

ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЧАСТЬ 1. ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

БОЛДЫРЕВ Г.Г.*

ООО «НПП «Геотек», г. Пенза, Россия, g-boldyrev@geotek.ru

Адрес: ул. Центральная, д. 1Н, г. Пенза, 440068, Россия

ИДРИСОВ И.Х.

ООО «НПП «Геотек», г. Пенза, Россия, idrisov@npp-geotek.ru



Обзорная статья

Поступила в редакцию 23.11.2022 / Принята к публикации 26.12.2022 / Дата публикации 30.12.2022

© ООО «Геомаркетинг», 2022

Из фототеки авторов

АННОТАЦИЯ

В обзорной статье подробно рассмотрен прессометрический метод исследования механических свойств мерзлых грунтов в полевых условиях. Прессометрический метод испытаний в мерзлых грунтах часто используется в зарубежной практике и менее распространен в отечественных исследованиях. Один из методов прессометрических испытаний термопрессометром с возможностью управления процессом оттаивания мерзлого грунта был разработан в СССР в середине 1980-х гг., но до сих пор не используется в практике инженерно-геологических изысканий. Испытания прессометром используются для определения модуля деформации, характеристик ползучести и релаксации мерзлых грунтов. Модуль деформации может быть определен как в мерзлом состоянии, так и в процессе оттаивания грунтов. Испытания на ползучесть проводятся при одноступенчатом и многоступенчатом нагружении. Исследования, проведенные В. Ladanyi, показывают, что имеются ограничения для испытаний на ползучесть. Вследствие ограничения полного объема прессометра датчики регистрируют данные только для относительных коротких периодов ползучести и для среднего диапазона напряжений. Эти ограничения привели к введению релаксационных испытаний, когда падение напряжений контролируется во времени. Испытания термопрессометром проводятся в скважине путем нагревания мерзлого грунта вокруг прессометра, измерения перемещений стенки скважины в результате расширения эластичной оболочки термопрессометра при его оттаивании. В процессе испытаний выполняется измерение радиальных перемещений, давления в камере зонда и теплового потока с последующим определением деформационных характеристик грунта. В СССР и РФ было предложено несколько конструкций прессометров для испытаний мерзлых грунтов с оттаиванием, которые могут быть взяты за основу при дальнейшей их модификации и серийном выпуске.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Мерзлые грунты; механические свойства; прессометр; испытания на ползучесть; релаксация; термопрессометр

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., 2022. Полевые методы исследования свойств мерзлых грунтов: состояние вопроса. Часть 1. Прессометрические испытания. Геотехника, Том XIV, № 4, с. 24–42, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-24-42>.

Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., 2022

24 Геотехника, Том XIV, № 4/2022 с. 24–42

FIELD METHODS OF FROZEN SOIL PROPERTIES RESEARCH: STATE OF THE ART. PART 1. PRESSUREMETRIC TESTS

GENNADII G. BOLDYREV*

Scientific Production Enterprise Geotek LLC; Penza, Russia; g-boldyrev@geotek.ru

Address: Bld. 1H, Centralnaj St., 440068, Penza, Russia

ILIY H. IDRISOV

Scientific Production Enterprise Geotek LLC; Penza, Russia; idrisov@npp-geotek.ru

Review paper

Received 23 November 2022 / Accepted 26 December 2022 / Published 30 December 2022

© Geomarketing LLC, 2022

ABSTRACT

In the review paper the pressuremetric method of investigating the mechanical properties of frozen soils in field conditions is considered in detail. The pressuremetric method of testing in frozen soils is often used in foreign practice and is less common in domestic research. One of the methods of pressuremeter tests with a thermopressuremeter with the possibility of controlling the thawing process of frozen soil was developed in USSR in the mid-1980s, but is still not used in the practice of engineering and geological surveys. Pressuremeter tests are used to determine the deformation modulus, creep and relaxation characteristics of frozen soils. The modulus of deformation can be determined both in the frozen state and in the process of soil thawing. Creep tests are carried out under single-stage and multistage loading. Studies conducted by V. Ladanyi show that there are limitations to creep tests. Due to the limitation of the full volume of the pressuremeter, the sensors only record data for relative short creep periods and for the average stress range. These limitations led to the introduction of relaxation tests where the stress drop is monitored over time. Thermopressuremeter tests are performed in a borehole by heating frozen soil around a pressuremeter, measuring the displacements of the borehole wall as it thaws and the elastic shell of the pressuremeter expands. While testing, radial displacements, pressure in the probe chamber and heat flux are measured with subsequent determination of soil deformation characteristics. Several designs of pressuremeter s for testing frozen soils with thawing have been proposed in the USSR and the Russian Federation, which can be taken as a basis for their further modification and serial production.

KEY WORDS

Frozen soils; mechanical properties; pressuremeter; creep tests; relaxation; thermopressuremeter

FOR CITATION:

Boldyrev G.G., Idrisov I.H., 2022. Field methods of frozen soil properties research: state of the art. Part 1. Pressuremetric tests. *Geotechnics*, Vol. XIV, No. 4, pp. 24–42, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-24-42>.

Введение

Лабораторные исследования и полевые испытания грунтов проводятся в соответствии с действующими нормативными техническими документами при проведении инженерно-геологических изысканий и геотехнических исследований. Они выполняются с целью определения деформационных и прочностных характеристик грунтов для последующего применения при проектировании оснований с использованием аналитических или численных методов. Для того чтобы провести лабораторные исследования, необходимо выполнить значительный объем предварительных работ, таких как бурение скважин, отбор монолитов грунта, транспортировка и хранение их в специальных условиях, вырезание образцов из мо-

нолитов, подготовка к испытаниям, водонасыщение образцов и только затем уже испытания и их обработка.

Существует несколько методов определения механических свойств мерзлых грунтов, некоторые из них определены в отечественных (ГОСТ) и международных стандартах, например, ASTM; однако нет достаточной информации о том, насколько эти методы испытаний фактически используются в настоящее время. В связи с этим неясно, нуждаются ли они в модификации, или ввиду нескольких новых разработок в арктических районах, необходимы новые методы испытаний? Эти вопросы были поставлены в 2013 г. F.E. Ostergard, H.K. Zubeck [30] и разосланы в лаборатории для испытаний мерзлых грунтов по всему миру. Ответы были получены из Аляски, Канады,

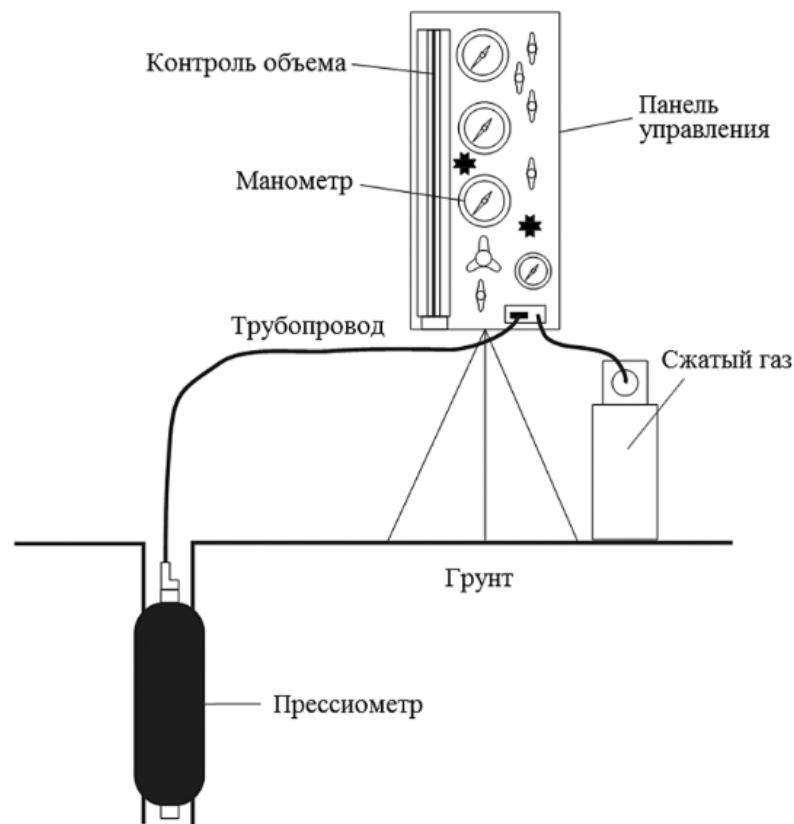


Рис. 1. Схематический чертеж баллонного прессиометра [32]

