

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

УДК 624.131.37; 666.321; 53.083.9

DOI: 10.15372/KZ20250502

EDN: YRZEUA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ
ЗАМОРАЖИВАНИЯ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ТОНКОДИСПЕРСНОГО ГРУНТАВ.С. Колунин^{1,2,*}, З.А. Ишкова¹¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия² Тюменский индустриальный университет, кафедра криологии Земли,
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

*Автор для контакта; e-mail: askold@ikz.ru

Представлены результаты исследований влияния начального режима замораживания тонкодисперсного модельного грунта (каолинитовой глины в полностью водонасыщенном состоянии с влажностью в интервале 0.43–0.51) и циклов нагрева–охлаждения на его фильтрационные свойства, когда в качестве фильтрата используется вода. В ходе экспериментов было показано, что фильтрационная способность каолинитовой глины зависит не только от температуры мерзлого грунта, но и от условий замораживания. Приведены графики зависимости коэффициента фильтрации мерзлого грунта от температуры в диапазоне –0.05...–0.3 °С, полученные при различных режимах замораживания грунта, которые демонстрируют существенное влияние условий замораживания на фильтрационные свойства мерзлого грунта. Экспериментальные исследования в этой области имеют важное значение для прогнозирования поведения мерзлых тонкодисперсных грунтов вблизи температуры начала замерзания, что особенно актуально в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: мерзлый грунт, циклы нагревания–охлаждения, фильтрация, коэффициент фильтрации.

Ссылка для цитирования: Колунин В.С., Ишкова З.А. Экспериментальные исследования влияния условий замораживания на фильтрационные свойства тонкодисперсного грунта // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 20–26. DOI: 10.15372/KZ20250502. EDN: YRZEUA.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT
OF FREEZING TEMPERATURE REGIME ON FILTRATION PROPERTIES
OF FINELY DISPERSED MODEL SOILV.S. Kolunin^{1,2,*}, Z.A. Ishkova¹¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia² Tyumen State Oil-and-Gas University,
Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia

*Corresponding author; e-mail: askold@ikz.ru

The results of experimental studies of the influence of the initial freezing conditions and heating-cooling cycles of a finely dispersed model soil (kaolinite clay in a fully water-saturated state with the moisture content of 0.43–0.51) on its water filtration properties in the frozen state are presented. The filtration capacity of frozen kaolinite clay depends not only on its temperature but also on the freezing conditions. Graphs of the water permeability coefficient of the frozen soil versus temperature in the range of –0.05...–0.3 °C have been obtained for various soil freezing conditions. These graphs demonstrate the significant influence of freezing conditions on the filtration properties of frozen soil. Experimental research in this area is important for predicting the behavior of frozen heavy-textured soils near the initial freezing temperature, which is especially relevant in a changing climate.

Keywords: frozen ground, freeze-thaw cycles, filtration, water permeability coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Мерзлые грунты вблизи температуры окончания оттаивания обладают широким спектром массообменных свойств: влагопроводность, диффузия, фильтрация, электропроводность и др. [Ершов, 1979, 1986; Чеведев, 2004].

Экспериментальное изучение фильтрационных свойств мерзлого грунта предполагает учет ряда факторов. Установлено влияние гранулометрического состава и влажности грунта, а также его температуры на величину коэффициента фильтрации мерзлого грунта [Williams, Burt, 1974; Horiguchi, Miller, 1983; Black, Miller, 1990; Watanabe, Osada, 2016].

По способу измерения коэффициента фильтрации мерзлых пород экспериментальные методы можно разделить на два класса: стационарные и нестационарные.

В *стационарных методах* температура мерзлого грунта фиксирована, скорость потока жидкости через него не меняется со временем. Это удастся реализовать при помощи использования микропористых мембран, ограничивающих образец грунта и препятствующих замерзанию переохлажденной воды в подводящих каналах [Williams, Burt, 1974; Horiguchi, Miller, 1980, 1983; Andersland et al., 1996], либо прокачиванием через мерзлый грунт не воды, а жидкости с температурой замерзания ниже нуля [Andersland et al., 1996; Zhang Hu et al., 2016].

