

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

INFLUENCE OF CYCLIC FREEZING-THAWING ON THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF FROZEN SOILS: A STATE-OF-THE-ART REVIEW

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор кафедры геотехники и дорожного строительства Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по научной работе и инновациям ООО «НПП “Геотек”», д. т. н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

ИДРИСОВ И.Х.

Генеральный директор ООО «НПП “Геотек”», к. т. н., г. Пенза, idrisov@npp-geotek.ru

BOLDYREV G.G.

Professor of the Geotechnics and Road Construction Department of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the “Geotek” LLC research and production enterprise, DSc (Doctor of Science in Technics), Penza, g-boldyrev@geotek.ru

IDRISOV I.H.

General director of the “Geotek” LLC research and production enterprise, PhD (Candidate of Science in Technics), Penza, idrisov@npp-geotek.ru

Ключевые слова:

замораживание-оттаивание; циклы замораживания-оттаивания; мерзлые грунты; механические характеристики; прочность; деформируемость; проницаемость.

Key words:

freezing-thawing; freeze-thaw cycles; frozen soils; mechanical characteristics; strength; deformability; permeability.

Аннотация

Статья представляет собой обзор публикаций, в которых рассматривается влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность и деформируемость мерзлых грунтов. Показано воздействие этого процесса на прочность, сжимаемость и проницаемость мерзлых грунтов. Приведены методика и некоторые результаты известных испытаний в условиях одноосного, компрессионного и трехосного сжатия образцов грунта.

Abstract

This paper is a review of publications dealing with the influence of cyclic freezing-thawing on the strength and deformability of frozen soils. The authors show the influence of this process on the strength, compressibility and permeability of frozen soils. A technique and some results of known uniaxial and triaxial compression tests of soil samples are presented.

Введение

В связи с тем, что авторы планируют публикацию серии обзорных статей по изучению механических свойств мерзлых грунтов, в данном обзоре приведены ссылки на работы только тех отечественных исследователей, которые рассматривали влияние циклического промерзания-оттаивания на механические свойства мерзлых грунтов. В дальнейшем по мере рассмотрения конкретных вопросов исследования механических свойств мерзлых грунтов ссылки на работы отечественных ученых будут, естественно, дополняться. Авторы приносят свои извинения, если они не отразили чьи-то работы в данной публикации, и будут благодарны читателям за дополнительную информацию.

На основе первых впечатлений, полученных в процессе работы в указанном направлении, в первую очередь следует отметить усилия китайских ученых, которые в последнее десятилетие направлены на изучение механических свойств мерзлых грунтов. К сожалению, несмотря на то что площадь распространения мерзлых и многолетнемерзлых грунтов в России значительно больше, чем в Китае, им в нашей стране уделяется мень-

ше внимания, особенно при исследовании прочностных и деформационных свойств.

Цель, которую поставили перед собой авторы, заключается в создании на основании выполненного анализа зарубежных и отечественных научных публикаций современных приборов на базе ООО «НПП “Геотек”» для испытаний мерзлых грунтов при различном силовом нагружении и контролируемой температуре.

Известно, что, в отличие от обычных дисперсных немёрзлых, мерзлые грунты характеризуются наличием различных криогенных структурных связей. На территориях с отрицательными температурами грунты у поверхности земли замерзают за счет перехода жидкой воды в их порах в твердое состояние (в лед). В скальных грунтах вода замерзает в трещинах и активно их разрушает за счет расклинивающего действия образующегося льда (увеличение объема льда достигает 9,1%) [10, 15, 16].

В процессе сезонного промерзания дисперсные связные и несвязные грунты за счет ледяного цемента приобретают повышенную прочность, несколько увеличивают объем и становятся водонепроницаемыми. Предел прочности при сжатии мерзлых суглинков и глин дости-

гает 6 МПа и более. При небольшой влажности, которая может быть, например, в песках, свойства грунтов при переходе от положительной температуры к отрицательной мало меняются.

В весеннее время года лед в грунтах растаивает. Дисперсные грунты теряют прочность, становятся водонасыщенными. Особенно сильно это сказывается на органоминеральных и органических грунтах, которые могут переходить в разжиженное состояние, в результате чего строительные объекты получают чрезмерные осадки.

Процесс замораживания-оттаивания оказывает существенное влияние на свойства грунтов в районах с отрицательной температурой. Оно проявляется в виде морозного пучения при замерзании глинистых отложений и осадок зданий при оттаивании мерзлых грунтов. Для описания подобных явлений предложено множество различных моделей поведения грунтов с движущимся фронтом промерзания [18, 19, 33, 45].

Зависимость коэффициента пористости грунта от нагрузки (например, от веса здания) при его оттаивании в весенне-летний период показана на рис. 1.

Как правило, в течение нескольких циклов замораживания и оттаивания глинистого грунта его структура изменяется вследствие развития криогенного всасывания, а также сегрегации между частицами грунта из-за образования линз льда. В результате изменяются состав, физические и физико-механические свойства грунта — влажность, плотность, модуль деформации, параметры прочности и др.

Исследования влияния процесса замораживания-оттаивания грунтов на их свойства начались в 30-х годах прошлого столетия благодаря работам М.И. Сумгина и Н.А. Цытовича [16].

Циклическое замораживание-оттаивание грунтов оказывает влияние на их механические характеристики, и этот процесс должен учитываться при выборе их параметров для проектирования оснований зданий и сооружений, оценки устойчивости склонов, котлованов, насыпей в районах с распространением сезонно-мерзлых и многолетнемерзлых грунтов. В данном обзоре рассмотрены методы исследований, техника испытаний и влияние процесса замораживания-оттаивания на механические свойства мерзлых грунтов.

Изменения механических свойств грунтов в результате их замораживания-оттаивания не привлекают такого широкого внимания, как другие аспекты механики мерзлых грунтов. Большинство исследований сфокусировано на физических и механических свойствах последних, а изучение влияния циклического замораживания-оттаивания проводится реже [18, 19, 42]. Есть несколько обзоров о механических свойствах мерзлых грунтов, в особенности ползучести [29, 39, 49–51]. Имеется обзор литературы, посвященный исследованию промерзания грунтов [30, 44]. Опубликован обзор [53], в котором кратко описываются изменения их физических и механических свойств в результате промерзания. Описания состояния рассматриваемого вопроса приведены и в некоторых технических отчетах [32, 34, 38], но они относятся к специальным техническим проблемам. Анализ, выполненный в работе [23], не учитывает некоторые особенности механики грунтов.

Состояние вопроса влияния циклического замораживания-оттаивания на механические свойства грунтов описано в работе [49]. В настоящем обзоре добавлено

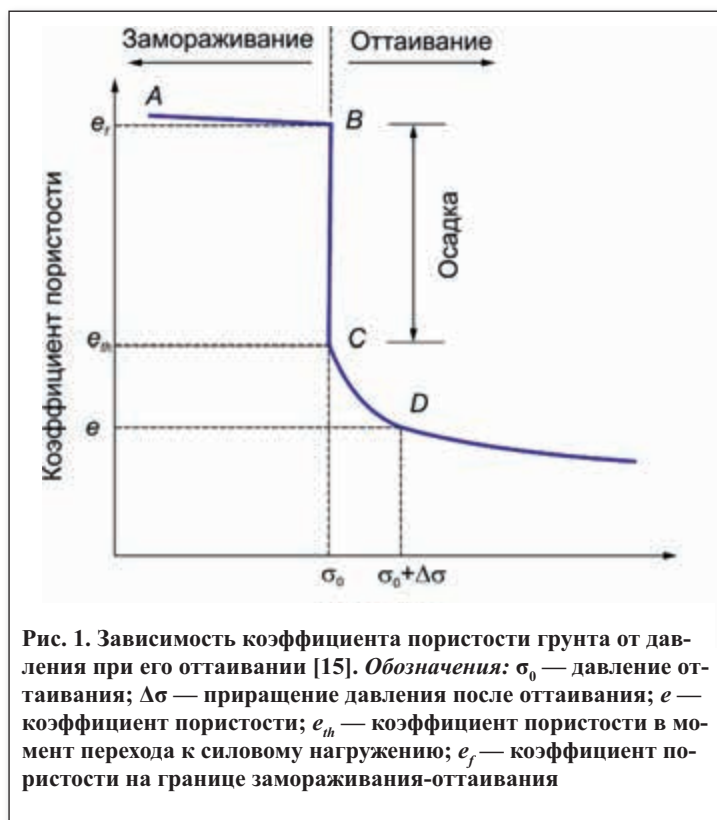


Рис. 1. Зависимость коэффициента пористости грунта от давления при его оттаивании [15]. Обозначения: σ_0 — давление оттаивания; $\Delta\sigma$ — приращение давления после оттаивания; e — коэффициент пористости; e_{th} — коэффициент пористости в момент перехода к силовому нагружению; e_f — коэффициент пористости на границе замораживания-оттаивания

рассмотрение исследований, выполненных в период с 2006 по 2016 год, а также некоторых других работ российских авторов 1970–2016 годов [1–16].