Fig. 1. Schematic drawing of balloon pressuremeter [32]

Дании, Норвегии, Швеции и континентальной части Соединенных Штатов Америки. Согласно результатам, на дату опроса ни одна из практик и стандартных методов испытаний, находящихся под юрисдикцией комитета D18.19 ASTM, не считалась устаревшей; все они соответствуют текущей практике, используются в качестве справочных материалов для соответствующих методов испытаний и применяются многими лабораториями. Рекомендуется стандартизация следующих испытаний мерзлого грунта: компрессионные испытания при оттаивании, испытание на срез и трехосное сжатие. Следует отметить, что выполненный опрос [30] охватывал только лабораторные испытания мерзлых грунтов, полевые методы испытаний не рассматривались. В части лабораторных испытаний в РФ действует несколько ГОСТ, содержание которых не является предметом рассмотрения в данной публикации. Тем не менее, до настоящего времени в РФ отсутствует стандарт для полевых испытаний мерзлых грунтов прессиометром, несмотря на то, что ранее был проведен достаточный объем исследований, рассмотренный далее в статье.

В отличие от лабораторных исследований полевые испытания быстрее, экономичнее и эффективнее как по времени, так и по стоимости. В особенности это касается мерзлых грунтов, когда даже транспортировка монолитов в лаборатор-

рию с поддержанием заданной отрицательной температуры является зачастую трудно решаемой задачей.

Полевые исследования следует проводить при изучении массивов мерзлых грунтов с целью:

- оценки пространственной изменчивости свойств мерзлых грунтов;
- расчленения инженерно-геологического разреза;
- определения физических, деформационных и прочностных свойств мерзлых, протаивающих, промерзающих грунтов и льдов в условиях естественного залегания;
- определения температуры мерзлых грунтов, глубин сезонного промерзания и оттаивания;
- оценки возможности погружения свай в мерзлые грунты и их несущей способности.

Выбор методов полевых исследований следует осуществлять в зависимости от вида изучаемых грунтов и целей исследований с учетом стадии (этапа) проектирования, уровня ответственности зданий и сооружений, степени изученности и сложности инженерно-геокриологических условий. Например, выполнение геофизических работ необходимо для определения мест с наибольшей изменчивостью свойств и дальнейшего проведения полевых исследований, в т.ч. испытаний прессиометром. Для исследования свойств грунтов целесооб-

разно применять комплекс методов, используемых при инженерно-геологических изысканиях и геотехнических исследованиях в соответствии с СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96».

Наиболее часто при проведении полевых исследований свойств мерзлых грунтов используются следующие методы испытаний: прессиометрические, статическое зондирование, горячий штамп и измерение содержания незамерзшей воды. Все эти методы будут рассмотрены последовательно в дальнейших публикациях авторов.

В данной статье авторами представлен обзор применения прессиометрического метода испытаний в мерзлых грунтах, который часто используется в зарубежной и менее распространено в отечественной практике исследований механических свойств мерзлых грунтов. Следует отметить, что для исследования механических свойств немерзлых дисперсных грунтов в РФ можно найти большое количество работ, среди которых следует в первую очередь отметить работы В.В. Лушникова [7, 8]. В одной из работ [8] В.В. Лушников отмечает что «... В ходе активных исследований в 60-90-е годы XX века было получено более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения, опубликовано более 50 научных работ; по этой тематике было защищено 17 докторских диссертаций; проблемам прессиометрии было посвящено несколько всесоюзных, российских и международных симпозиумов и конгрессов, издан ряд государственных стандартов (ГОСТ 20276, ГОСТ 21719) с указаниями по режимам испытаний, переходным коэффициентам, обеспечивающим надежность получаемых результатов. Однако серьезные исследования в этой области, к сожалению, почти полностью прекратились с 90-х годов ХХ века ...».

Испытание прессиометрами различного типа

Испытание скважинным прессиометром в полевых условиях уже много лет используется специалистами в области механики грунтов и горных пород. Этот метод испытаний успешно внедряется в область механики мерзлых грунтов и льда с 1970-х гг. [19, 21, 23–27, 32]. На практике используются следующие три типа прессиометров: баллонный, термопрессиометр и лопастной.

Испытание прессиометром первого типа в виде цилиндрического зонда выполняется в предварительно устроенной скважине путем нагружения ее стенок радиальным давлением. Стандартное оборудование, используемое в этих испытаниях, представляет собой прессиометр Менарда [29], содержащий три основные части: блок контроля, зонд в виде эластичной цилиндрической оболочки и баллон со сжатым газом, как показано на рис. 1. Зонд соединен с армированной пластиковой трубкой, которая рассчитана на рабочее давление до 20 МПа. Система имеет объемную емкость 800–1200 см³ и диапазон давлений 0–10 МПа.

Конструкция первого типа прессиометра ТЕХАМ фирмы RocTest показана на рис. 2 и представляет собой многокамер-



Рис. 2. Прессиометр конструкции ТЕХАМ фирмы RocTest.
Источник: <https://roctest.com/en/product/texame-pressuremeter/>

Fig. 2. TEXAM design pressuremeter of RocTest company. Source: <https://roctest.com/en/product/texame-pressuremeter/>

ный гидравлический зонд (прессиометр), устройство для создания давления и регистратор. Механический привод используется для перемещения поршня с цилиндром, заполненным незамерзающей жидкостью (раствором антифриза из 50% воды и 50% этиленгликоля по объему). Максимальный объем баллона составляет 1732 мл, а манометры имеют два диапазона измерений (2,5 и 10,0 МПа).

Подготовка скважины по качеству исполнения является единственным наиболее важным этапом для получения удовлетворительного результата. Необходимо выполнить два условия при устройстве скважины по качеству так, чтобы диаметр скважины был в пределах определенных интервалов:

- 1) $D_2 < D_1 < 1,03D_2$;
- 2) $1,03D_2 < D_3 < 1,20D_2$.

Здесь D_1 — диаметр бурового инструмента; D_2 — диаметр нерасширенного зонда; D_3 — начальный диаметр скважины.

Процедура испытания заключается в следующем.

— Шаг 1. Тщательно подготовить скважину в соответствии со стандартом на бурение скважин.

— Шаг 2. Поместить зонд в скважину и отрегулировать его в нужном положении.

— Шаг 3. Записать начальный объем и давление, а затем увеличивать объем на 40 мл на каждом шаге. После того, как объем будет увеличен, необходимо дождаться 30 и 60 с, а затем записать объем и соответствующее давление.

Шаг 3 повторяется до тех пор, пока давление не будет снижаться при приращении объема.

