

УДК 551.342

С.С. Волохов<sup>1</sup>, И.Н. Никитин<sup>2</sup>, Д.С. Лавров<sup>3</sup>

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ РЕЗКОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Описаны результаты исследования температурных деформаций различных типов мерзлых грунтов в циклах охлаждения–нагрева при резком изменении температуры. Установлены различия в характере температурного деформирования при ступенчатом и однократном изменении температуры. Исследована зависимость температурных деформаций мерзлых грунтов от типа грунта, суммарной влажности и количества циклов охлаждения–нагрева.

*Ключевые слова:* мерзлый грунт, температура, охлаждение, нагревание, температурная деформация.

The results are described of the study of temperature deformation of different types of frozen soil in the cycles of cooling-heating at sudden change in temperature. The differences in the nature of the temperature deformation at step and one stage temperature change are shown. The dependences are investigated of the temperature deformation of frozen soils on soil type, moisture and total number of cycles of cooling-heating.

*Key words:* frozen soil, temperature, cooling, heating, temperature deformation.

**Введение.** В связи с тем, что мерзлые грунты — сложная многокомпонентная система, весьма чувствительная к изменению внешних условий, в них могут развиваться сложные физические и физико-химические процессы, связанные с фазовыми переходами воды, миграцией влаги, развитием напряжений и деформаций, трещинообразованием и т.д. Одним из таких процессов является температурное деформирование.

Изучение температурных деформаций мерзлых грунтов было начато А.Е. Федосовым [Федосов, 1935] и продолжено И.Н. Вотяковым [Вотяков, 1963, 1966; Вотяков, Гречишев, 1969], С.Е. Гречишевым [Гречишев, 1972, 1973, 1983], Е.П. Шушероиной [Шушерина и др., 1970, 1973], Э.Д. Ершовым [Ершов, Брушков, 1989; Ершов и др., 2001], А.В. Брушковым [1998] и др. В результате установлено, что мерзлые грунты характеризуются аномально большими коэффициентами температурного деформирования  $\alpha$ : до  $2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и более у глин,  $(1-4) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  у суглинков и супесей,  $(2-5) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  у песков. При этом коэффициент  $\alpha$  строительных материалов, скальных пород и минералов обычно не превышает  $(3-10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , а для компонентов, слагающих мерзлые породы, составляет: для минерального скелета  $(0,4-8) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , для льда  $(0,5-5) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , для незамерзшей воды  $<5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Было выявлено, что величина коэффициента температурного деформирования мерзлых грунтов сильно зависит от температуры, уменьшаясь при ее понижении. Зависимость

температурной деформации от температуры резко нелинейна, что отличает мерзлые грунты от других материалов. Кроме того, показано, что значения коэффициента  $\alpha$  для мерзлых дисперсных пород увеличиваются с ростом дисперсности, с уменьшением влажности (кроме песков) и с повышением температуры.

Используя современные представления о физике мерзлых грунтов, С.Е. Гречишев [Гречишев, 1972, 1973] предположил, что изменению объема мерзлых грунтов при изменении температуры сопутствуют несколько различных внутренних процессов, имеющих разную направленность: линейное расширение (или сокращение) слагающих грунт компонентов, процесс непрерывных фазовых переходов на границе лед–вода и температурная деформация внутренних микроструктур. В последующем С.Е. Гречишевым было показано, что температурные деформации мерзлых глинистых грунтов происходят не только за счет фазовых переходов воды, расширения или сокращения льда и скелета грунта, но в значительной степени обусловлены физико-химическими процессами, связанными с фазовыми переходами воды (гидратация и пептизация агрегатов при оттаивании, коагуляция и агрегирование частиц скелета при замерзании), миграцией незамерзшей воды, структурными преобразованиями мерзлых грунтов и микротрещинообразованием [Гречишев, 1983].