Методики испытаний

Обычно испытания на замораживание-оттаивание проводятся в лабораторных условиях с цилиндрическими образцами грунтов при контроле температуры вокруг них с применением системы охлаждения. Используемое для этого устройство, в которое помещается образец грунта, включает термоизолированный корпус, верхний и нижний штампы с каналами, через которые проходит жидкость для охлаждения или нагревания, и датчик для измерения деформаций образца. Нормальное давление на последний прикладывается через верхний штамп.

Образцы грунта могут также находиться внутри рабочей камеры устройства силового нагружения (например, в приборе для трехосного сжатия) с системой охлаждения (рис. 2). Это позволяет проводить механические испытания сразу же после выполненных циклов замораживания-оттаивания [3, 8, 9, 28, 46, 48, 49].

Известные исследования влияния циклического замораживания-оттаивания можно разделить на опыты с различными температурными условиями в образце грунта:

- одностороннее замораживание со стороны верхнего штампа;
- двухстороннее замораживание со сторон верхнего и нижнего штампов;
- всестороннее замораживание (со всех сторон образца грунта).

Замораживание может выполняться в условиях открытой или закрытой системы в зависимости от источника питания водой и с нагрузкой или без нагрузки на образец.

Эффекты различных процедур замораживания исследуются в основном в работах, посвященных морозному

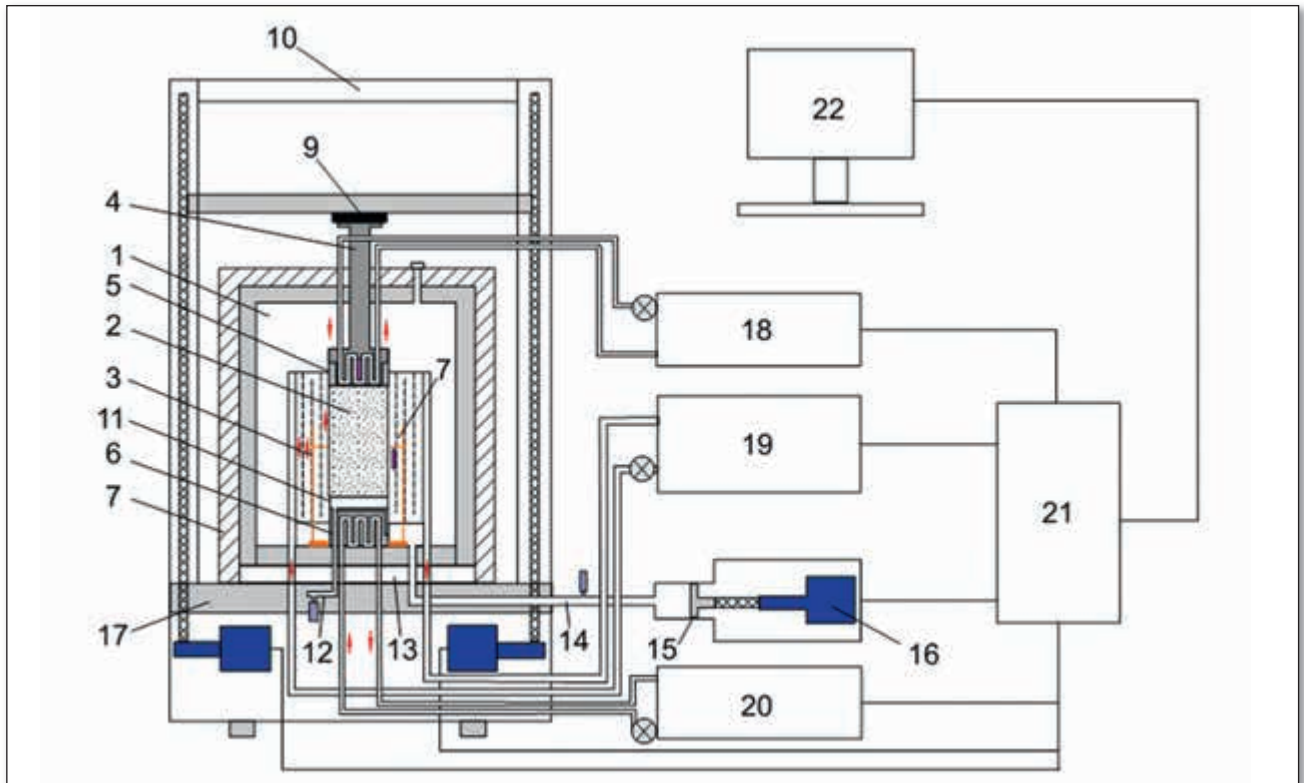


Рис. 2. Схема трехосного прибора [61]: 1 — камера давления; 2 — образец грунта в резиновой оболочке и с уплотнительными кольцами; 3 — устройство для измерения радиальной деформации; 4 — шток осевой нагрузки; 5 — верхний штамп; 6 — нижний штамп; 7 — стальная циркуляционная трубка; 8 — теплоизоляционный кожух; 9 — устройство для осевого нагружения; 10 — стальная рама; 11 — проницаемый диск; 12 — дренажная трубка; 13 — несжимаемая теплоизолирующая плита; 14 — трубопровод с маслом; 15 — плунжер контроллера бокового давления; 16 — сервомотор; 17 — основание

пучению [1–4, 8, 9, 37], но в них не рассматривается влияние циклического замораживания-оттаивания на механические свойства грунтов, которое может быть вызвано формированием линз льда при замерзании.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на физические свойства грунтов

Э. Чемберлен (E. Chamberlain) и А. Гоу (A. Gow) [24] провели обширные исследования влияния циклического замораживания-оттаивания нормально уплотненных глинистых грунтов в условиях компрессионного сжатия. Образцы замораживались при свободном поступлении воды — так, чтобы могли сформироваться линзы льда. Циклическое нагружение выполнялось до тех пор, пока не прекращались изменения коэффициента пористости или проницаемости. Изменения структуры и проницаемости испытанных грунтов определялись после завершения циклического замораживания-оттаивания. Механизм изменений интерпретировался относительно структуры грунта с использованием двух схем, которые приведены на рис. 3.

Для мелкозернистых грунтов с меньшим количеством глинистых минералов (например, для пылеватых супесей) большие частицы контролируют процесс упаковки, в то время как минералы глины смещаются и занимают свободное поровое пространство (см. рис. 3, а). В этом случае крупные песчаные частицы влияют на сжимаемость, а глинистые — на проницаемость. После циклического замораживания-оттаивания наблюдаются небольшие изменения в пористости грунта, так как завершились изменение его структуры и сжатие. Однако

проницаемость возрастает из-за разрушения структурных связей, которые до этого имелись за счет глинистых минералов, и возникновения новых каналов для движения воды.

Для грунтов с большим содержанием глинистых минералов (например, для пылеватых суглинков) частицы глины формируют матрицу, в которой большие зерна не контактируют друг с другом (см. рис. 3, б). В этом случае частицы глины контролируют как сжимаемость, так и проницаемость. После морозного воздействия структура грунта становится более дисперсной и более плотной, что проявляется в уменьшении пористости. Однако его уплотнение не снижает проницаемость — скорее проницаемость возрастает вследствие формирования трещин после замораживания-оттаивания.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на пористость и плотность

Э. Чемберлен и А. Гоу [24], а также К. Эйгенброд (K. Eigenbrod) [27], выполнив испытания, пришли к выводу о том, что процесс замораживания-оттаивания приводит к уплотнению нормально уплотненных образцов глины. Но другие исследования дали противоположные результаты для плотных образцов грунта. Рассматривая эти результаты, П. Викландер (P. Viklander) [55] предложил ввести остаточный коэффициент пористости, который достигается после определенного количества циклов замерзания-оттаивания грунта (рис. 4). Исследования [21, 47, 55] показывают, что изменения как проницаемости, так и объема грунта наблюдаются в течение первых трех циклов замораживания-