Из-за ограниченной возможности расширения эластичной оболочки зонда показания объема и давления на датчиках не от-

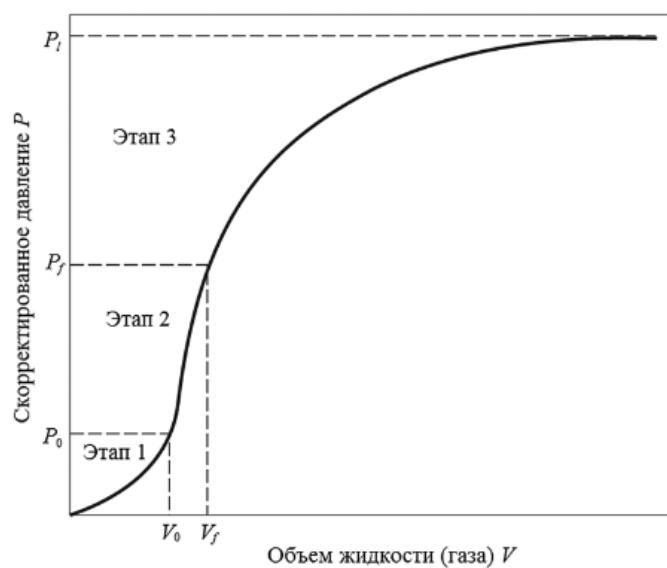


Рис. 3. Прессиометрическая кривая [31]

Fig. 3. Pressuremetric curve [31]

ражают фактических значений в массиве грунта, окружающего скважину. Поэтому показания давления и объема должны быть скорректированы, чтобы получить наиболее верную оценку значений, действующих на стенку скважины. Скорректированное давление P рассчитывается по формуле [31]:

$$P = P_r + P_l + P_i \quad (1)$$

где P обозначает скорректированное давление, P_r , P_l и P_i — записанное значение давления, гидростатическое давление жидкости и давление, затрачиваемое на растяжение эластичной оболочки, соответственно.

Гидростатическое давление жидкости P_l вычисляется по формуле

$$P_l = 10(h + Z)\rho_l \quad (2)$$

где h — высота зонда, Z — расстояние от средней точки зонда до земли, а ρ_l — плотность жидкости в камере зонда, где жидкость смешивается по объему в виде 50% воды и 50% этиленгликоля. P_i определяется по результатам калибровки зонда на давление.

Скорректированный объем рассчитывается по формуле

$$V = V_r - V_i \quad (3)$$

где V_r и V_i — обозначают фактически считываемый с прибора и потерянный объем, соответственно. V_i определяется по результатам калибровки зонда по объему.

Скорректированные значения P и V используются для построения зависимости P — V (рис. 3).

Три характерных параметра могут быть найдены из прессиометрической кривой: P_0 — начальное горизонтальное давление грунта при номинально нулевой радиальной деформации; P_f — давление на грунт, соответствующее началу пластического деформирования; P_t — предельное давление.

Типичная зависимость P — V аналогична испытаниям на статическую нагрузку. Она состоит из трех частей: начальная фаза давления, где наклон постепенный, затем упругая фаза, которая также называется фазой линейной зависимости и имеет гораздо более крутой наклон. Последняя, пластическая фаза, когда грунт начинает «течь» и разрушаться. Ниже приведена процедура получения трех характерных параметров.

Прямолинейный второй участок зависимости P — V должен быть продлен до пересечения с горизонтальной осью абсцисс. Точка пересечения обозначается как V_0 . Затем прямая линия должна быть проведена параллельно оси ординат через V_0 до пересечения с кривой, и давление, соответствующее этому пересечению, принимается равным P_0 . Точка, в которой кривая отклоняется от прямой, соответствует давлению P_f . Наконец, давление, соответствующее асимптоте пластической фазы, равно P_t .

Из решения теории упругости для радиального расширения цилиндрической полости получены уравнения [31]:

$$G = V_1 \Delta P / \Delta V; E = 2G(1 + v); V_1 = V_p + V_m. \quad (4)$$

Используя уравнения (4), можно найти модуль упругости:

$$E = 2(1 + v)(V_p + V_m) \Delta P / \Delta V, \quad (5)$$

где ΔP и ΔV — изменение давления и объема, соответственно на прямолинейном участке кривой; v — коэффициент Пуассона; V_p — начальный объем зонда; V_m — объем, обозначаемый средней точкой прямолинейной фазы.

Испытание прессиометром на ползучесть

В полевых условиях подобные испытания проводятся с использованием рассмотренного типа прессиометра. Требуется не менее двух испытаний прессиометром для получения характеристик ползучести.

Первое испытание — это одноступенчатое испытание на ползучесть. Давление в прессиометре быстро доводится до требуемого значения и сохраняется при этом давлении как можно дольше. Записывается полная деформация ствола скважины.

Второе испытание — это испытание на многоступенчатую ползучесть. В этом испытании давление быстро доводится до начального уровня и увеличивается до максимального значения, допускаемого конструкцией прессиометра. Это делается для нескольких равных приращений давления, где каждое из них поддерживается постоянным как минимум 15 мин [18]. Опыты B. Ladanyi [23] показывают, что имеются ограничения для этих испытаний на ползучесть. Вследствие

ограничения полного объема прессиометра датчики регистрируют данные ползучести только для относительных коротких периодов ползучести и для среднего диапазона напряжений. Эти ограничения привели к использованию релаксационных испытаний.

Опыт, накопленный при испытаниях на ползучесть с помощью прессиометра, показывает, что из-за общего ограничения объема рабочей камеры испытание на ползучесть со ступенчатым нагружением, состоящее из нескольких этапов, которые необходимы для интерпретации испытаний, может обеспечить данные о ползучести только для относительно короткого времени ползучести и для среднего диапазона напряжений. В принципе это ограничение можно преодолеть, выполнив несколько близко расположенных испытаний, каждое из которых ступенчато нагружается до различного уровня напряжений и проявления ползучести в течение длительных периодов времени. На практике, однако, результаты таких испытаний трудно совместить воедино из-за изменчивости свойств мерзлых грунтов даже на небольших расстояниях. Поскольку основным препятствием для проведения длительных испытаний в скважине на ползучесть при ступенчатой нагрузке, по-видимому, является ограниченный объем рабочей камеры, одним из возможных решений может быть изменение конструкции камеры зонда таким образом, чтобы камера могла выдерживать большее увеличение объема без изменения своей цилиндрической формы. Однако эта проблема до сих пор не решена удовлетворительным образом. Другой способ получения информации о ползучести заключается в замене испытаний на ползучесть релаксационными испытаниями. Преимущество последних заключается в том, что в таких испытаниях именно деформация контролируется при наблюдении за изменениями напряжения, так что объем рабочей камеры никогда не превышает допустимые пределы. Как следствие, скважинные релаксационные испытания могут быть проведены при низких напряжениях и длительных периодах времени [23].

Испытания прессиометром с релаксацией напряжений

Эти испытания также проводятся в полевых условиях с использованием прессиометра для определения свойств ползучести мерзлых грунтов. Зонд погружается в скважину, и выполняется нагружение стенок скважины, пока не будет достигнуто заданное значение деформации, а падение напряжений контролируется во времени. B. Ladanyi и M. Melouki [26] характеризуют эти испытания как обратные испытания на ползучесть, рассмотренные выше. Вместо того, чтобы поддерживать постоянным напряжение, записывая изменение деформации во времени, поддерживается начальный уровень деформации и затухающее напряжение контролируется с течением времени. Подобные испытания имеют преимущества по сравнению с испытанием на ползучесть при постоянной нагрузке, в результате чего оно чаще используется при изучении характеристик ползучести в процессе релаксации

напряжений. Наиболее значимым преимуществом релаксационного испытания является то, что в испытаниях на релаксацию контролируется деформация и регистрируется изменение напряжения во времени. При этом общая длительность испытания во времени не ограничена объемом рабочей камеры прессиометра так, как в испытаниях на ползучесть. Это позволяет проводить релаксационные испытания длительном режиме и в большем диапазоне напряжений.