Е.П. Шушерина с сотрудниками [Шушерина и др., 1973] установили, что в образцах пород

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии; e-mail: volokhov@geol.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, магистрант; e-mail: 79032562851@ya.ru

<sup>3</sup> ООО «ГЕОПРОЕКТИЗЫСКАНИЯ», вед. инженер ИГЛ; e-mail: dmitryslavrov@gmail.com

Таблица 1

**Гранулометрический состав исследуемых грунтов**

Название грунта	Содержание частиц в каждой фракции, %								Название грунта по классификации В.В. Охотина
	размер частиц, мм								
	1–0,5	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	
Глина	–	0,2	4,4	11,8	50,0	13,6	15,0	5,0	Суглинок средний, пылеватый
Супесь	0,1	0,1	13	50,8	11,1	7,0	4,8	13,1	Супесь пылеватая
Песок	0,1	25,6	71,7	3,2	3,2	3,2	3,2	–	Песок

нарушенного сложения коэффициент температурного деформирования выше, чем в породах естественного сложения, что объясняется более интенсивными структурными изменениями и микротрещинообразованием в образцах нарушенного сложения.

Важная особенность температурного деформирования мерзлых пород — эффект температурного последействия, установленный Н.И. Вотяковым и подтвержденный С.Е. Гречищевым [Вотяков, Гречищев, 1969]. Этот эффект заключается в том, что температурные деформации развиваются в течение некоторого времени после того, как температура в мерзлой породе стабилизировалась. По мнению указанных исследователей, этот эффект связан с реологическими свойствами пород и вторичной консолидацией их структур, приводящей к длительно протекающим структурным преобразованиям мерзлых грунтов.

Исследования температурного деформирования засоленных мерзлых пород [Брушков, 1998] в целом подтвердили известные закономерности изменения коэффициента температурного деформирования, в частности, эффект последействия. Обратный эффект температурного деформирования, описанный в данной работе для цикла нагревания мерзлых пород от –25 до –20 °С и максимально выраженный для песка, заключался в том, что при прекращении изменения температуры в образце происходило его сжатие в течение нескольких десятков минут. Этот эффект, названный эффектом обратного сжатия, А.В. Брушков связывает с внутренними напряжениями при значительных перепадах температуры и структурными преобразованиями образцов мерзлых грунтов.

Изучение температурных деформаций пород в широком диапазоне значений отрицательной температуры (–25 ...–185 °С), проводившееся на кафедре геокриологии МГУ имени М.В. Ломоносова [Ершов, и др., 2001], показало значительно меньшие величины коэффициентов температурного деформирования, чем при более высоких значениях температуры, что эти авторы объясняли снижением роли структурных преобразований в мерзлых породах и, как следствие, приближением значений коэффициента  $\alpha$  грунтов к значениям этого коэффициента для основных порообразующих минералов.

Отметим, что практически во всех предыдущих исследованиях эксперименты проводились при ступенчатых изменениях температуры, причем как в режиме охлаждения, так и в режиме нагревания мерзлых грунтов. Исследования при резком изменении температуры, актуальные для изучения такого природного геокриологического процесса, как морозобойное растрескивание, практически отсутствуют. Последнему вопросу и посвящена наша работа.

**Методика исследований.** Исследования проводились на мерзлых грунтах нарушенного сложения — глине полиминеральной (г. Гжель), супеси (п-ов Ямал, пос. Бованенково), песке (г. Люберцы). Характеристика грунтов представлена в табл. 1 и 2.

Таблица 2

**Основные физические свойства исследуемых грунтов**

Название грунта	Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>	Гигроскопическая влажность, %	Пластичность, %			Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Название грунта по числу пластичности
			пределы		число пластичности		
			нижний	верхний			
Глина	2,73	3,2	24,3	46,6	22,3	13,9	глина
Супесь	1,95	18	21	16	5	–	супесь
Песок	2,67	0,85	–	–	–	–	песок

Для измерения температурных деформаций образцов мерзлых грунтов применялся прибор (рис. 1), изготовленный из плексигласа, на стенках которого закреплены индикаторы часового типа: один — для измерения вертикальных деформаций, два — для измерения горизонтальных деформаций образцов. Точность измерения деформации составляла 0,001 мм. Изменение температуры образцов выполнялось с помощью двух температурных датчиков, погружаемых в образец, и цифровых термометров с точностью измерения 0,1 °С. Прибор с образцом помещали в холодильный шкаф, в котором можно задавать температуру в диапазоне +20 ÷ –20 °С и поддерживать ее с точностью ±0,2 °С. Перед экспериментом прибор для измерения температурных деформаций тарировался, определяли поправки на температурную деформацию прибора при соответствующих изменениях температуры,