В *нестационарных методах* скорость потока жидкости через образец меняется с течением времени. Реализованы два следующих подхода измерения коэффициента фильтрации нестационарными методами:

- при одностороннем таянии мерзлого грунта, когда температура образца переменна в пространстве и времени. При этом уменьшается толщина мерзлого слоя грунта с течением времени [Watanabe, Osada, 2016, 2017];

- при фиксированной отрицательной температуре окружающей среды с применением водного раствора поваренной соли в качестве фильтрующей жидкости [Tokoro, Ishikawa, 2020].

Стационарные методы обладают тем преимуществом, что при изучении фильтрационных свойств мерзлого грунта температура внутри образца постоянна и равна температуре окружающей среды. Поэтому после проведения эксперимента удастся построить график зависимости коэффициента фильтрации мерзлого грунта от температуры. В частности, установлено, что проницаемость мерзлого грунта при данной температуре различна в режимах охлаждения и нагревания, а график зависимости коэффициента фильтрации от температуры напоминает гистерезисную петлю [Horiguchi, Miller, 1983]. Таким образом,

коэффициент фильтрации мерзлого грунта при данной температуре зависит от температурного режима, предшествующего измерению, и, по-видимому, от условий замораживания грунта. В цитированных выше работах грунт замораживался при фиксированной температуре окружающей среды, при этом температура менялась в достаточно широком диапазоне от -0.2 до -29 °C.

В физически обоснованных математических моделях морозного пучения [O'Neill, Miller, 1985] в промерзающем грунте выделяются три зоны: мерзлый грунт (непроницаемый для воды), промерзающая зона (мерзлый грунт при температуре вблизи температуры начала замерзания) и талый грунт. Образование макрошлывов льда происходит на контакте мерзлый грунт – промерзающая зона. Скорость и время роста ледяного шлыва прямо зависят от коэффициента фильтрации грунта промерзающей зоны. Поэтому на этапе измерения коэффициента фильтрации мерзлого грунта вблизи температуры начала замерзания важно найти такие режимы замораживания грунта, которые давали бы максимальный разброс величины коэффициента фильтрации при данной температуре.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию начального режима замораживания грунта, а также циклов нагрева–охлаждения и охлаждения–нагрева на его фильтрационные свойства в диапазоне температур от -0.05 до -0.3 °C.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объекта исследования используется каолинистая глина 1, которая находится между двумя пластинами пористой керамики 3 (рис. 1). Образец грунта и пластины разделяют микропористые мембраны 2, используемые в качестве фазового барьера и препятствующие проникновению льда из мерзлого грунта в керамику и емкости с дистиллированной водой 4. Для проведения исследований были изготовлены две идентичные экспериментальные ячейки.

Экспериментальная ячейка с образцом, оборудованная термодатчиками, помещается в центр стеклянной банки объемом 0.5 дм^3 , погруженной в термостатируемую жидкость, температура которой регулируется с шагом 0.01 °C. Теплообмен между ячейкой и окружающей средой осуществляется через слой теплоизоляции (воздух и пенопласт).

Термодатчики прикреплены к корпусу экспериментальной ячейки: на уровне образца грунта, на основании и в верхней части ячейки. В качестве термодатчиков применяются различные медь-константановые термодатчики, опорные спай которых помещены в термос с водой и измельченным льдом. В свою очередь, термос находится в холо-

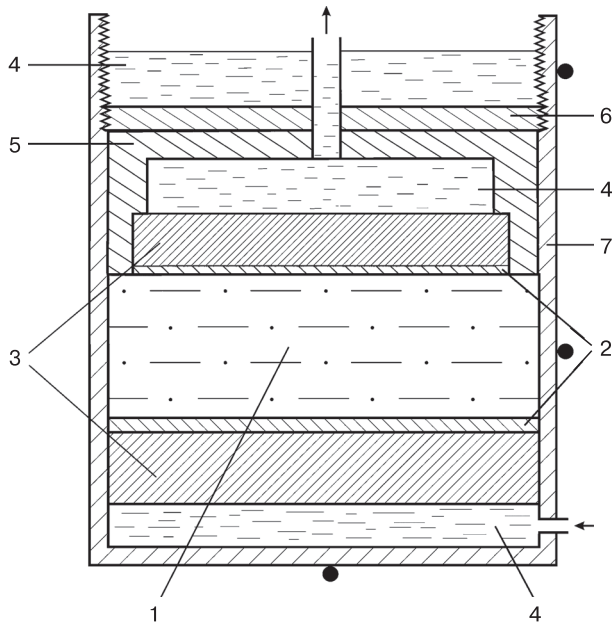


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки.