При этом возникает вопрос: сопоставимы ли параметры ползучести, найденные из испытаний на ползучесть и релаксацию, соответственно. Это главный вопрос, на который исследователи пытались ответить в ходе полевых испытаний, проведенных на участке развития многолетнемерзлых толщ в г. Инувике (Канада). В работе B. Ladanyi (1982) [23] показаны и обсуждены основные результаты этого исследования. Хотя результаты, полученные в процессе двух типов испытаний, были довольно обнадеживающими, тем не менее, определенные ответы относительно достоверности и относительных достоинств различных типов скважинных испытаний могут быть получены только в том случае, если будут выполнены систематические сравнительные исследования таких испытаний в хорошо контролируемых лабораторных условиях. Учитывая данное обстоятельство, было проведено несколько испытаний скважинной релаксации в толстых цилиндрах льда и дана их предварительная теоретическая интерпретация [18], а затем подобные исследования были проведены в толстых цилиндрах из мерзлого песка.

Испытание термопрессиометром

Второй тип испытаний — термопрессиометром — был предложен в СССР в середине 1980-х гг. с целью определения параметров мерзлых грунтов при оттаивании. Известны патенты на изобретения, полученные М.В. Малышевым и Б.Д. Чумичевым [9], И.А. Марениновым, Е.В. Лебедевым и В.В. Лушниковым, Г.Н. Дерябиным [3–6, 10–15]. К сожалению, до настоящего времени ни одна из предложенных конструкций не была доведена до практической реализации.

Испытания термопрессиометром проводятся в скважине путем нагревания мерзлого грунта вокруг прессиометра и измерений перемещений стенки скважины в результате оттаивания грунта и расширения эластичной оболочки термопрессиометра. В процессе испытаний выполняется измерение радиальных перемещений, давления в камере зонда и теплового потока.

При испытании термопрессиометром мерзлого грунта с оттаиванием определяются деформационные и прочностные характеристики оттаявшего грунта. Для этого величина зоны оттаивания из условий точности измерений должна превышать 2–3 диаметра скважины, что приближенно устанавливается по количеству тепла, передаваемого термопрессиометром в грунт, и времени оттаивания.

Идея создания горячего прессиометра принадлежит М.В. Малышеву и Б.Д. Чумичеву [9]. Конструкция такого термопрессиометра показана на рис. 4.

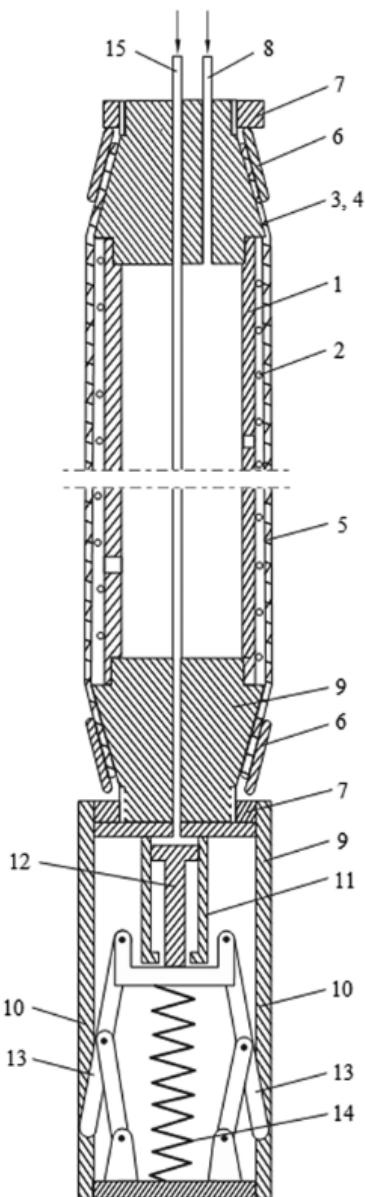


Рис. 4. Термопрессиометр конструкции М.В. Малышева и Б.Д. Чумичева [9]. Обозначения: 1 — корпус; 2 — витки электронагревателя; 3, 4 — конические крышки; 5 — эластичная оболочка; 6 — конические обоймы; 7 — прижимные гайки; 8, 15 — штуцер для подключения шланга от баллона со сжатым газом; 9 — корпус измерительного устройства; 10 — продольные пазы; 11 — силовой цилиндр; 12 — шток; 13 — рычаг; 14 — пружина

Fig. 4. Thermo pressuremeter designed by M.V. Malyshev and B.D. Chumichev [9]. Designations: 1 — body; 2 — coils of the electric heater; 3, 4 — conical covers; 5 — elastic shell; 6 — conical shells; 7 — pressure nuts; 8, 15 — hose connection from a cylinder with compressed gas; 9 — body of the measuring device; 10 — longitudinal grooves; 11 — power cylinder; 12 — rod; 13 — lever; 14 — spring

Термопрессиометр состоит из перфорированного корпуса 1, на поверхности которого спирально уложены витки элек-

тронагревателя 2. Сверху и снизу цилиндрический корпус 1 закрыт коническими крышками 3 и 4. Корпус вместе с крышками обтянут эластичной раздувной оболочкой 5. Конические обоймы 6 и прижимные гайки 7 обеспечивают герметичность корпуса. На нижней крышке 3 корпуса 1 размещен штуцер 8 для подключения шланга от баллона со сжатым газом. Измерительное приспособление состоит из корпуса 9 с двумя расположенным по диаметру продольными пазами 10, внутри которого смонтирован силовой цилиндр 11 со штоком 12, соединенный с системой шарнирно связанных между собой рычагов 13. Шток и рычаги удерживаются в исходном положении возвратной пружиной 14. На силовом цилиндре имеется ввод 15, аналогичный штуцеру 8.

После подготовки скважины термопрессиометр и измерительное приспособление, жестко связанные между собой, опускаются в скважину на заданную глубину. Небольшим давлением сжатого газа, равным сопротивлению упругости оболочки 5, последняя расширяется до прилегания к стенкам скважины. Затем включается электронагреватель 2 и начинается оттаивание мерзлого грунта в стенках скважины. По истечению времени оттаивания создается горизонтальная нагрузка и измеряется радиальное перемещение оболочки датчиками, размещенными в корпусе 1.

По окончании опыта производится измерение глубины оттаивания грунта. Для этого термопрессиометр перемещается вдоль скважины так, чтобы измерительное приспособление оказалось в средней части оттаившей зоны. Под давлением сжатого газа шток 12 выходит из цилиндра 11 и, преодолевая сопротивление возвратной пружины 14, приводит в движение рычаги 13, которые раздвигаются и выходят из корпуса 9 через пазы 10. Величина раскрытия рычагов фиксируется датчиком. Выдвигающиеся рычаги своими концами проникают в слой талого грунта и останавливаются при достижении мерзлой толщи из-за большой его прочности. Итогом испытаний является определение коэффициентов оттаивания и сжимаемости.