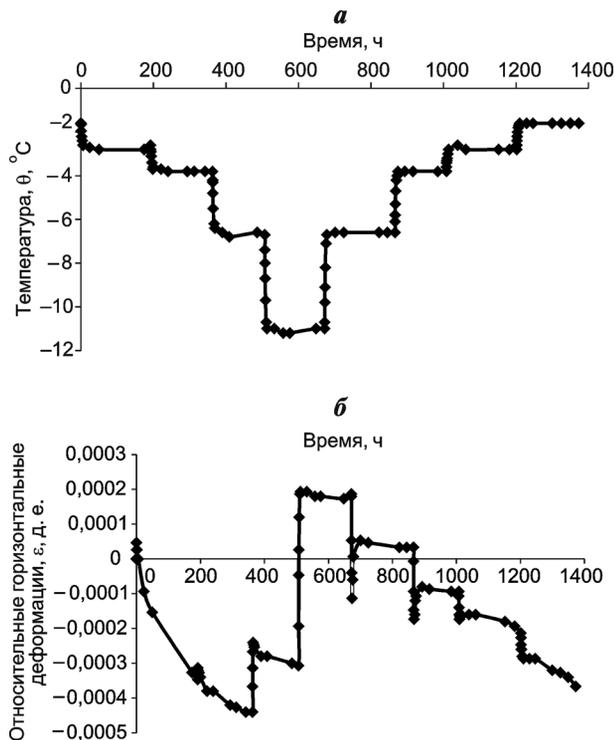


Рис. 1. Температурное деформирование мерзлой глины с влажностью 50% при ступенчатом изменении температуры: а — кривая изменения температуры во времени; б — температурные деформации

которые учитывали при измерении температурных деформаций образцов мерзлых грунтов.

Образцы исследуемых грунтов приготовлены из грунтовой пасты с заданной суммарной влажностью. Мерзлые образцы имели форму параллелепипеда с размерами  $150 \times 75 \times 80 \times 50$  мм. Их изолировали влагонепроницаемой пленкой.

Температура начала экспериментов составляла  $-1,5$  °C. Эксперименты выполнялись по двум методикам:

1) температура в холодильном шкафу понижалась в одну ступень на  $10$  °C (ступень охлаждения). После стабилизации температуры и деформации образца он нагревался на  $10$  °C (ступень нагревания);

2) температура в холодильном шкафу понижалась в 4 ступени до конечной величины: первая ступень — на 1, вторая ступень — на 1, третья ступень — на 3 и четвертая ступень — на 5 °C. Суммарная величина понижения температуры составляла  $10$  °C. Каждая ступень длилась неделю. Затем следовали 4 ступени нагревания в обратной последовательности.

По результатам испытания образцов построены кривые изменения относительных температурных деформаций во времени и определены значения коэффициента температурного линейного деформирования ( $\alpha$ ) исследованных грунтов.

В нашей работе при одном цикле охлаждения—нагревания в одну ступень исследовали образцы супеси, песка и полиминеральной глины с суммарной влажностью 18, 20 и 50% соответственно,

а также образцы глины с величинами влажности 30, 50 и 70%. При ступенчатом изменении температуры в одном цикле охлаждения—нагревания испытывался образец мерзлой глины с влажностью 50%. Кроме того, проведены исследования с глиной, имеющей влажность 50%, при трех последовательных циклах охлаждения—нагревания и изменении температуры в одну ступень.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

Для сопоставления характера температурного деформирования мерзлых грунтов при однократном и ступенчатом изменении температуры предварительно было проведено испытание образца мерзлой полиминеральной глины с суммарной влажностью 50% в последовательные четыре ступени охлаждения и четыре ступени нагревания. Кривая изменения температуры образца в процессе опыта представлена на рис. 1, а. Соответствующая кривая температурных деформаций образца глины показана на рис. 1, б.