1 – грунт; 2 – мелкопористые мембраны; 3 – пористая керамика; 4 – дистиллированная вода; 5 – штамп; 6 – стопорный винт; 7 – корпус ячейки; черные точки – датчики термодатчиков.

дильнике, в котором поддерживается температура, близкая к 0°C . Погрешность измерения температуры порядка 0.005°C .

Поток воды через образец создается разностью гидравлических напоров на входе и на выходе экспериментальной ячейки, равной 115 см. Объем жидкости, прошедшей через грунт за определенное время, измеряется на входе и выходе ячейки по смещению мениска в капиллярах с точностью порядка 0.003 мл. Скорость фильтрации определяется как среднее по результатам измерения входящего и выходящего потоков воды. Величина коэффициента фильтрации находится из общеизвестного закона Дарси с абсолютной погрешностью менее $4 \cdot 10^{-13}$ м/с.

Единичное измерение коэффициента фильтрации при фиксированной температуре занимает более 3 суток, в течение которых остается неизменной скорость фильтрации воды через мерзлый грунт. Температура образца изменяется дискретно с шагом 0.08°C . При смене температуры термостата стабилизация потока воды происходит в течение 3–5 сут.

Эксперимент включает следующие основные этапы:

- приготовление водонасыщенной каолиновой глины с влажностью 0.57;
- заполнение грунтом центральной части экспериментальной ячейки (см. рис. 1), которая имеет форму цилиндра диаметром 30 мм;

- последовательное компрессионное уплотнение грунта штампом 5 до нагрузки 1 атм и фиксация его стопорным винтом 6 (см. рис. 1). После уплотнения высота грунта составляет 8–10 мм;

- помещение экспериментальной ячейки с тремя термодатчиками в жидкостный термостат при комнатной температуре;

- охлаждение экспериментальной ячейки до заданной отрицательной температуры. В первой и третьей сериях она равна $-(0.15 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$, а во второй серии составляет $-(0.23 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$. При этом вода в ячейке находится в переохлажденном состоянии;

- определение величины коэффициента фильтрации талого (охлажденного) образца каолиновой глины (в течение суток);

- внесение затравки льда в переохлажденную воду на поверхности штампа (см. рис. 1). После замерзания воды на поверхности штампа лед через зазор между стенкой ячейки и штампом проникает в грунт. Начало замерзания воды в глине фиксируется по показаниям термодатчиков: резкое увеличение температуры грунта и затем плавное ее понижение до постоянного значения. Температура начала замерзания равна примерно -0.03°C ;

- замораживание образца при различных температурных режимах (три серии экспериментов);

- определение величины коэффициента фильтрации мерзлого образца в стационарных условиях (при фиксированном перепаде давления воды и неизменной во времени скорости потока воды) и различных температурах;

- определение влажности грунта по окончании эксперимента.

Всего проведено три серии экспериментов, различающихся температурным режимом замораживания талого грунта.

В 1-й серии замораживание производилось при фиксированной температуре окружающей среды $-(0.14 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, за исключением эксперимента E2_1, в котором после начала кристаллизации воды в образце температура термостата была увеличена до -0.04°C (примерно равна температуре начала замерзания воды в грунте). Далее для описания результатов экспериментов применяется следующее обозначение: Ei_j , где i – номер термостата, на котором проведен эксперимент ($i = 1, 2$); j – номер эксперимента.

Во 2-й серии замораживание происходило при фиксированной температуре окружающей среды $-(0.23 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$.

В 3-й серии в течение суток замораживание образца осуществлялось при температуре окружающей среды $-(0.15 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$. В конце этого периода времени температура ячейки становилась практически равной температуре термостатируемой жидкости. Затем температура жидкости в термостате повышалась и устанавливалась равной $-(0.05 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$.

Время выхода системы на стационарный режим фильтрации после внесения затравки льда составляет от 2 до 10 сут и зависит от температуры жидкости в термостате и количества замерзающей воды (табл. 1).