Первые полевые испытания термопрессиометром были проведены сотрудниками кафедры оснований и фундаментов Уральского политехнического института им. С.М. Кирова в 1972–1975 гг. на площадках инженерно-геологических изысканий под Жиренченский ГОК в Читинской области, а также в г. Новый Надым. Испытания, выполненные параллельно с горячим штампом, показали некоторые расхождения полученных результатов. Анализ результатов испытаний указал на влияние формы и размеров цилиндра оттаившего грунта скважины. Ошибка достигает 30–40% за счет недоучета влияния переходного от талого к мерзлому слоя грунта [14].

Е.В. Лебедев и В.В. Лушников [6] в 1980 г. предложили термопрессиометр (рис. 5) с возможностью эллипсоидной зоны оттаивания грунта не только по боковой поверхности, но и в нижней его части и измерением талой зоны ниже забоя скважины вдоль ее оси. На рис. 5 показана конструкция и размеры зоны оттаивания в различные периоды времени.

Термопрессиометр содержит корпус 1 с эластичной оболочкой 2, верхним 3 и нижним 4 фланцами. Внутри корпуса размещены нагреватели 5, датчики 6 линейных перемещений и датчик 7 температуры. Верхний фланец 3 имеет штуцер 8, на котором крепится шланг 9. Нагреватели 5 и датчики 6 и 7 соединены с наземными устройствами источником тока, измерителем перемещений и температуры соединительными проводами, размещенными внутри шланга 9. Корпус 1 снабжен трубой 10, через которую пропущен щуп 11 с наконечником 12 из теплоизоляционного материала. На верхнюю часть щупа 11 нанесена шкала 13. Положение границы зоны оттаивания в различные моменты времени t_1 , t_2 и t_3 показаны, соответственно, как 14, 15 и 16.

Испытания проводятся следующим образом. Производят бурение скважины и установку термопрессиометра. В эластичную оболочку 2 через шланг 9 подают сжатый воздух, а нагреватели 5 подключают к источнику питания. При этом нагреватели обеспечивают одновременное оттаивание грунта вокруг стенок и забоя скважины с возможностью получения талых зон массива грунта в форме эллипсоида. Затем измеряют радиальные перемещения талых зон массива грунта диаметром D_1 , D_2 , D_3 и т.д., находящихся под давлением эластичной оболочки 5 и одновременно фиксируют глубину погружения наконечника 12 (h_1 , h_2 , h_3 и т.д.) в оттаившем слое грунта ниже забоя скважины посредством шкалы 13 щупа. После испытания термозонд извлекают из скважины и производят дополнительные измерения диаметра талого массива грунта вокруг скважины горизонтальным щупом. По конечному значению диаметра D_k талого массива грунта и глубины оттаивания h_k определяют коэффициент $K = D_k/h_k$, который вводят к ранее полученным значениям глубины h_1 , h_2 , $h_3 \dots h_k$ для определения значений зон талого массива грунта D_1 , D_2 , $D_3 \dots D_k$, соответствующих заданному времени испытания.

Лопастные прессиометры

Третий тип прессиометра — лопастной термопрессиометр (рис. 6) был разработан Л.С. Амаряном в институте ПНИИС Госстроя СССР [1].

Испытания лопастным прессиометром позволяют также определить деформационные свойства мерзлого и оттаивающего грунта непосредственно в массиве. В исследованиях А.В. Васильева с соавторами [2] были выполнены испытания в скважине диаметром 325 мм на глубинах до 12 м. Опыты проводились путем вдавливания в стенки скважины двух жестких лопастей площадью 600 см². На первом этапе к стенкам скважины прикладывалось горизонтальное напряжение, равное боковому давлению от веса грунта на глубине испытания и включалось нагревающее устройство. Нагружение выполнялось до стабилизации горизонтальных перемещений. На втором этапе к стенкам скважины прикладывали ступенчато возрастающую нагрузку с определением перемещения на каждой ступени. Глубина оттаивания определялась теплофизическими расчетом. При использовании данных измерений

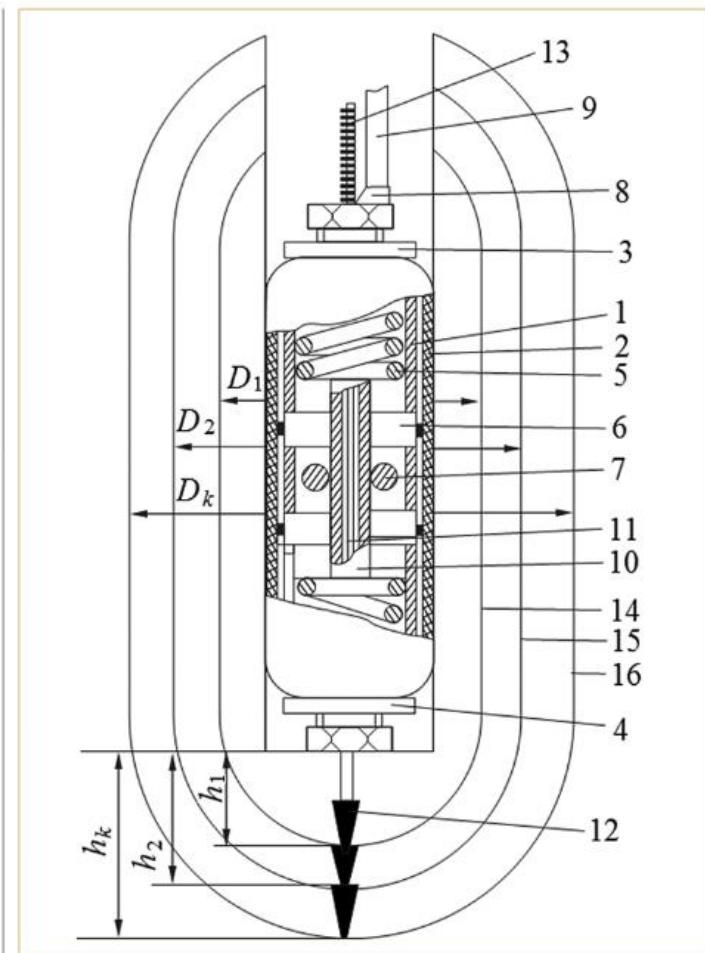


Рис. 5. Конструкция термопрессиометра конструкции Е.В. Лебедева и В.В. Лушникова [6]

Fig. 5. Thermo pressuremeter designed by E.V. Lebedev and V.V. Lushnikov [6]

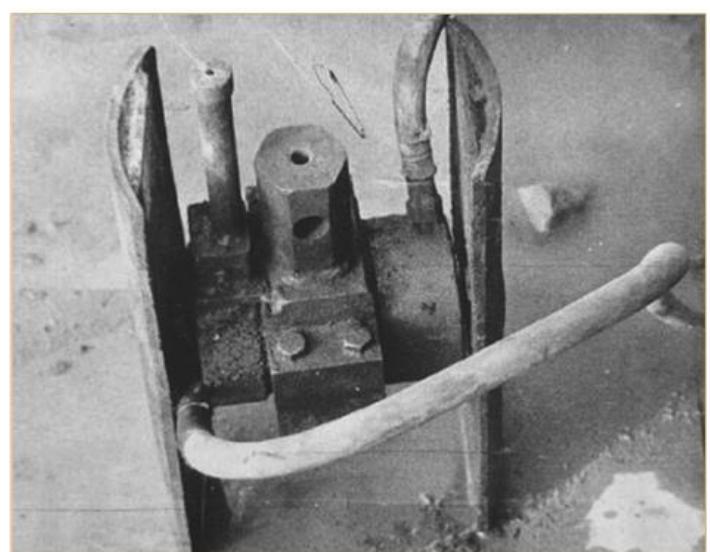


Рис. 6. Лопастной прессиометр ЛПГ-42 конструкции Л.С. Амаряна [17]

Fig. 6. Vane pressuremeter LPG-42 designed by L.S. Amaryan [17]

определялись коэффициенты оттаивания, сжимаемости и модуль деформации.