Анализ полученных данных показывает, что на первых двух ступенях охлаждения образца (от  $-1,5$  до  $-2,5$  и от  $-2,5$  до  $-3,5$  °C) преобладали деформации сокращения, что согласуется с результатами других исследователей. Вместе с тем на третьей и четвертой ступенях охлаждения (от  $-3,5$  до  $-6,5$  и от  $-6,5$  до  $-11,5$  °C) наблюдалось расширение мерзлого грунта. На ступенях нагревания в интервалах температуры от  $-11,5$  до  $-6,5$  и от  $-6,5$  до  $-3,5$  °C в первые 6–8 ч каждой ступени отмечалось температурное сокращение с последующим расширением и стабилизацией температурных деформаций. На последних двух ступенях нагревания (от  $-3,5$  до  $-2,5$  и от  $-2,5$  до  $-1,5$  °C) преобладало температурное сокращение.

Объяснить полученные результаты можно следующим образом. Температурное сокращение мерзлой глины при охлаждении в пределах температурной области интенсивных фазовых переходов ( $-1,5 \div -3,5$  °C) может быть связано с преобладанием температурных сокращений компонентов мерзлого грунта при понижении температуры и с усадкой грунта, связанной с перемещением незамерзшей воды из центральных частей образца к его периферии под действием градиента температуры. Температурное расширение при последующем более резком охлаждении образца глины за пределами температурной области интенсивных фазовых переходов ( $-3,5 \div -11,5$  °C), возможно, объясняется преобладанием микротрещинообразования образца, возникающего вследствие разных значений коэффициента температурного деформирования у льда и частиц грунта различного минерального состава и развития повышенных локальных температурных напряжений на их контактах, над температурным сокращением компонентов грунта при понижении температуры, а также дополнительным переходом незамерзшей воды в лед с увеличением объема.

Сложный характер температурных деформаций мерзлой глины при ее нагревании в пределах интервала низких значений отрицательной температуры может быть обусловлен различной интенсивностью расширяющих и сжимающих физических и физико-химических процессов в мерзлой глине в разные периоды температурного деформирования. Преобладание температурного сжатия при нагревании глины в области высоких отрицательных температур может быть связано с частичным оттаиванием внутригрунтового льда, которое сопровождается уменьшением объема.

Характер температурных деформаций мерзлых грунтов при однократном изменении температуры в цикле охлаждения–нагревания можно проанализировать на основе испытания мерзлых образцов супеси, песка и глины (рис. 2), а также мерзлой глины при различных величинах суммарной влажности (рис. 3) и при нескольких циклах охлаждения-нагревания (рис. 4). Для всех видов испытания он однотипен. При охлаждении образцов мерзлых грунтов в первые 6–8 ч от начала опытов наблюдалось увеличение их объема, после этого происходило некоторое уменьшение объема либо наступала стабилизация деформации. При нагревании наблюдалась обратная картина — на первом этапе происходило сжатие образцов с

последующей стабилизацией температурной деформации.

Температурное расширение мерзлых грунтов на начальном этапе охлаждения может быть связано с преобладанием температурного растрескивания приповерхностных слоев образцов при резком понижении температуры. После завершения этого процесса в образцах продолжают процессы температурного сокращения компонентов мерзлых грунтов и термоусадки, обладающие эффектом температурного последействия [Вотьяков, Гречищев, 1969], что приводит к некоторому температурному сокращению образцов. Температурные деформации сокращения мерзлых грунтов при последующем нагревании образцов могут быть обусловлены фазовыми переходами льда, оттоком незамерзшей воды из периферийных участков в глубь образцов и смыканием стенок микротрещин, образовавшихся при охлаждении мерзлых грунтов.