В некоторых экспериментах (серия 1, опыты E2_1, E2_3, E2_4, E2_5; серия 3, опыт E1_6) после замерзания воды на поверхности штампа грунт оставался в талом состоянии. Чтобы вызвать кристаллизацию воды в образце, температура термостата понижалась на -0.24°C . Как правило, при показаниях датчиков -0.22°C начиналась кристаллизация грунтовой воды, что отражалось на термограмме повышением температуры. Спустя 20 мин после этого температура термостата устанавливалась равной первоначальному значению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем разделе представлены следующие результаты: влияние режима замораживания на коэффициент фильтрации при данной температуре (сравнение коэффициентов фильтрации серий 1–3 при средних температурах -0.15 и -0.22°C); влияние циклов охлаждения–нагрева (1-я серия) и нагрева–охлаждения (2-я серия) на величину коэффициента фильтрации (K_f) при данной температуре (T).

Результаты измерений 1-й серии экспериментов приведены на рис. 2, а, б; 2-й серии – на рис. 2, в, г; 3-й серии – на рис. 2, д. Как видно на рис. 2, коэффициент фильтрации талого грунта лежит в достаточно узком диапазоне $4 \cdot 10^{-10}$ – $8 \cdot 10^{-10}$ м/с.

Большинство измерений коэффициента фильтрации мерзлого образца грунта в 1-й и 2-й сериях произведены вблизи двух значений температуры образца -0.14 и -0.23°C .

Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой каолининовой глины вблизи температуры -0.14°C приведены в табл. 2. Результаты измерений показывают, что величина коэффициента фильтрации мерзлого грунта при температуре -0.14°C зависит от режима замораживания (см. табл. 2). Согласно результатам 1-й и 2-й серий, фильтрационная способность образца уменьшается с понижением температуры, при которой происходит первоначальное замораживание грунта. Однако в экспериментах 3-й серии наблюдается обратная картина – мерзлый грунт, замороженный в два этапа, начиная с температуры -0.14°C и заканчивая $-(0.06 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$, имел на порядок меньший коэффициент фильтрации по сравнению с грунтом, замороженным в 1-й и 2-й сериях.

Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой каолининовой глины при температуре $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 3.

Таблица 1. **Время выхода системы на стационарный режим фильтрации после внесения затравки в 1-й и 2-й сериях экспериментов**

Номер эксперимента	Время от внесения затравки льда до начала измерения, сут	Установившаяся температура образца, $^{\circ}\text{C}$
<i>1-й термостат</i>		
E1_1	9	-0.17
E1_2	2	-0.15
E1_3	4	-0.15
E1_4	7	-0.15
E1_5	5	-0.16
E1_6	2	-0.23
E1_7	2	-0.18
E1_10	7	-0.24
<i>2-й термостат</i>		
E2_1	10	-0.03
E2_2	3	-0.15
E2_3	4	-0.15
E2_4	6	-0.12
E2_5	7	-0.17
E2_6	9	-0.14
E2_7	2	-0.22
E2_12	4	-0.22

Величина коэффициента фильтрации при данной температуре после нагревания образца и последующего охлаждения до первоначальной температуры уменьшается незначительно (табл. 4, эксперименты 2-й серии). Начальная температура равна $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, осуществляется нагревание до температуры $-(0.14 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$, охлаждение до $-(0.23 \pm 0.01)^{\circ}\text{C}$.

Это явление наблюдается также при обратном цикле в 1-й серии экспериментов, величина коэффициента при данной температуре после охлаждения образца и последующего нагревания до первоначальной температуры также уменьшается (табл. 5). В эксперименте E2_1 реализована следующая схема изменения температуры ($^{\circ}\text{C}$): $-0.03 \rightarrow -0.15 \rightarrow -0.03 \rightarrow -0.15$; в эксперименте E1_7: $-0.18 \rightarrow -0.22 \rightarrow -0.15 \rightarrow -0.23$.

Таким образом, коэффициент фильтрации мерзлого грунта при данной температуре уменьшается после цикла нагрева–охлаждения или охлаждения–нагрева.

В табл. 6 приведена величина весовой влажности грунта, определенная в конце эксперимента.