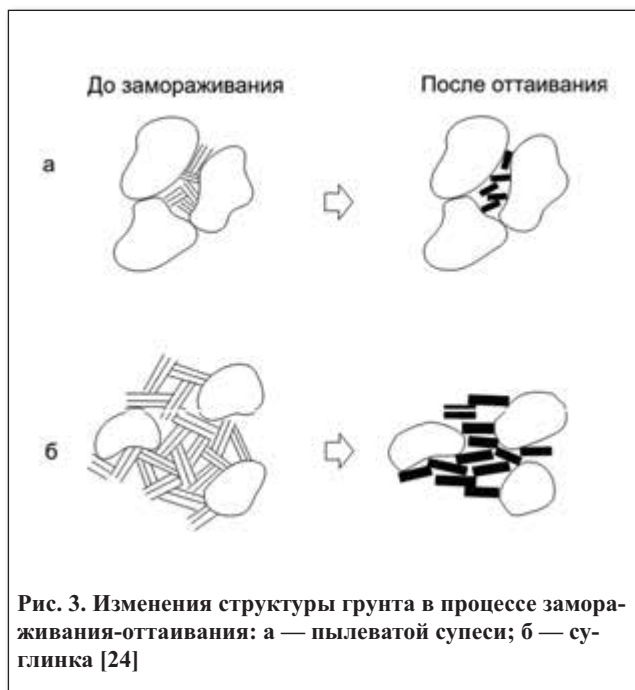


Рис. 3. Изменения структуры грунта в процессе замораживания-оттаивания: а — пылеватой супеси; б — суглинка [24]

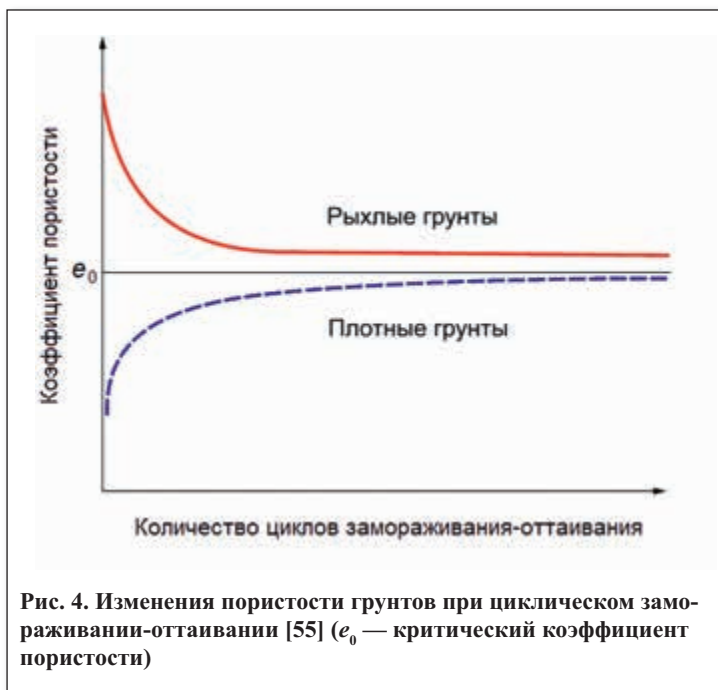


Рис. 4. Изменения пористости грунтов при циклическом замораживании-оттаивании [55] (e_0 — критический коэффициент пористости)

оттаивания (рис. 5). При этом первый цикл оказывает наибольшее воздействие.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на пределы пластичности

Такая характеристика грунта, как предел текучести, также изменяется при его замораживании-оттаивании [62]. Исследования, выполненные рядом авторов [56, 57], показали влияние циклического замораживания-оттаивания на гранулометрический состав грунта, которое может привести к изменению пределов пластичности. Однако в некоторых других работах [27, 62] отмечена противоположная особенность, а именно отсутствие влияния замораживания-оттаивания на пределы пластичности.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на механические свойства

К настоящему времени выполнено большое количество исследований влияния циклического замораживания-оттаивания на физико-механические свойства различных грунтов. Но исследователи обращали недостаточно внимания на воздействие числа циклов замораживания-оттаивания и на количественные зависимости между механическим поведением грунта и этими циклами. В работе [41] приведены результаты серии испытаний, включая замораживание-оттаивание (после 0, 2, 5, 11, 21 и 31 циклов), в условиях одноосного и трехосного неконсолидированно-недренированного сжатия. Эти испытания показали значительное влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность на одноосное сжатие, упругий модуль деформации и удельное сцепление, которые после 31 цикла снизились на 11, 32 и 84% соответственно по сравнению с грунтами без такого воздействия. При этом угол внутреннего трения несколько увеличился (на 1–2°).

В то же время исследования, представленные в работе М.Н. Царапова [14], свидетельствуют о значительно большем диапазоне изменений прочностных свойств грунтов при оттаивании.

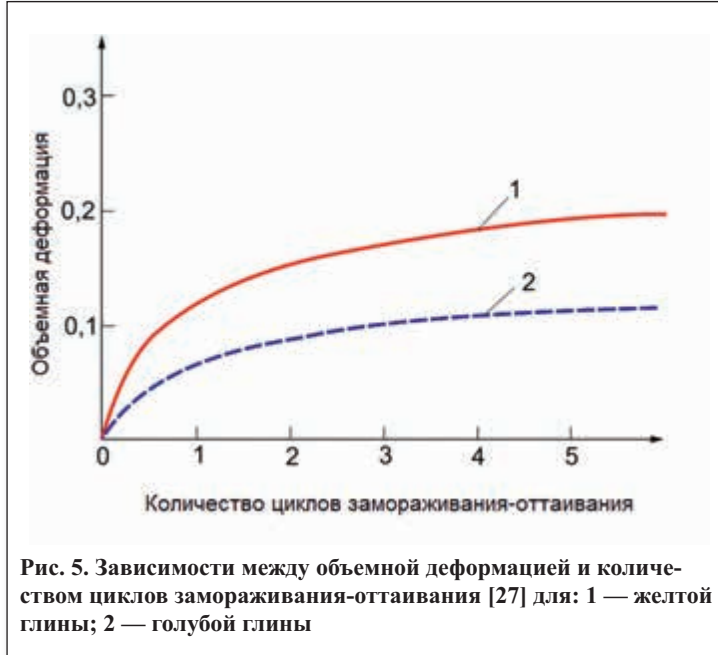


Рис. 5. Зависимости между объемной деформацией и количеством циклов замораживания-оттаивания [27] для: 1 — желтой глины; 2 — голубой глины

Испытания грунтов на одноосное сжатие после циклического замораживания-оттаивания

В работе [41] приведены результаты испытаний в условиях одноосного и трехосного сжатия в соответствии с китайским стандартом JTG E40-2007, который подобен стандартам ASTM D4318, D2166, D2850 (MC-PRC 2007). Для опытов использовался грунт нарушенного сложения с контролем послойного уплотнения методом Проктора в форме. Готовились образцы-близнецы высотой 125 мм и диаметром 61,8 мм. Их верхний предел пластичности составлял 26,9%, оптимальная плотность — 1,91 г/см³, оптимальная влажность — 16,1%.

Образцы помещались в резиновую оболочку и консолидировались в течение 24 часов с целью достижения однородного состояния по влажности. После завершения процесса консолидации они помещались в испытательную камеру и подвергались циклическому замораживанию-оттаиванию в закрытой системе без изменения влажности. Температура в камере контролировалась автома-

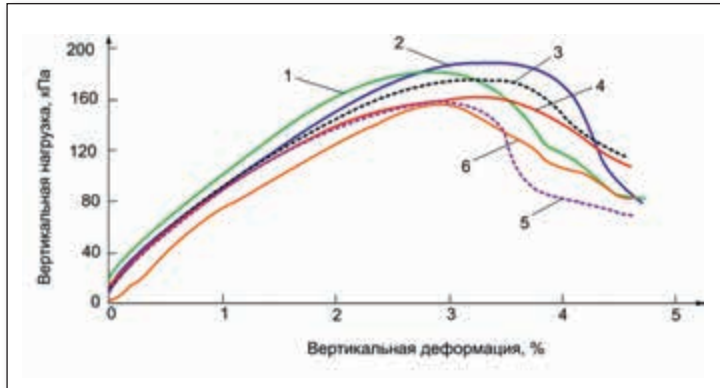


Рис. 6. Зависимость вертикальной деформации от вертикальной нагрузки (напряжения) при различном количестве циклов замораживания-оттаивания [42]: 1 — два цикла; 2 — ноль циклов (незамороженный грунт); 3 — пять циклов; 4 — одиннадцать циклов; 5 — двадцать один цикл; 6 — тридцать один цикл