Изучение зависимости температурного деформирования от вида мерзлого грунта проводилось на образцах глины, супеси и песка. Полученные результаты показали (рис. 2), что максимальные температурные деформации характерны для мерзлой глины ( $\alpha = 9,3 \cdot 10^{-5} \div 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при охлаждении и  $1,04 \cdot 10^{-4} \div 1,39 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при на-

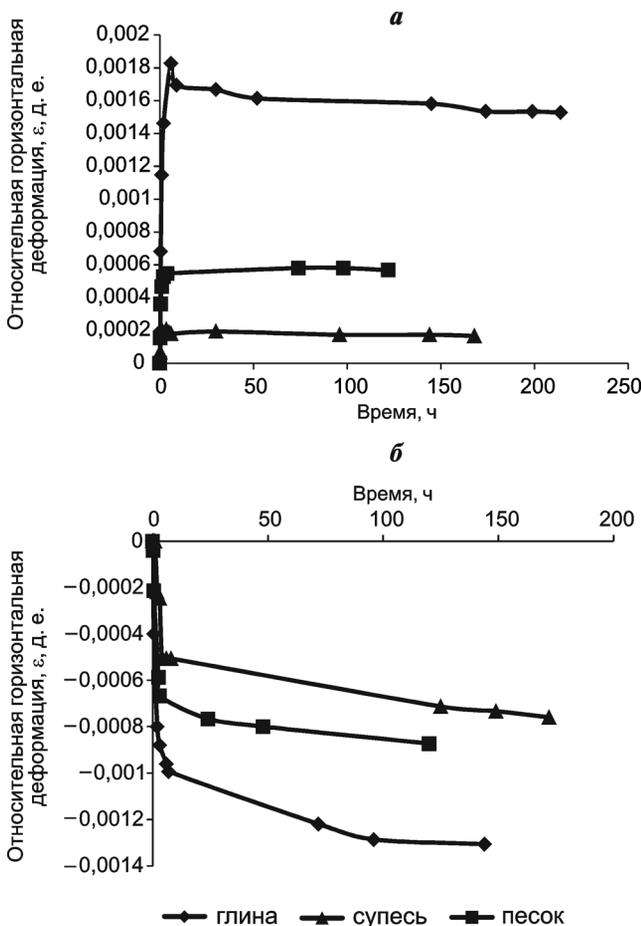


Рис. 2. Зависимость температурных деформаций от вида мерзлого грунта: а — охлаждение, б — нагревание

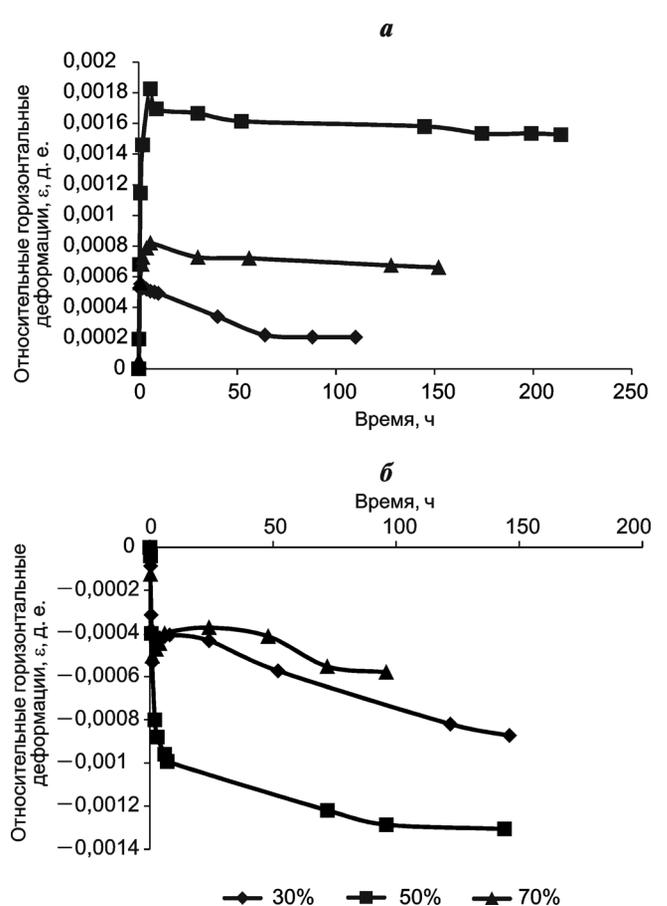


Рис. 3. Зависимость температурных деформаций мерзлой глины от суммарной влажности образцов: а — охлаждение, б — нагревание

гревании), минимальные — для мерзлой супеси ( $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при охлаждении и  $7,8 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при нагревании) и промежуточные — для мерзлого песка ( $\alpha = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при охлаждении и  $9,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при нагревании).