Анализ результатов экспериментов выявил несколько ключевых аспектов влияния температурного режима замораживания на фильтрационные свойства мерзлой каолининовой глины в области высоких отрицательных температур ($-0.03 \dots -0.2^{\circ}\text{C}$). Наблюдается существенная зависимость коэффициента фильтрации воды от условий замораживания. Это подтверждает гипотезу о

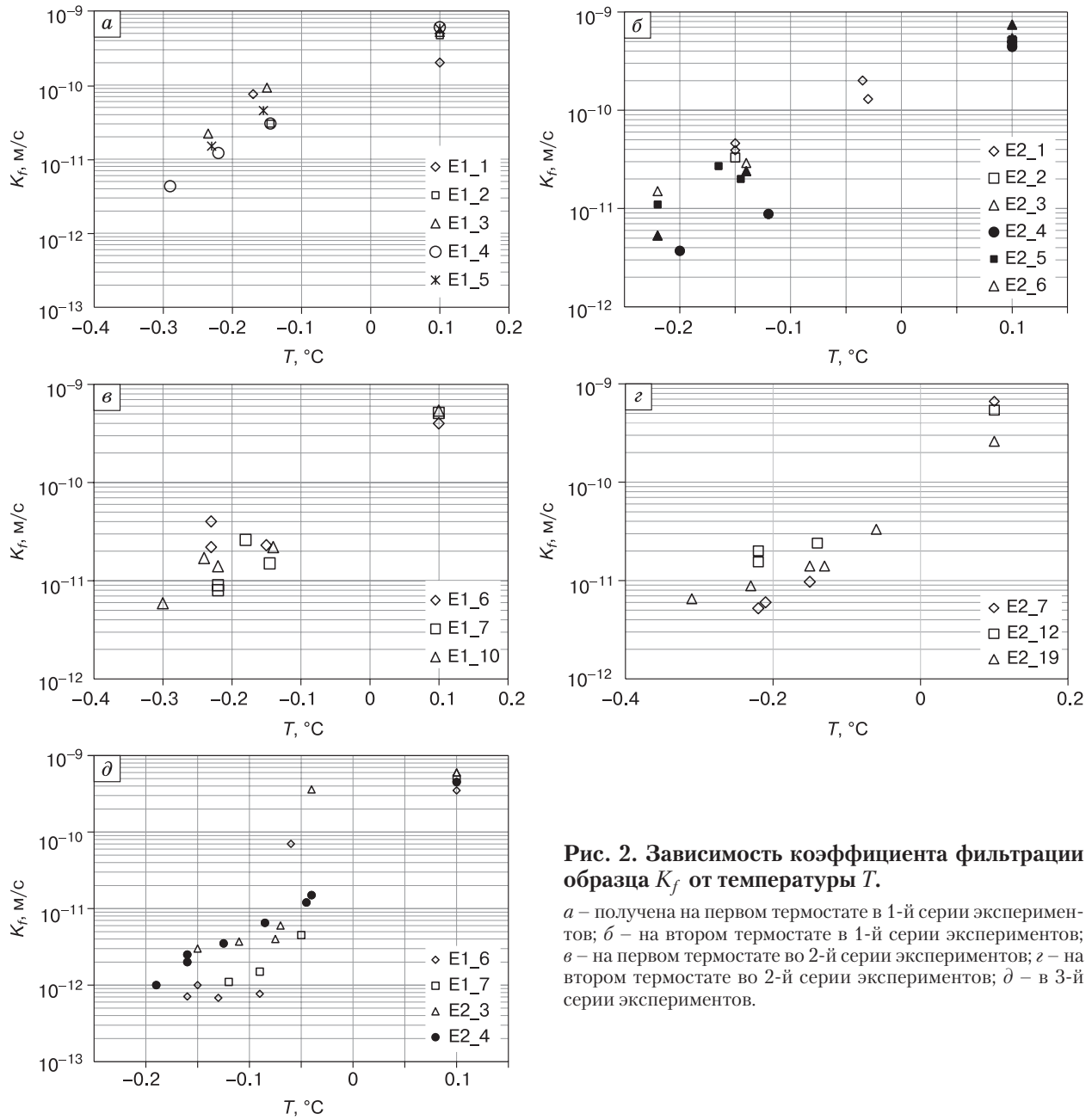


Рис. 2. Зависимость коэффициента фильтрации образца K_f от температуры T .

a – получена на первом термостате в 1-й серии экспериментов; *б* – на втором термостате в 1-й серии экспериментов; *в* – на первом термостате во 2-й серии экспериментов; *г* – на втором термостате во 2-й серии экспериментов; *д* – в 3-й серии экспериментов.