Лопастные прессиометры обычных конструкций (отечественные модификации ЛПМ 14-22) воздействуют на грунты горизонтальной нагрузкой, которая передается плоскими вертикальными стальными пластинами-штампами. Значительное достоинство таких приборов заключается в том, что штампы срезают стенки лидерной скважины и испытываемый грунт имеет минимальные нарушения. Но, к сожалению, для испытаний крупнообломочных грунтов такие устройства совершенно неприменимы.

Менее известны прессиометры с секторным приложением нагрузки. Они воздействуют на стенки скважины горизонтальной нагрузкой, передаваемой, как правило, двумя стальными цилиндрически изогнутыми плитами (штампами), каждая из которых охватывает сектор от 45 до 90°. Фактически эти приборы являются разновидностью обычных лопастных прессиометров, в большей степени учитывающие условия работы прибора в скважине. Плиты располагаются на диаметрально противоположных сторонах скважины. Еще менее известен другой тип такого прибора, который имеет только один выдвижной штамп, а на противоположной его стороне имеется секторный выступ точно такой же формы, как выдвижной штамп. Нагружение стенок скважины от этого не меняется, т.к. оба сектора давят на стенки с одинаковой силой, но конструкция несколько упрощается [17].

В статье В.Ю. Ульянова [17] описан опыт работы автора с подобным прессиометром в Монголии и в районе г. Магадана в конце 1980-х гг. Общий вид конструкции лопастного прессиометра показан на рис. 6. Как отмечает автор, в целом первые опыты в скважинах диаметром 168 мм подтвердили выводы, сделанные в отчете института ПНИИС Госстроя СССР по результатам исследований крупнообломочных грунтов в Монголии, о пригодности данного типа приборов для определения деформационных свойств талых грунтов данного типа.

Теоретические основы испытаний на ползучесть и релаксацию в скважине

Рассматриваемая ниже теория была предложена В. Lada-nayi в 1982 г. [23] и позволяет оценить поведение мерзлого грунта при ползучести и релаксации напряжений.

Упругое поведение

Если скважина радиусом r_i , находящаяся в упругой среде, упруго расширяется или сжимается из-за изменения нормального напряжения p_i на величину Δp_i , то результатом является радиальное перемещение стенки скважины, определяемое по формуле [23]:

$$\frac{\Delta r_i}{r_i} = \frac{\Delta p_i}{2G}, \quad (6)$$

где $G = E/2(1 + v)$ — упругий модуль сдвига.

Используя измеренное Δr_i при напряжении Δp_i , модуль сдвига находится из выражения:

$$G = \frac{\Delta p_i}{2 \frac{\Delta r_i}{r_i}}, \quad (7)$$

или через изменение объема скважины ΔV , в случае использования прессиометра Менарда [25]:

$$G = \frac{\Delta p_i}{\frac{\Delta V}{V}}, \quad (8)$$

где V — текущий объем на измеренную длину скважины.

Разрушение

Приведенные выше формулы явно справедливы только до тех пор, пока среда не начнет разрушаться либо в результате радиального растрескивания, либо в результате образования пластической зоны [23]. Можно показать, что в упругой среде радиальное растрескивание начнется, когда тангенциальное напряжение на стенке полости достигнет предела прочности материала на растяжение, что происходит при

$$p_i \geq 2 p_o + |T_s|, \quad (9)$$

где p_o обозначает начальное горизонтальное давление грунта, а $|T_s|$ — абсолютное значение прочности материала на растяжение.

С другой стороны, в кулоновском материале (c, φ), который разрушается при сдвиге, а не при растяжении, легко показать, что пластическая зона будет инициирована, как только будет выполнено условие [23]:

$$p_i \geq \frac{2p_o f + c(f-1)\operatorname{ctg}\varphi}{f+1}, \quad (10)$$

$$\text{где } f = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Ползучесть

Для насыщенного льдом мерзлого грунта или льда полная деформация при заданном времени и постоянном напряжении может быть записана в виде

$$\varepsilon_e = \varepsilon_e^{(i)} + \varepsilon_e^{(c)}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_e^{(i)}$ — мгновенная, не обязательно упругая часть полной деформации, а $\varepsilon_e^{(c)}$ — деформация ползучести, определяемая как [25]:

$$\varepsilon_e^{(c)} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_e}{b} \right)^b \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c} \right)^n t^b, \quad (12)$$

где индекс e обозначает эквивалентное напряжение и деформацию Мизеса; σ_e — модуль ползучести, соответствующий

скорости деформации $\dot{\varepsilon}_c$; t — время; b и n — экспоненты ползучести.

Если уравнение (12) применить к задаче о расширении цилиндрической полости в упругой среде, подверженной начальному изотропному боковому напряжению p_o , то радиальная скорость деформации ползучести при постоянном напряжении $p_i > p_o$ может быть найдена из уравнения [23]:

$$\frac{dr_i}{dt} = r_i F t^{b-1}, \quad (13)$$

где F как функция $(p_i - p_o)$ определяется по формуле

$$F = \frac{M}{2} \left(\frac{p_i - p_o}{\sigma_c} \right)^n \quad (14)$$

и

$$M = 2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{n+1} \left(\frac{\varepsilon_c}{b} \right)^b \left(\frac{2}{n} \right)^n. \quad (15)$$

При испытании на ползучесть со ступенчатым нагружением, если p_i — это напряжение, приложенное в скважине во время стадии k , после меньшего напряжения на предыдущей стадии $(k-1)$, результирующее увеличение радиуса во времени определяется формулой

$$\ln \left(\frac{r_i}{r_{i,k-1}} \right) = 2 F t^b \quad (16)$$

или через объем скважины

$$\ln \left(\frac{V}{V_{k-1}} \right) = 2 F t^b, \quad (17)$$

где $V = \pi r_i^2 L$ — текущий объем полости длиной L .

Окончательно значение σ_c находится по формуле

$$\sigma_c = (p_i - p_o)_N \left(\frac{M}{(2F)_N} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (18)$$

где M — определяется уравнением (15), в то время как $(2F)_N$ обозначает величину $(2F)$ на произвольной точке $(p_i - p_o)_N$, находящейся на прямом участке зависимости $(2F)$ от $(p_i - p_o)$ в логарифмическом масштабе (рис. 7).

Релаксация

Метод основан на теории старения. Одним из простейших способов нахождения из скважинных релаксационных испытаний деформационных и прочностных параметров, зависящих от времени, является рассмотрение того, что существует единственная и непрерывная поверхность в пространстве, связывающая напряжение с деформацией и временем. Это предположение известно как основа простейшего типа старения (упрочнение во времени) или теория ползучести. Ю.Н. Работнов в работе [16] в 1966 г. полагал, что предсказания кри-

вой релаксации, основанные на теории старения, зачастую некорректны, но не настолько, чтобы серьезно расходиться с практикой.