Полученные результаты объясняются тем, что глинистые грунты более дисперсны, чем песчаные, и чем выше дисперсность грунта, тем больше содержание незамерзшей воды. При понижении температуры незамерзшая вода переходит в лед, что влечет за собой увеличение объема мерзлого грунта. Кроме того, более дисперсные грунты обладают большей способностью к миграции незамерзшей воды при возникновении градиента температуры с ее последующим замерзанием. Более высокие величины деформации песка (по сравнению с супесью) можно объяснить засоленностью песчаного грунта, что обуславливает повышенное содержание незамерзшей воды.

Дисперсность грунтов влияет и на эффект температурного последствия. В менее дисперсных грунтах он наблюдается в меньшей степени. Следует учитывать, что песчаные и супесчаные грунты обладают более жесткими структурными связями, а процессы, приводящие к температурному деформированию, затухают в них быстрее, чем в глине. Поэтому процесс температурного деформирования в них менее растянут во времени, и температурные деформации затухают быстрее.

Зависимость температурного деформирования от влажности изучалась на образцах мерзлой по-

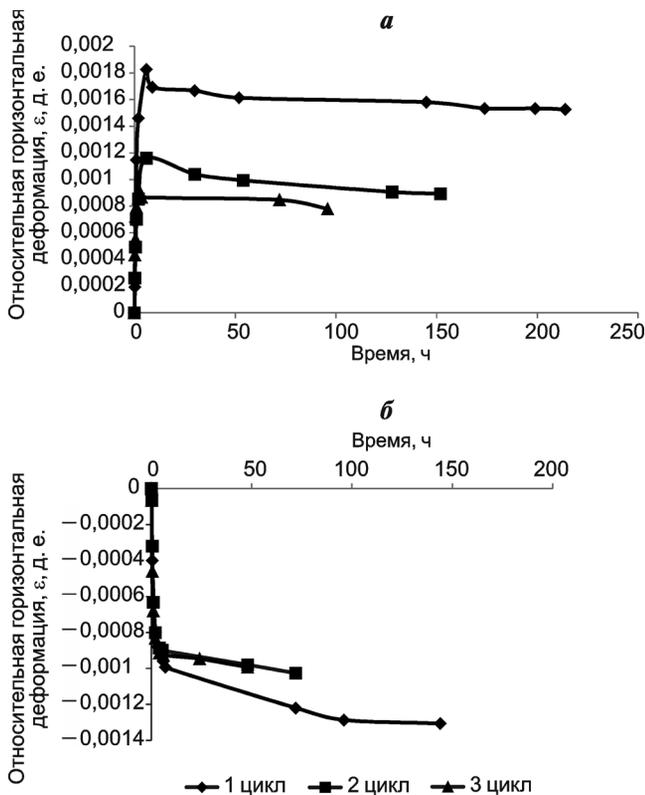


Рис. 4. Зависимость температурных деформаций от времени для различных циклов охлаждения и нагревания мерзлой глины: а — охлаждение, б — нагревание

лиминеральной глины с величиной суммарной влажности 30, 50 и 70% (рис. 3). Согласно полученным результатам максимальные величины температурных деформаций и коэффициента  $\alpha$  соответствуют мерзлой глине с суммарной влажностью 50% и составляют  $9,3 \cdot 10^{-5} \div 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Для образцов с влажностью 30 и 70% получены меньшие величины температурных деформаций и коэффициентов температурного деформирования ( $\alpha = 2,2 \cdot 10^{-5} \div 9,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  для влажности 30% и  $6,1 \cdot 10^{-5} \div 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  для влажности 70%).