Таблица 2. Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой глины при температуре $-(0.14 \pm 0.02)^\circ\text{C}$ (1–3-я серии экспериментов)

Температура в термостате при замораживании глины	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка	2-я ячейка
1-я серия	$5.44 \cdot 10^{-11}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$
2-я серия	$2.1 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-11}$
3-я серия	$8.7 \cdot 10^{-13}$	$2.7 \cdot 10^{-12}$

Таблица 3. Средние значения коэффициента фильтрации мерзлой глины при температуре $-(0.23 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ (1, 2-я серии экспериментов)

Температура в термостате при замораживании глины	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка	2-я ячейка
1-я серия	$1.8 \cdot 10^{-11}$	$8.8 \cdot 10^{-12}$
2-я серия	$1.8 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$

Таблица 4. Влияние цикла нагрев–охлаждение на значение коэффициента фильтрации мерзлой глины (2-я серия экспериментов)

Измерение	Коэффициент фильтрации, м/с	
	1-я ячейка (два эксперимента)	2-я ячейка (два эксперимента)
Начальное	$1.3 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$
После нагрева и охлаждения	$1.1 \cdot 10^{-11}$	$1.03 \cdot 10^{-11}$

Таблица 5. Влияние цикла охлаждения–нагрев на значение коэффициента фильтрации мерзлой глины (1-я серия экспериментов)

Измерение	Коэффициент фильтрации, м/с	
	опыт E2_1	опыт E1_7
Начальное	$2 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-11}$
После охлаждения и нагрева	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$

том, что физические свойства грунтов могут изменяться не только в результате замораживания или оттаивания, но и под воздействием циклических изменений температуры, даже если не достигнут порог оттаивания, что характерно для высокотемпературных вечномерзлых грунтов. Полученные данные подчеркивают сложность переходных процессов в грунтах и необходимость учета предыстории их температурного режима при анализе и оценке динамики изменения их фильтрационных свойств с течением времени.

ВЫВОДЫ

В ходе серии экспериментов показано, что фильтрационные свойства мерзлого грунта зависят не только от температуры, но от предыстории теплового взаимодействия грунта с окружающей средой при достижении данной температуры.

Величина коэффициента фильтрации мерзлого образца каолининовой глины в области высоких отрицательных температур (около -0.15 °C) может изменяться в пределах порядка в зависимости от температурного режима выхода к данной температуре (см. табл. 2). Таким образом, режим замораживания оказывает заметное влияние на величину коэффициента фильтрации каолининовой глины, что, вероятно, обусловлено изменениями физических свойств мерзлого грунта, которые связаны с формированием и трансформацией внутри него ледяных включений.

Показано, что циклическое тепловое воздействие нагрева–охлаждения–нагрева на мерзлый грунт уменьшает его фильтрационную способность при данной температуре. Наиболее вероят-

Таблица 6. Влажность грунта (W) после проведения эксперимента

Номер эксперимента	W, г/г
<i>1-й термостат</i>	
E1_1	0.45
E1_2	0.44
E1_3	0.44
E1_4	0.49
E1_5	0.49
E1_6	0.47
E1_7	0.50
E1_10	0.46
<i>2-й термостат</i>	
E2_1	0.42
E2_2	0.43
E2_3	0.44
E2_4	0.43
E2_5	0.49
E2_6	0.51
E2_7	0.48
E2_12	0.48

ная причина этого – укрупнение шлиров льда и уплотнение скелета грунта в областях с массивной криогенной текстурой при таком тепловом воздействии в стадии охлаждения грунта. По-видимому, существует предел, к которому стремится коэффициент фильтрации при данной температуре при многократном повторении циклов нагрева–охлаждения и охлаждения–нагрева.