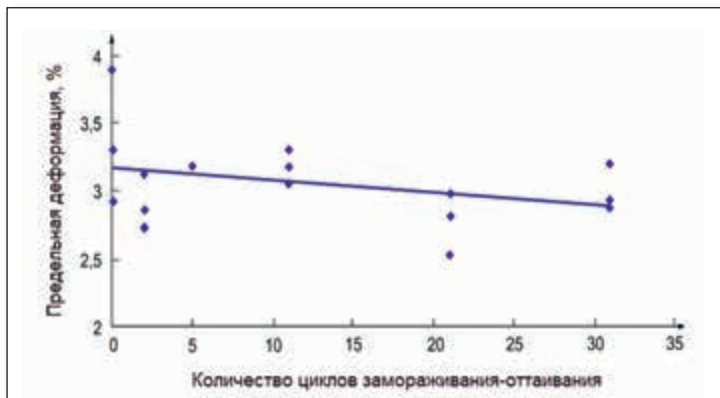


Рис. 7. Изменения предельной деформации с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания [41]

тически с помощью циркуляции хладоносителя (фреона или этиленового гликоля) под управлением компрессора. Она изменялась от минус 30 до плюс 30 °С. Один цикл замораживания-оттаивания продолжался 24 часа (16 часов — замораживание, 8 часов — оттаивание). После разных циклов замораживания-оттаивания образцы помещались в приборы для испытаний. Точность измерений составляла 0,5% от номинала датчиков.

Результаты неконсолидированно-недренированных испытаний для различных циклов замораживания-оттаивания приведены на рис. 6. На зависимости «деформация — напряжение» можно выделить три фазы деформации — упругой, пластической и разрушения [60]. Нагрузке разрушения соответствует максимальная прочность (прочность при 15%-ной осевой деформации). Грунт имеет упругое поведение при деформации менее 2% (линейный участок на кривой деформирования). Пластическое деформирование сопровождается разупрочнением грунта. Разрушение наступает внезапно после пика напряжений.

После 31 цикла замораживания-оттаивания одноосная прочность в среднем уменьшилась на 11% и может быть описана следующим уравнением линейной регрессии:

$$\sigma_f = -0,589n + 176,4 \quad (r^2 = 0,33), \quad (1)$$

где σ_f — предел прочности на одноосное сжатие, кПа; n — количество циклов замораживания-оттаивания; r — коэффициент корреляции; r^2 — коэффициент детерминации.

Эмпирическое уравнение (1) зависит от вида грунта, содержания в нем воды и его плотности в сухом состоянии.

На рисунке 7 показана линейная зависимость деформации на пределе прочности от количества циклов замораживания-оттаивания.

Упругий модуль деформации E (МПа) прогрессивно уменьшается с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания. Эта зависимость может быть описана линейным уравнением регрессии следующего вида:

$$E = -0,046n + 6,07 \quad (r^2 = 0,19). \quad (2)$$

В 2009 году Цз. Лю (J. Liu) и Л. Пэн (L. Peng) [42] провели испытания в условиях трехосного сжатия с использованием специальной системы для контроля температуры. Они были выполнены на образцах грунта с различной влажностью и при разной температуре замораживания и оттаивания. В результате была предложена эмпирическая модель для описания напряженно-деформированного состояния грунта с учетом влияния температуры и влажности.

Испытания грунтов на компрессионное сжатие после циклического замораживания-оттаивания

Дж. Грэм (J. Graham) и В.С.С. Ау (V.C.S. Au) [28] провели испытания образцов глины в условиях компрессионного сжатия (рис. 8). Результаты этих опытов свидетельствовали о полном разрушении структурной прочности (см. пунктирную кривую на рис. 8) после замораживания-оттаивания.

Подобный механизм сжимаемости нормально уплотненного грунта в процессе компрессионного сжатия был выявлен и в работе [24] (рис. 9). На рисунке 9 точка А на компрессионной кривой соответствует состоянию грунта после замерзания при свободном поступлении воды и постоянном напряженном состоянии. Увеличение коэффициента пористости до точки В происходит за счет изменения фаз при поглощении воды и образования линз льда. После таяния увеличение объема из-за линз льда исчезает и наблюдается дальнейшее уменьшение коэффициента пористости до точки С как результат переориентации частиц и изменения структуры. Однако если рассматривать процесс сжатия грунта в эффективных напряжениях, то отрицательное поровое давление (криогенное всасывание), возникшее в процессе замерзания, увеличивает эффективные напряжения между частицами грунта и прослойками глины, что приводит к объединению прослоек глины и уплотнению вплоть до точки В'. После таяния и диссипации избыточного порового давления эффективные напряжения уменьшаются вдоль траектории от точки В' к точке С.

Э. Чемберлен [22] в 1981 году исследовал эффект переуплотнения (отрицательное поровое давление) при замораживании грунтов и разработал метод определения максимальной величины всасывания. По результатам испытаний на замерзание и оттаивание он заключил, что осадки при таянии линейно связаны с отношением начального содержания воды к пределу текучести. Был выявлен также эффект уменьшения объема по сравнению с поведением грунтов без замерзания.

Дж.-М. Конрад (J.-M. Konrad) в 1989 году [32] провел циклические испытания на замерзание-оттаивание суглинка с различными коэффициентами переуплотнения (OCR), которые показали, что коэффициент пористости

оттаявших грунтов уменьшается при небольших значениях OCR (рис. 10, а) и возрастает для переуплотненных грунтов с большим значением OCR (рис. 10, б).

Конрад также сравнил потенциал сегрегации (потенциал для формирования линз льда) после циклического замораживания-оттаивания. Было выявлено, что потенциал сегрегации снижается после каждого цикла и что большинство изменений имеет место в течение первых трех циклов.

В другой работе [35] Конрад привел рентгеновские фотографии образцов грунта после циклического замораживания-оттаивания, которые показывают, что плотность образца (как и его структура) изменяется в зависимости от величины OCR, что приводит к росту проницаемости после замораживания-оттаивания. Данная особенность была обнаружена по итогам ряда исследований [21, 24, 25, 27, 31].

В работе [64] приведены результаты испытаний глинистых грунтов на замораживание-оттаивание в открытой системе (с притоком воды) с их последующим сжатием в компрессионном приборе. Эти результаты показывают, что кривизна компрессионной кривой для образца после замораживания-оттаивания отличается от таковой для немерзлого грунта. Автор публикации [64] объясняет это следствием сегрегации льда в зоне замерзания и генерацией криогенного всасывания в немерзлой зоне в течение промерзания, приводящей к большой неоднородности в образце грунта.

К. Эйгенброт [27] выполнил компрессионные испытания на замораживание и оттаивание мягкопластичных глинистых грунтов в открытой системе. Наблюдавшиеся им изменения объема достигали 30% после оттаивания грунта в зависимости от начальной влажности и пластичности глины. После оттаивания было выявлено наличие трещин и разрывов в структуре, которые способствуют значительному росту проницаемости. В опытах с переуплотненной глиной измерялось поровое давление. Максимум отрицательного порового давления коррелировал с наблюдавшимся процессом уплотнения образцов мягкопластичной глины после циклического замораживания-оттаивания. Твердые глины с содержанием воды, близким к пределу пластичности, не показали резкого уплотнения в процессе консолидации.

Испытания грунтов на трехосное сжатие после циклического замораживания-оттаивания

Грунты с нарушенной и ненарушенной структурой при трехосном сжатии ведут себя по-разному. Типичные результаты испытаний образцов переуплотненной глины в условиях недренированного трехосного сжатия показаны на рис. 11.

Наличие значительного пика прочности на кривой деформирования переуплотненного образца в незамерзшем состоянии является характерным признаком также и для плотных песчаных грунтов. Пик прочности обусловлен не только большой структурной прочностью грунта, но и увеличением его объема при сдвиге (дилатансией). Это пиковое значение прочности существенно уменьшается или совсем исчезает при замораживании-оттаивании [28, 41]. Авторы работ [28, 41] отмечают, что, как правило, прочность снижается до остаточного значения. Но при некоторых опытах [41] пиковая прочность не была обнаружена при замораживании-оттаивании образцов глины.