Максимальные величины температурных деформаций образца с влажностью 50%, характеризующегося слоисто-сетчатой криогенной текстурой, объясняются большим содержанием незамерзшей воды в грунте, полной степенью заполнения пор водой и льдом и наличием большего количества путей миграции влаги в грунте. В образце мерзлой глины с влажностью 30%, характеризующемся неполнослоистой криогенной текстурой, неполной степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой, перемещение незамерзшей воды под действием возникающего градиента температуры и последующее льдовыделение, возможно, происходило в пределах свободной пористости, что обуславливало меньшие температурные деформации. Образец мерзлой глины с суммарной влажностью 70% имел атакситовую криогенную текстуру. Это привело к уменьшению количества влагопроводных путей, сокращению перераспределения незамерзшей воды под действием градиента температуры и как следствие к уменьшению температурных деформаций.

Исследование влияния числа циклов охлаждения–нагревания на температурное деформирование проводили с мерзлой полиминеральной глиной, имеющей суммарную влажность 50% (рис. 4). Полученные результаты показывают, что с увеличением номера цикла коэффициент линейной температурной деформации при охлаждении уменьшается от  $1,6 \cdot 10^{-4}$  до  $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , при нагревании — от  $1,4 \cdot 10^{-4}$  до  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Это можно объяснить тем, что температурные деформации с каждым циклом охлаждения–нагревания принимают частично необратимый характер, и процессы, описанные выше, затухают.

**Выводы.** 1. Характер и знак температурных деформаций мерзлых грунтов могут быть различны при ступенчатом и резком изменении температуры, что определяется сочетанием преобладающих физических и физико-химических процессов в мерзлых грунтах.

2. Зависимость температурных деформаций от вида мерзлого грунта обусловлена их составом, льдистостью и содержанием незамерзшей воды.

3. Зависимость температурных деформаций от влажности (льдистости) мерзлых грунтов носит экстремальный характер. Максимальные температурные деформации наблюдаются при полной

степени заполнения пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой.

4. С увеличением количества циклов охлаждения–нагревания температурные деформации

мерзлых грунтов уменьшаются, что связано с их необратимостью и затуханием некоторых физических и физико-химических процессов в мерзлых грунтах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 330 с.

*Вотяков И.Н.* Температурные коэффициенты расширения мерзлых грунтов // Прочность и ползучесть мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

*Вотяков И.Н.* Объемные изменения мерзлых грунтов в связи с фазовыми переходами воды при температурных колебаниях // Мат-лы VIII межвед. совещания по геокриологии. Вып. 5. Якутское кн. изд-во, 1966.

*Вотяков И.Н., Гречищев С.Е.* О временном эффекте последствия температурных деформаций и напряжений в мерзлых грунтах // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Вып. 14. Красноярск, 1969.

*Гречищев С.Е.* Результаты исследований температурных деформаций и прогноз морозобойного растрескивания грунтов // Мат-лы всесоюз. науч. совещ. по мерзлотоведению. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. С. 167–186.

*Гречищев С.Е.* Основные закономерности терморейологии и температурного растрескивания мерзлых грунтов // Вторая междунар. конф. по мерзлотоведению. Вып. 4. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1973. С. 26–34.

*Гречищев С.Е.* Об основах терморейологии криогенных пород // Проблемы геокриологии. М.: Наука, 1983. С. 90–100.

*Еришов Э.Д., Брушков А.В.* Природа аномальных температурных деформаций мерзлых грунтов // Геокриологические исследования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. С. 171–182.

*Еришов Э.Д., Брушков А.В., Комаров И.А., Хорс М.А.* Температурные деформации мерзлых дисперсных льдонасыщенных пород при низких отрицательных температурах // Мат-лы второй конф. геокриологов России. Т. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 81–87.

*Федосов А.Е.* Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании и протаивании. М.: Трансжелдориздат, 1935.

*Шушерина Е.П., Рачевский Б.С., Отрощенко О.П.* Исследование температурных деформаций мерзлых горных пород // Мерзлотные исследования. Вып. 10. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. С. 273–283.

*Шушерина Е.П., Барковская Е.Н., Ревина Л.А.* Исследование температурных деформаций дисперсных мерзлых пород в зависимости от их состава и температуры в диапазоне от  $-0,5$  до  $-55^{\circ}$  // Мерзлотные исследования. Вып. 13. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 212–226.

Поступила в редакцию  
11.03.2017