В связи с потеплением климата знание фильтрационных свойств мерзлых пород необходимо для предсказания скорости и величины осадки оснований зданий и сооружений, возведенных на вечномерзлых грунтах.

Литература

- Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 214 с.
- Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, 333 с.
- Чеве́рев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils // J. Environ. Eng., 1996, vol. 122, No. 3, p. 212–216.
- Black P.B., Miller R.D. Hydraulic conductivity and unfrozen water content of airfree frozen silt // Water Resour. Res., 1990, vol. 26, No. 2, p. 323–329.
- Horiguchi K., Miller R.D. Experimental studies with frozen soil in an “ice sandwich” permeameter // Cold Reg. Sci. Technol., 1980, vol. 3, No. 2–3, p. 177–183.
- Horiguchi K., Miller R.D. Hydraulic conductivity functions of frozen materials // Permafrost. Fourth Int. Conf. Proceedings. Washington, Nat. Acad. Press, 1983, vol. 1, p. 504–508.
- O’Neill K., Miller R.D. Exploration of a rigid ice model of frost heave // Water Resour. Res., 1985, vol. 21, No. 3, p. 281–296.

Tokoro T., Ishikawa T. Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method // *Transport. Soil Eng. Cold Reg.*, 2020, vol. 1, p. 71–78.

Watanabe K., Osada Y. Comparison of hydraulic conductivity in frozen saturated and unfrozen unsaturated soils // *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, No. 5, p. 1–7.

Watanabe K., Osada Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2017, vol. 142, p. 79–84.

Williams P.J., Burt T.P. Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils // *Can. Geotech. J.*, 1974, vol. 11, No. 4, p. 647–650.

Zhang Hu, Zhang Jian-ming, Zhang Zhi-long, Chai Ming-tang. Measurement of hydraulic conductivity of Qinghai-Tibet Plateau silty clay under subfreezing temperatures // *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2016, vol. 36, No. 6, p. 1030–1035.

References

Ershov E.D. *Vlagoperenos i kriogennye tekstury v dispersnykh porodakh* [Moisture transfer and cryogenic textures in dispersed rocks]. Moscow, MGU, 1979, 214 p. (in Russian).

Ershov E.D. *Fiziko-himiya i mehanika merzlykh porod* [Physical chemistry and mechanics of frozen rocks]. Moscow, MGU, 1986, 336 p. (in Russian).

Cheverev V.G. *Priroda kriogennykh svoystv gruntov* [The nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Nauchnyi mir, 2004, 234 p. (in Russian).

Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils. *J. Environ. Eng.*, 1996, vol. 122, No. 3, p. 212–216.

Black P.B., Miller R.D. Hydraulic conductivity and unfrozen water content of airfree frozen silt. *Water Resour. Res.*, 1990, vol. 26, No. 2, p. 323–329.

Horiguchi K., Miller R.D. Experimental studies with frozen soil in an “ice sandwich” permeameter. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 1980, vol. 3, No. 2–3, p. 177–183.

Horiguchi K., Miller R.D. Hydraulic conductivity functions of frozen materials. in: *Permafrost. Fourth Int. Conf. Proceedings*. Washington, Nat. Acad. Press, 1983, vol. 1, p. 504–508.

O'Neill K., Miller R.D. Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resour. Res.*, 1985, vol. 21, No. 3, p. 281–296.

Tokoro T., Ishikawa T. Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method. *Transport. Soil Eng. Cold Reg.*, 2020, vol. 1, p. 71–78.

Watanabe K., Osada Y. Comparison of hydraulic conductivity in frozen saturated and unfrozen unsaturated soils. *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, No. 5, p. 1–7.

Watanabe K., Osada Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2017, vol. 142, p. 79–84.

Williams P.J., Burt T.P. Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils. *Can. Geotech. J.*, 1974, vol. 11, No. 4, p. 647–650.

Zhang Hu, Zhang Jian-ming, Zhang Zhi-long, Chai Ming-tang. Measurement of hydraulic conductivity of Qinghai-Tibet Plateau silty clay under subfreezing temperatures. *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2016, vol. 36, No. 6, p. 1030–1035.

*Поступила в редакцию 21 апреля 2022 г.,
после доработки – 25 февраля 2025 г.,
принята к публикации 23 июля 2025 г.*