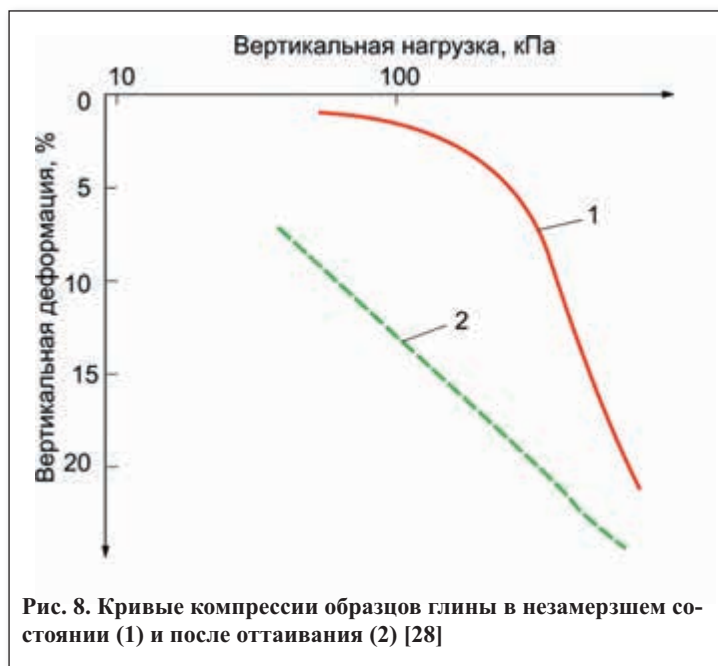


Рис. 8. Кривые компрессии образцов глины в незамерзшем состоянии (1) и после оттаивания (2) [28]



Рис. 9. Траектория напряжений в течение замораживания и оттаивания в грунте [24]: 1 — первичная ветвь компрессионной зависимости; 2 — зависимость для процесса замораживания и оттаивания для полных напряжений в полном объеме образца; 3 — зависимость для процесса замораживания и оттаивания для эффективных напряжений в образце с дискретными слоями глины. Обозначения: e — коэффициент пористости; σ — полное нормальное давление; σ' — эффективное нормальное давление

Испытания в закрытой системе при дренированном и недренированном нагружении в условиях трехосного сжатия и циклическом замораживании-оттаивании переуплотненных образцов грунта с ненарушенной структурой показывают, что циклическость приводит к возникновению большого порового давления при разрушении глины, уменьшению ее модуля упругости и снижению ее прочности по сравнению с обычной глиной в немерзлом состоянии [28]. В образцах глины после их замораживания и оттаивания обнаружены трещины.

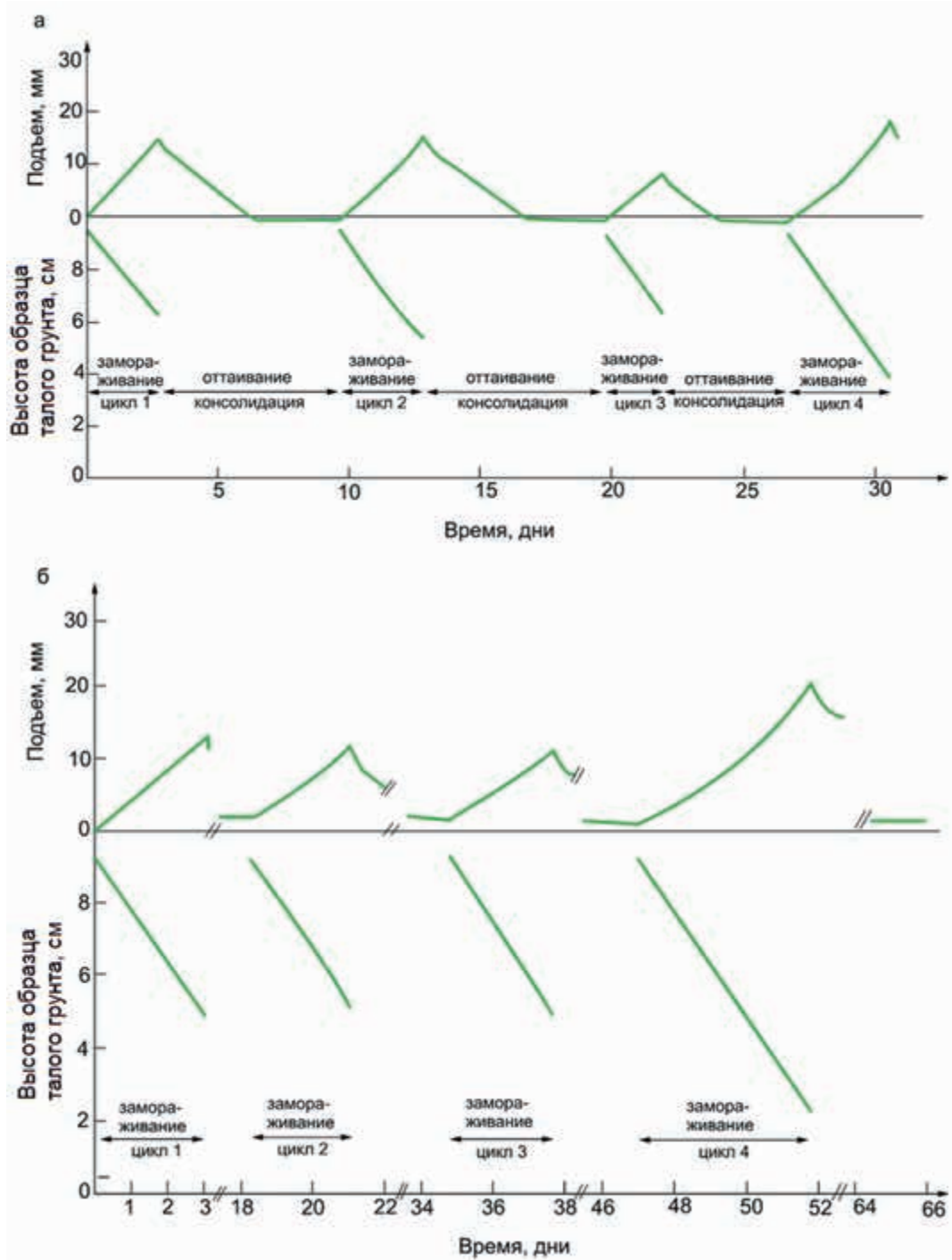


Рис. 10. Подъем после замораживания и осадка после оттаивания в зависимости от количества циклов замораживания-оттаивания и величины коэффициента переуплотнения OCR [32]: а — OCR=2; б — OCR=8

В то же время испытанные образцы переуплотненной глины с нарушенной структурой (не имевшие структурной прочности) в условиях трехосного недренированного сжатия с одним циклом замораживания-оттаивания имели чисто пластическое поведение с отсутствием разупрочнения (подобно кривой 4 на рис. 11) [46]. При этом их прочность уменьшилась, а деформируемость увеличилась. Авторы работы [46] предполагают, что это можно объяснить образованием новой структуры грунта.

В 1982 году были выполнены подобные недренированные трехосные испытания глин с нарушенной структурой [17]. В случае предварительного уплотнения образцов их результаты совпали с таковыми для рассмотренных выше опытов [46]. Однако для нор-

мально уплотненных глин были получены другие результаты.

Авторы исследования [17] также провели испытания уплотненного суглинка. Его поведение было подобно поведению переуплотненных грунтов (кривая 1 на рис. 12). Образцы с меньшей плотностью вели себя практически так же. Однако следует иметь в виду, что их плотность изменялась незначительно и что скорее всего их можно было классифицировать как грунты с низкой плотностью. Результаты указанных трехосных испытаний приведены на рис. 12.

Из рисунков 6, 11, 12 виден подобный характер деформирования грунта при одноосном и трехосном сжатии. Разрушение в условиях трехосного сжатия также

проявляется в виде скола образцов переуплотненной глины. Прочность грунта уменьшается с количеством циклов замораживания-оттаивания. Видно также, что с ростом всестороннего давления разупрочнение становится меньше (см. рис. 12).

Удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ тоже зависят от числа циклов замораживания-оттаивания. После 31 цикла сцепление уменьшается на 84% (рис. 13), а угол внутреннего трения снижается незначительно — на 1–2°.

В то же время в работе М.Н. Царапова [14] отмечено существенное влияние начальной влажности на параметры прочности c и φ . В полностью оттаявшей глине угол внутреннего трения с увеличением коэффициента полного водонасыщения S_r снизился с 15° при $S_r = 0,50$ и начальной влажности $W_{0, \text{tot}} = 20\%$ до 12° при $S_r = 0,93$ и $W_{0, \text{tot}} = 44\%$, а сцепление уменьшилось соответственно с 0,030 до 0,011 МПа. Царапов объясняет это в первую очередь отжатием воды из крупных пор (доля которых в глине невелика) и, как следствие, уменьшением пористости. В одном из выводов работы [14] отмечается, что сопротивление сдвигу и прочностные характеристики (сцепление и угол внутреннего трения) полностью оттаявшего грунта выше, чем на границе оттаивания (в приконтактном слое). Это объясняется изменением при оттаивании строения и физических свойств грунта (отмечено увеличение влажности на границе между оттаивающим грунтом и мерзлым слоем и снижение влажности в зоне сдвига для полностью оттаявшего грунта) и возникновением в нем порового давления при приложении нагрузки.

