedia Engineering*. 2017;189:332–337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.053>.
27. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Модификация песка суспензией сапонитовой глины – одним из отходов алмазодобывающей промышленности. *Construction and Geotechnics*. 2022;13(4):103–115. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.4.08>.
- Невзоров А., Саенко Ю., Ширанов А. Sand modification with a saponite clay suspension as a waste of the diamond mining industry. *Construction and Geotechnics*. 2022;13(4):103–115. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.4.08>. (In Russ.).
28. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Кольматация песков суспензией высокодисперсных отходов алмазодобывающей промышленности. *Вестник Евразийской Науки*. 2023;15(2). URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>.
- Невзоров А., Саенко Ю., Ширанов А. Clogging of sands with a suspension of nanoclay waste of the diamond mining industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(2). URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>. (In Russ.).
29. Патент RU 2 586 271 С1. Прибор для определения морозного пучения и водопроницаемости грунта при циклическом промерзании-оттаивании: № 2015100760/28: заявл. 01.12.2015, опубл. 06.10.2016 / Невзоров А.Л., Дорошенко С.П.
- Patent RU 2 586 271 C1. Device for determining frost heaving and soil water permeability during cyclic freezing-thawing : No. 2015100760/28 : appl. 01.12.2015, publ. 06.10.2016 / Nevzorov A., Doroshenko S.
30. Гордеев П.В., Шемелина В.А., Шулякова О.К. *Гидрогеология*. М.: Высшая школа; 1990. 447 с.
- Gordeev P.V., Shemelina V.A., Shulyakova O.K. *Hydrogeology*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. P. 448. (In Russ.).

Об авторах

НЕВЗОРОВ Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>, ResearcherID: J-2809-2012, Scopus Author ID: 7004203097, SPIN: 7720-1674, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

САЕНКО Юрий Викторович, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>, Scopus Author ID: 57074076400, SPIN: 2663-3634, e-mail: yuri_saenko@mail.ru

ШИРАНОВ Алексей Михайлович, ассистент, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

ЧУРКИН Сергей Владимирович, ассистент, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: s.churkin@narfu.ru

About the authors

NEVZOROV, Alexander Leonidovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>, ResearcherID: J-2809-2012, Scopus Author ID: 7004203097, SPIN: 7720-1674, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

SAENKO, Yuri Viktorovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>, Scopus Author ID: 57074076400, SPIN: 2663-3634, e-mail: yuri_saenko@mail.ru

SHIRANOV, Alexey Mikhailovich, Assistant, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

CHURKIN, Sergey Vladimirovich, Assistant, Department of Geotechnics, <https://orcid.org/0000-0001-7770-3140>, Scopus Author ID: 56204122200, SPIN: 5875-9608, e-mail: s.churkin@narfu.ru

Поступила в редакцию / Submitted 29.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 22.02.2024

Принята к публикации / Accepted 28.03.2024