Изменения упругого модуля деформации при циклическом замораживании-оттаивании в условиях трехосного сжатия

Один из наиболее важных факторов, который должен быть рассмотрен при проектировании дорожных покрытий, — это поведение основания, подверженного циклическому нагружению от движения транспорта. Так как основание обычно создается искусственно, циклические испытания в условиях трехосного сжатия выполняются на уплотненных образцах с целью определения упругого модуля деформации.

На основе анализа известных работ можно сделать вывод о влиянии количества циклов замораживания-оттаивания на модуль упругости при циклическом нагружении грунтов. Э. Симонсен (E. Simonsen) и др. [52] изучили поведение пяти типов грунтов (от гравелистого песка до морских отложений) и выявили закономерности уменьшения модуля упругости от 25 до 60% для них в указанных условиях. Большее влияние циклического замораживания-оттаивания прослеживается у грунтов с большим содержанием глинистых частиц. У. Ли (W. Lee) и др. [39] объясняют этот эффект влиянием уровня действующих напряжений. При напряжениях разгрузки менее 55 кПа и относительной деформации 1,0% влияние количества циклов замораживания-оттаивания незначительно. Если разгрузка происходит при напряжениях более 103 кПа, изменения модуля упругости могут составить более 50%.

Исследования показывают, что циклическое замораживание-оттаивание приводит к деградации упругого модуля деформации, которая проявляется, например, в виде разрушения материалов оснований дорог. Однако

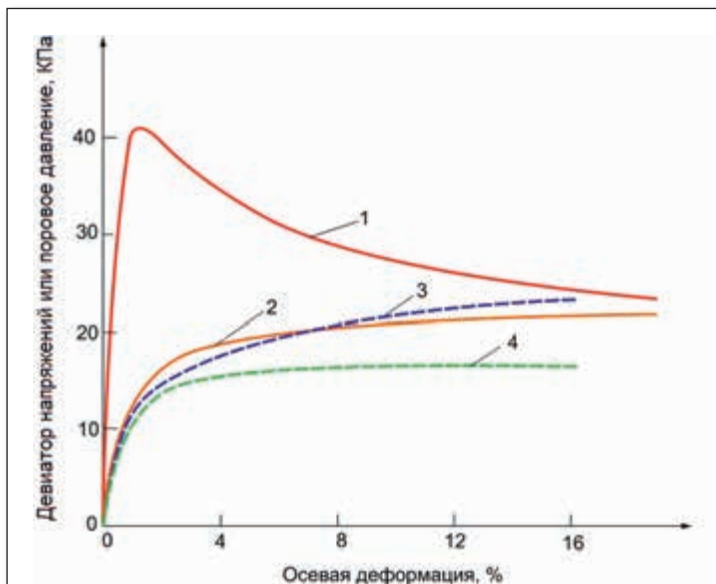


Рис. 11. Трехосное консолидированно-недренированное сжатие образцов в незамерзшем состоянии и после оттаивания [41]: 1 — зависимость «девиатор напряжений — осевая деформация» для образца в незамерзшем состоянии; 2 — зависимость «поровое давление — осевая деформация» для образца в незамерзшем состоянии; 3 — зависимость «девиатор напряжений — осевая деформация» для образца после оттаивания; 4 — зависимость «поровое давление — осевая деформация» для образца после оттаивания

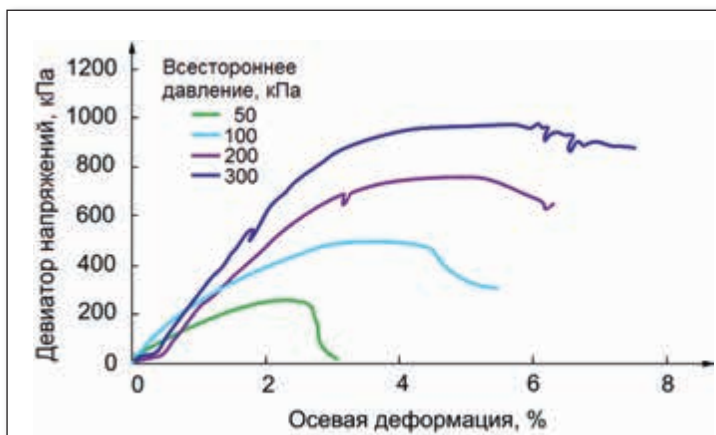


Рис. 12. Зависимость «девиатор напряжений — осевая деформация» при различном всестороннем давлении после 11 циклов замораживания-оттаивания [17]

большинство исследований проводилось на сильно уплотненных основаниях дорог. Как было отмечено ранее, плотные грунты при замораживании-оттаивании проявляют дилатансию. А рыхлые грунты, наоборот, уплотняются, что и приводит к росту модуля упругости.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность

Было выполнено большое количество работ по оценке влияния циклического замораживания-оттаивания на прочностные свойства мерзлых грунтов различной плотности (на их прочность, удельное сцепление, угол внутреннего трения). Некоторые исследования показывают, что замораживание-оттаивание является причиной снижения прочности [7, 14, 20, 28, 40, 48, 52, 58, 62]. Однако некоторые авторы обнаружили, что для рыхлых грунтов (с низкой

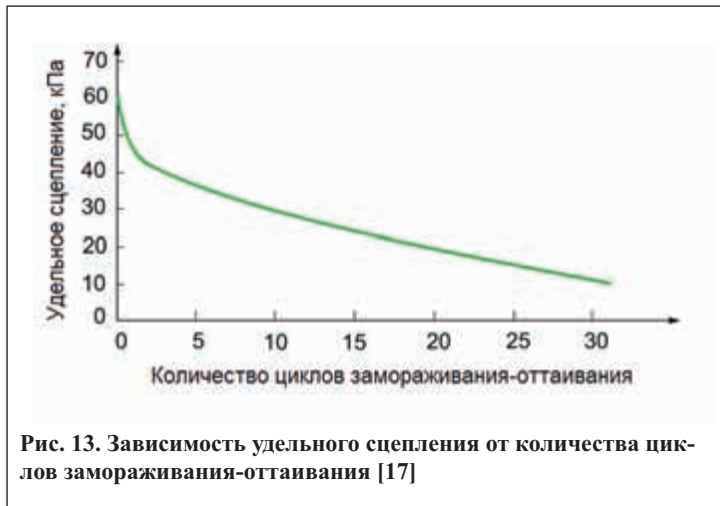


Рис. 13. Зависимость удельного сцепления от количества циклов замораживания-оттаивания [17]

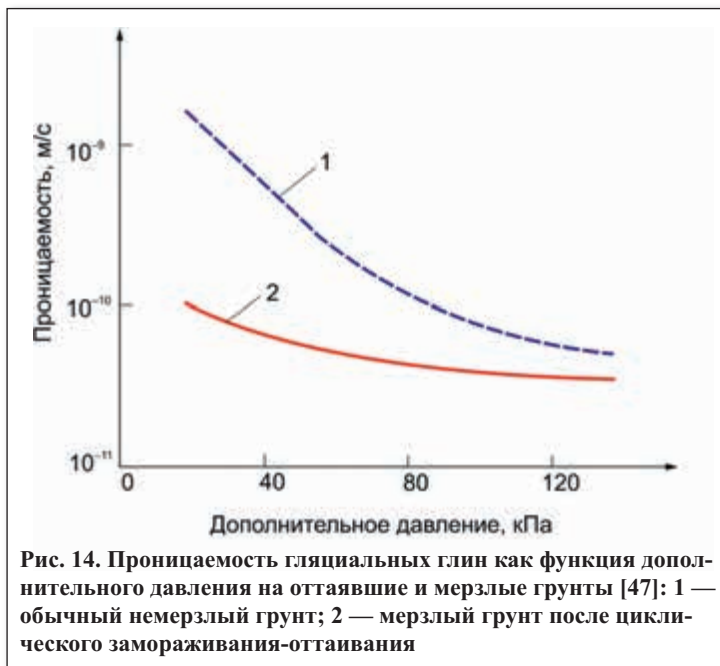


Рис. 14. Проницаемость глиняных грунтов как функция дополнительного давления на оттаявшие и мерзлые грунты [47]: 1 — обычный немерзлый грунт; 2 — мерзлый грунт после циклического замораживания-оттаивания

плотностью) прочность возрастает [17, 46]. Плотные грунты при замораживании-оттаивании стремятся к разуплотнению в отличие от менее плотных. Удельное сцепление и давление предварительного уплотнения уменьшаются после нескольких циклов замораживания-оттаивания [48].

В одной из последних работ китайских авторов [27] приведены результаты исследований влияния циклического замораживания-оттаивания на прочностные характеристики сезонно промерзающих пылеватых глин северной части Китая. Испытания двадцати образцов в условиях быстрого сдвига показали, что удельное сцепление изменяется с ростом влажности и максимум прочности достигается при влажности на границе текучести. Угол внутреннего трения резко падает на 40–60%. Сцепление постепенно уменьшается с ростом количества циклов замораживания-оттаивания. После семи циклов оно практически не изменяется и составляет от трети до половины величины сцепления для образцов грунта в немерзлом состоянии. Угол внутреннего трения возрастает с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания и зависит также от содержания влаги. Исследования позволили сделать выводы о влиянии времени и температуры на удельное сцепление и о практическом отсутствии влияния на угол внутреннего трения. Было предложено оценивать прочность мерзлых грунтов через удельное сцепление.

Е.П. Шушеринной в 1955 и 1957 годах [14] проводились экспериментальные исследования по изучению изменений механических свойств грунтов (в частности, сопротивления сдвигу) в результате промерзания-оттаивания. Было показано, что наибольшее снижение сопротивления сдвигу при оттаивании наблюдается при избыточном льдовыделении в процессе промерзания в открытой системе (с притоком воды). В этом случае сопротивление сдвигу может уменьшаться в 5 раз. В условиях промерзания с льдовыделением, но без изменения влажности сопротивление сдвигу при оттаивании изменяется в меньшей степени.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на недренированную прочность

Глинистые грунты имеют относительно малую проницаемость, поэтому при нагружении наблюдается их недренированное поведение. Для оценки прочности подобных грунтов используется показатель недренированной прочности (обозначаемый c_u или s_u). Влияние циклического замораживания-оттаивания на недренированную прочность изучается в лабораторных условиях на образцах грунта с нарушенной или природной структурой.

Авторами работ [28, 41] было выявлено существенное уменьшение недренированной прочности при циклическом замораживании-оттаивании. Было также обнаружено, что наибольшие изменения происходят при первых циклах замораживания-оттаивания [62].

Испытания грунтов с нарушенной структурой показывают меньшее влияние циклического замораживания-оттаивания на недренированную прочность. Недренированные трехосные испытания, выполненные авторами работы [17] на образцах нарушенной структуры при невысокой степени уплотнения, показали рост недренированной прочности после замораживания-оттаивания. Это объясняется тем, что рыхлые образцы были консолидированы после замораживания-оттаивания, что привело к их уплотнению.

Авторы публикации [45] получили те же самые результаты для искусственно подготовленных образцов из глины, что также было подтверждено в работе [46] при изотропном нагружении и циклическом замерзании-оттаивании.

Влияние циклического замораживания-оттаивания на проницаемость

Многочисленные исследования показывают парадоксальное явление — возрастание проницаемости при уплотнении образцов при циклическом замораживании-оттаивании [24], что не свойственно обычным немерзлым грунтам. Проницаемость грунтов, уплотненных до оптимальных плотности и влажности, возрастает при замерзании в 2–6 раз [31]. Степень подобных изменений может быть уменьшена изотропным нагружением (рис. 14), так как под действием давления могут закрываться трещины, образовавшиеся при замерзании-оттаивании [47]. Дополнительное давление оказывает решающее воздействие на проницаемость. Достаточно давления 70 кПа, чтобы исключить ее рост. Этот эффект зависит от методики испытаний, градиента температуры и условий водонасыщения [55]. Из результатов некоторых исследований следует, что проницаемость может увеличиться после замораживания-оттаивания до двух раз [25, 31, 38, 63]. Как правило, это объясняется образованием микротрещин в течение замораживания-оттаивания и больших пор после таяния кристаллов льда [38]. Некоторые полагают, что мелкие ча-

стицы грунта могут во время замораживания-оттаивания освобождать большие поры [24].

П. Викландер [55] провел серию испытаний образцов глинистого грунта, включавших по 18 циклов замораживания-оттаивания. Из их результатов следует, что проницаемость грунта после таких циклических изменений температуры возрастает для изначально плотных образцов, но уменьшается для исходно рыхлых. Коэффициент пористости e для образцов с его высоким начальным значением ($e=0,56$) уменьшился, а для образцов с его небольшой исходной величиной ($e=0,25$) увеличился. Остаточное значение коэффициента пористости в опытах с плотным и рыхлым грунтом после 1–3 циклов замораживания-оттаивания изменяется в диапазоне 0,31–0,40.

Большинство исследователей полагает, что рост проницаемости связан с образованием микротрещин, таянием льда и увеличением вследствие этого порового пространства [23, 24].

К. Эйгенброт [27] также обнаружил, что замораживание-оттаивание приводит к уплотнению образцов мягкопластичных и нормально уплотненных глин.

Но в работах [42, 55, 61] показано, что замораживание-оттаивание приводит к уплотнению рыхлых грунтов, а плотность плотных грунтов уменьшается. Эта особенность поведения, называемая двойным воздействием замораживания-оттаивания на плотность грунта, была выявлена в нескольких работах [54, 58, 59].

Заключение

В результате выполненного обзора литературных источников можно сделать некоторые выводы о влиянии циклического замораживания-оттаивания на механические свойства мерзлых грунтов.


1. Пористость возрастает при замораживании-оттаивании для плотных грунтов и уменьшается для рыхлых. Плотные грунты при замораживании-оттаивании стремятся к разуплотнению в отличие от менее плотных.

2. Проницаемость оттаявших грунтов возрастает с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания. Ее рост связан с образованием новых микротрещин при замораживании и больших пор при таянии льда. Дополнительное внешнее давление оказывает решающее воздействие на проницаемость.

3. Прочность мерзлых грунтов зависит от числа циклов замораживания-оттаивания. Грунты в мерзлом состоянии деформируются с упрочнением и последующим разупрочнением. Напротив, грунты в оттаявшем состоянии деформируются без разупрочнения с минимальным уменьшением прочности после пика напряжений.

4. Сжимаемость мерзлых грунтов возрастает с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания. Наблюдаемые изменения объема достигают 30% и более после оттаивания в зависимости от начального содержания влаги и пластичности глинистых грунтов.

5. Упругий модуль деформации и недренированная прочность зависят от степени предварительного уплотнения (OCR) и числа циклов замораживания-оттаивания. Уменьшение модуля упругости может составлять от 25 до 60% для различных грунтов.

6. Удельное сцепление уменьшается с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания и в итоге составляет от трети до половины величины сцепления для грунта в немерзлом состоянии. Угол внутреннего трения с ростом числа циклов замораживания-оттаивания изменяется незначительно. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абжалимов Р.Ш. Лабораторные исследования морозного пучения // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1982. № 5. С. 20–22.
2. Абжалимов Р.Ш., Головкин Н.Н. Лабораторные исследования зависимости морозного пучения грунта от давления в малогабаритной промышленной установке // Автомобильные дороги. 2008. № 11. С. 92–97.
3. Абжалимов Р.Ш., Головкин Н.Н. Лабораторные исследования зависимости морозного пучения грунта от давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 1. С. 25–30.
4. Абжалимов Р.Ш., Любич И.Н. К определению прочностных и деформационных характеристик сезонно промерзающих грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 9. С. 9–11.
5. Аксенов В.И. Исследование механических свойств мерзлых засоленных грунтов как оснований сооружений: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 1980. 23 с.
6. Кальберген Р.Г., Леонов А.Р. Современные методы исследования механических свойств оттаивающих грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 22–23.
7. Карлов В.Д. Новые методы оценки влияния промерзания и оттаивания на изменение механических свойств сезонно промерзающих грунтов оснований сооружений // Инженерно-геологические изыскания и исследования в криолитозоне: теория, методология, практика. СПб., 2000. С. 124–130.
8. Невзоров А.Л. Экспериментальное определение морозного пучения грунтов // Известия вузов. Лесной журнал. 1995. № 6. С. 61–65.
9. Невзоров А.Л., Коршунов А.А., Чуркин С.В. Методы оценки степени пучинистости грунтов с использованием современных приборов // Инженерные изыскания. 2013. № 5. С. 52–56.
10. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: Наука // Интерпериодика, 2002. 426 с.
11. Тотюнов И.А., Аверочкина М.В., Титов В.П. Влияние промерзания и оттаивания на строение, состав и свойства связных грунтов // Материалы 2-й Международной конференции по мерзлотоведению. Якутск: Якутское книжное издательство, 1973. Вып. 4. С. 98–104.

12. Ушкалов В.П. Основные закономерности сжимаемости оттаивающих и оттаявших под давлением грунтов // Материалы 8-го Всесоюзного совещания по геокриологии. Якутск, 1966. С. 226–237.
13. Федосеев Ю.Г. Экспериментальные исследования осадки оттаивающих грунтов // Оттаивающие грунты как основания сооружений. М.: Наука, 1981. С. 60–68.
14. Царанов М.Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М.: 2007. 146 с.
15. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
16. Цытович Н.А., Сумгин М.И. Основы механики мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1937. 432 с.
17. Alkire B.D., Morrison J.M. Changes in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading // Transportation Research Record. 1982. V. 918. P. 15–22.
18. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. New York: Chapman and Hall, 1994. 352 p.
19. Andersland O.B., Ladanyi B. Frozen ground engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 384 p.
20. Aoyama K., Ogawa S., Fukuda M. Temperature dependencies of mechanical properties of soil subjected to freezing and thawing // Proceedings of the 4-th International symposium on ground freezing. Sapporo, Japan, 1985. P. 217–222.
21. Boynton S.S., Daniel D.E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay // ASCE Journal of Geotechnical Engineering. 1985. V. 111 (4). P. 465–478.
22. Chamberlain E. Overconsolidation effects of ground freezing // Engineering Geology. 1981. V. 18. P. 97–110.
23. Chamberlain E. Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures // Proceedings of the International symposium on frost in geotechnical engineering. Espoo, Finland: Technical Research Center of Finland, 1989. V. 2. P. 863–893.
24. Chamberlain E., Gow A. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // Engineering Geology. 1979. V. 13. P. 73–92.
25. Chamberlain E., Iskander I., Hunsiker S. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils // Proceedings of the International symposium on frozen soil impacts on agriculture, range, and forest lands. Hanover, New Hampshire, USA: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. Special report 90-1. P. 145–155.
26. Chen R., Li D.Z., Hao D.X., Wei K.L. Influence of freezing-thawing on shear strength of frozen soil in Northeast China // Applied Mechanics and Materials. 2016. V. 835. P. 525–530.
27. Eigenbrod K. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils // Canadian Geotechnical Journal. 1996. V. 33 (4). P. 529–537.
28. Graham J., Au V.C.S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses // Canadian Geotechnical Journal. 1985. V. 22 (1). P. 69–78.
29. Jessberger H.L. A state-of-the-art report. Ground freezing: mechanical properties, processes and design // Engineering Geology. 1981. V. 18. P. 5–30.
30. Kay B.D., Perfect E. State of the art: heat and mass transfer in freezing soils // Ground Freezing 88. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. V. 1. P. 3–21.
31. Kim W-H., Daniel D.E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay // ASCE Journal of Geotechnical Engineering. 1992. V. 118 (7). P. 1083–1097.
32. Konrad J.-M. Effect of freeze-thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios // Canadian Geotechnical Journal. 1989. V. 26. P. 217–226.
33. Konrad J.-M. Influence of overconsolidation on the freezing characteristics of a clayey silt // Canadian Geotechnical Journal. 1989. V. 26. P. 9–21.
34. Konrad J.-M. Physical process during freeze-thaw cycles in clayey silts // Cold Regions Science and Technology. 1989. V. 16. P. 291–303.
35. Konrad J.-M. Sixteenth canadian geotechnical colloquium. Frost heave in soils: concepts and engineering // Canadian Geotechnical Journal. 1994. V. 31. P. 223–245.
36. Konrad J.-M., Morgenstern N.R. Mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils // Canadian Geotechnical Journal. 1980. V. 17 (4). P. 473–486.
37. Konrad J.-M., Samson M. Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation // Canadian Geotechnical Journal. 2000. V. 37. P. 857–869.
38. Ladanyi B. Mechanical behavior of frozen soils // Proceedings of International symposium on mechanical behaviour of structured media. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 1981. Part B. P. 205–245.
39. Lee W., Bohra N.C., Altschaeffl A.G., White T.D. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw // Canadian Geotechnical Journal. 1985. V. 32 (4). P. 559–568.

40. *Leroueil S., Tardif J., Roy M., Konrad J.-M.* Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain sea clays // *Canadian Geotechnical Journal*. 1991. V. 28 (5). P. 690–697.
41. *Li G., Ma W., Zhao S., Mao Y., Mu Y.* Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil // *Proceedings of the 15-th International specialty conference “Cold regions engineering”*, Quebec City, Quebec, 19–22 August 2012. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 2012. P. 72–81.
42. *Liu J., Peng L.* Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil // *Cold Regions Science and Technology*. 2009. V. 58. P. 92–96.
43. *Loch J.P.G.* State-of-the-art report: frost action in soils // *Engineering Geology*. 1981. V. 18 (1–4). P. 213–224.
44. *Nixon J.F., Ladanyi B.* Thaw consolidation // *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. New York, USA: McGraw-Hill, 1978. P. 164–215.
45. *Ogata N., Kataoka T., Komiya A.* Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 85”*, Sapporo, Japan, 5–7 August 1985. Rotterdam: A.A. Balkema, 1985. V. 1. P. 201–207.
46. *Ono T., Mitachi T.* Computer controlled triaxial freeze-thaw-shear apparatus // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 97”*, Lulea, Sweden, 15–17 April 1997. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. P. 335–339.
47. *Othman M.A., Benson C.H.* Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay // *Canadian Geotechnical Journal*. 1993. V. 30 (2). P. 236–246.
48. *Qi J., Ma W., Song C.* Influence of freeze-thaw on engineering properties of silty soil // *Cold Regions Science and Technology*. 2007. V. 53. P. 397–404.
49. *Qi J., Vermeer P.A., Cheng G.* A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2006. V. 17. P. 245–252.
50. *Sadovsky A.V., Maksimyak R.V., Razbegin V.N.* State of the art: mechanical properties of frozen soil // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 88”*, Nottingham, UK, 26–27 July 1988. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. V. 2. P. 443–463.
51. *Sayles F.H.* State of the art: mechanical properties of frozen soil // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 88”*, Nottingham, UK, 26–27 July 1988. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. V. 1. P. 143–165.
52. *Simonsen E., Janoo V.C., Isacson U.* Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions // *Journal of Cold Regions Engineering*. 2002. V. 16 (1). P. 28–50.
53. *Slunga E.* General report on frost action in soil // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 88”*, Nottingham, UK, 26–27 July 1988. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. V. 2. P. 415–417.
54. *Su Q., Tang D., Liu S.* Test on physic-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2008. V. 27 (sup. 1). P. 2990–2994.
55. *Viklander P.* Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw // *Canadian Geotechnical Journal*. 1998. V. 35 (3). P. 471–477.
56. *Viklander P., Eigenbrod D.* Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing // *Cold Regions Science and Technology*. 2000. V. 31 (2). P. 151–162.
57. *Wang J.-C.H., Xu X.-Z., Wang Y.-J.* Thermal sieve effect and convectional migration of particles during unidirectional freezing // *Glaciology and Geocryology*. 1995. V. 18 (3). P. 252–255 (Chin.).
58. *Wang X., Yang P., Wang H., Dai H.* Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2009. V. 31. P. 1768–1772.
59. *Yang C., He P., Cheng G., Zhu Y., Zhao S.* Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2003. V. 22 (sup. 2). P. 2695–2699.
60. *Yang Y., Lai Y., Li S., Dong Y.* Experimental study of deformation failure and energy properties of frozen silt under triaxial compression // *Rock and Soil Mechanics*. 2010. V. 31 (11). P. 3505–3510.
61. *Yao X., Qi J., Yu F., Ma L.* A versatile triaxial apparatus for frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2013. V. 92. P. 48–54.
62. *Yong R.N., Boonsinsuk P., Yin C.W.P.* Alteration of soil behavior after cyclic freezing and thawing // *Proceedings of the International symposium “Ground Freezing 85”*, Sapporo, Japan, 5–7 August 1985. Rotterdam: A.A. Balkema, 1985. V. 1. P. 187–195.
63. *Zimmie T.F., LaPlante C.* The effect of freeze-thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil // *Proceedings of the 22-d Mid-Atlantic industrial waste conference*. Philadelphia, Pennsylvania, USA: Drexel University, 1990. P. 580–593.
64. *Zou Y., Boley C.* Compressibility of fine-grained soils subjected to closed-system freezing and thaw consolidation // *Mining Science and Technology*. 2009. V. 19. P. 631–635.