В релаксационных испытаниях в скважине теория старения может быть использована двумя различными способами. В первом случае испытание на релаксацию скважины со ступенчатой деформацией используется для генерации серии зависящих от времени кривых «давление—расширение», из которых зависящие от времени модули и прочностные параметры могут быть выведены с помощью обычного метода интерпретации прессиометрических кривых (например, [27]). Второй способ заключается в использовании наблюдаемых скважинных релаксационных кривых для нахождения численных значений некоторых основных параметров ползучести грунта. В теории старения предполагается, что ползучесть и релаксация тесно связаны, так что кривая релаксации — это не что иное, как кривая ползучести при непрерывно уменьшающемся напряжении, приводящем к постоянному значению деформации. Другими словами, согласно этому предположению, любое определяющее уравнение ползучести может быть преобразовано непосредственно в уравнение релаксации, сделав деформацию ползучести постоянной и равной приложенной начальной деформации. В этой теории не принимается во внимание тот факт, что приложенная деформация может быть частично упругой и что материал может иметь различное поведение при нагрузке и разгрузке. Тем не менее, несмотря на эти недостатки, теория может быть полезным инструментом для обобщения результатов релаксационных испытаний. Например, в литературе по механике немерзлых грунтов этот метод использовался с успехом авторами W.A. Lacerda, W.N. Houston [20] для описания результатов релаксационных испытаний, проведенных на трех типах незамерзших грунтов в трехосном приборе. В 1978 г. B. Ladanyi, R. Saint-Pierre [27] показали эффективность использования релаксационных испытаний насыщенных льдом мерзлых грунтов, вследствие его простоты и надежности в использовании на практике.

Согласно теории старения, процесс ползучести может быть выражен семейством изокривых [16] вида

$$\phi(\varepsilon) = \sigma \psi(t), \quad (19)$$

где $\phi(\varepsilon)$ — функция деформации; σ — напряжение; $\psi(t)$ — функция времени. Для включения мгновенного отклика необходимо, чтобы $\psi(0) = 1$.

Релаксация напряжения оценивается уравнением

$$\sigma = \phi(\varepsilon) / \psi(t). \quad (20)$$

Однако, если необходимо сохранить ту же форму функции времени, как это было отражено в уравнении (12), то условие $\psi(0) = 1$ не может быть удовлетворено и должно быть заменено на $\psi(t') = const$, где t' — это очень короткий интервал времени, в течение которого поведение материала принима-

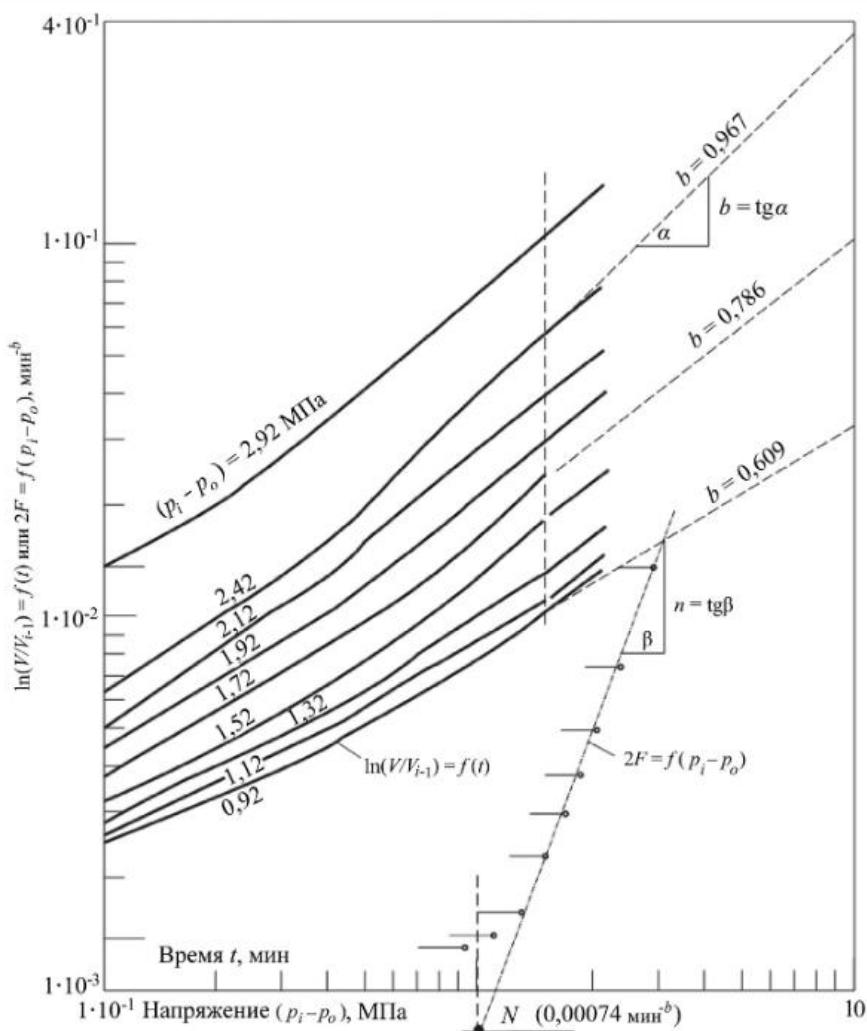


Рис. 7. К определению параметров ползучести из результатов испытания прессиометром при ступенчатом нагружении с 15 мин на ступень [23]

Fig. 7. To determine of creep parameters from the results of the pressuremeter test under step loading with 15 min per step [23]

ется нелинейно упругим. Из этого предположения следует, что в любой момент времени полная деформация равна сумме псевдоупругой деформации, соответствующей t' , и деформации ползучести, соответствующей t , где t — фактическое время. Приняв аналогичную меру деформации, как в работе [25], можно затем получить для расширяющейся цилиндрической полости [23]:

$$\left[\ln\left(\frac{V}{V_o}\right) \right]^{\frac{1}{n}} = M^{\frac{1}{n}} \frac{(p_i - p_o)}{\sigma_c} (t' + t)^{\frac{b}{n}}. \quad (21)$$

Из последнего уравнения (21) следует, что семейство релаксационных кривых определяется в виде

$$(p_i - p_o) = \sigma_c \left[\frac{\ln(V/V_o)}{M(t' + t)^{\frac{b}{n}}} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (22)$$

Если релаксационные кривые представить в реальном времени t вместо $(t' + t)$ (рис. 8), они будут близки к уравнению (22) только когда $t' \ll t$.

Например, если взять $t' = 0,1$ мин, то окажется, что в конце любого 15-минутного интервала t' составляет менее 0,7% от t , и кривые достаточно точны для определения параметров. Из уравнения (22) видно, что при построении таких релаксационных кривых в виде графика $\lg(p_i - p_o)$ вместо графика $\lg t$ с деформацией $\ln(V/V_o)$ в качестве параметра их наклон в конце интервала дает (см. рис. 8):

$$\frac{b}{n} = -\frac{\Delta \lg(p_i - p_o)}{\Delta \lg t} = \frac{v}{h}. \quad (23)$$

С другой стороны, если при этом на конце интервала, где $t = t_i = \text{const}$, начертить график зависимости $\lg(\ln(V/V_o))$ от $\lg(p_i - p_o)$ (показан наложенным на рис. 8), то наклон линии дает:

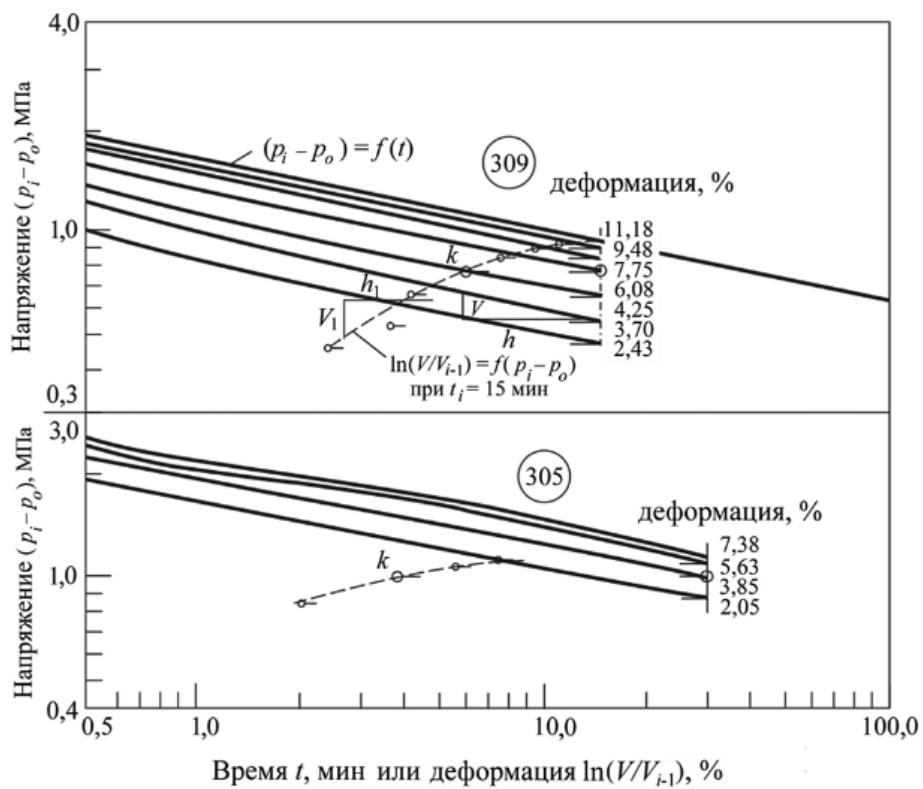


Рис. 8. Релаксационные кривые из испытаний образцов 309 и 305 при ступенчатом нагружении [23]

Fig. 8. Relaxation curves from tests of specimens 309 and 305 under step loading [23]

$$n = -\frac{\Delta \lg [\ln(V/V_o)]}{\Delta \lg (p_i - p_o)} = \frac{h_1}{v_1}, \quad (24)$$

где b и n — известны, значение σ_c (для данной k) может быть определено для любой точки k на линии зависимости $\ln(V/V)$ от $(p_i - p_o)$, используя уравнение (22)

$$\sigma_c = (p_i - p_o)_k \left[\frac{Mt_l^b}{\ln(V/V_o)_k} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (25)$$

В качестве дополнительной характеристики, когда уравнение (22) применяется к двум последовательным точкам релаксационной кривой с координатами (t_1, p_{it1}) и (t_2, p_{it2}) , это позволяет вычислить значение бокового напряжения грунта из уравнения

$$p_o = \frac{(t'+t_2)^{\frac{b}{n}} p_{it2} - (t'+t_1)^{\frac{b}{n}} p_{it1}}{(t'+t_2)^{\frac{b}{n}} - (t'+t_1)^{\frac{b}{n}}} \approx \frac{(t_2/t_1)^{\frac{b}{n}} p_{it2} - p_{it1}}{(t_2/t_1)^{\frac{b}{n}} - 1}. \quad (26)$$

Последняя формула явно справедлива только для нелинейного вязкого поведения без разрушения. Более того, поскольку определение истинного значения b/n требует знания p , расчет фактически является итеративным.

Метод, основанный на теории течения

По сравнению с предыдущим релаксационным решением, решения, основанные на теории течения более правильно

предполагают, что в любой момент релаксационного испытания полная деформация всегда является суммой деформации ползучести и упругой деформации, причем первая возрастает, а вторая уменьшается, так что их сумма остается постоянной.

Теория испытания на скважинную релаксацию в толстостенном цилиндре, представляющий собой линейно-упругий и нелинейно-вязкий материал, была разработана В. Ladanayi [22], основываясь на скважинных релаксационных испытаниях в массиве льда. Анализ позволил вывести параметры ползучести льда из испытаний с использованием модифицированной версии «Метод эталонного напряжения», известный в литературе по ползучести металлов.

Теория справедлива для любого материала, который обладает линейно-упругим мгновенным откликом на нагрузку с последующим нелинейным максвелловским типом ползучести, а также линейно-упругим изменением во время разгрузки, независимо от гидростатического давления. Опыт показывает, что поведение пресноводного льда при температурах ниже -5°C может соответствовать этой категории, и это, вероятно, также справедливо для насыщенных льдом мерзлых грунтов при низких температурах.

В. Ladanayi [23] отметил, что, если испытания выполняются не в полевых условиях, а скорее в лабораторных условиях с толстыми цилиндрами замороженного грунта в холодном

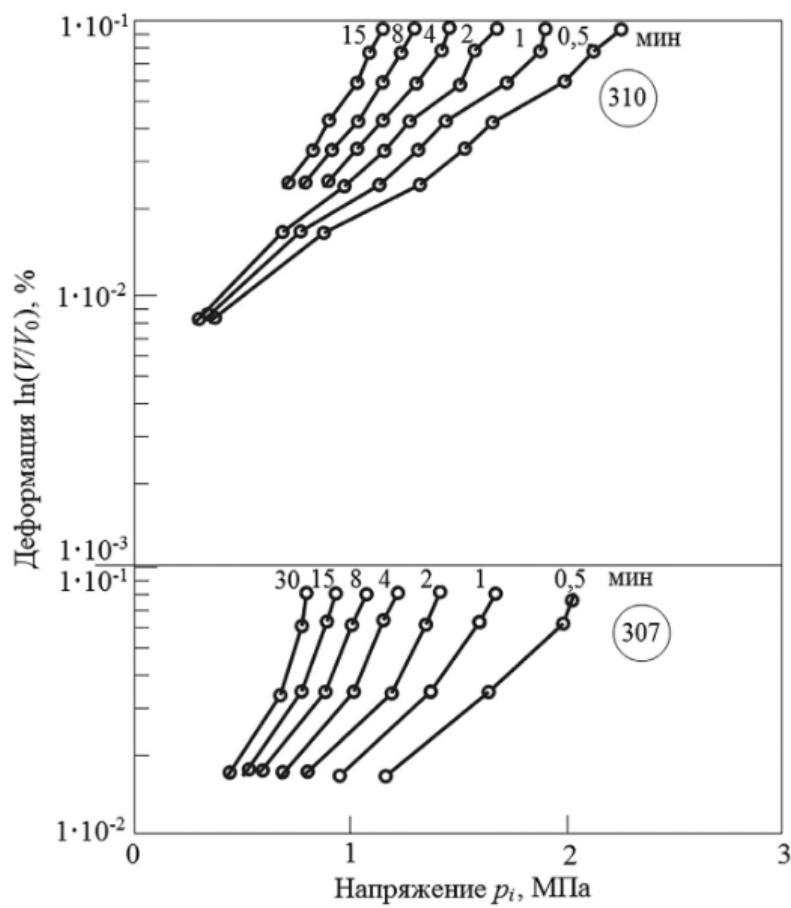


Рис. 9. Результаты релаксационных испытаний образцов 310 и 307 [23]

Fig. 9. Relaxation test results of samples 310 and 307 [23]

помещении все описанные процедуры определения параметров по результатам испытаний на ползучесть и релаксацию остаются в силе при условии, что σ_c в уравнениях (18, 20, 22, 25) заменяется на m , где

$$m = 1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (27)$$

и r_e — внешний радиус цилиндра.

В 1982 г. B. Ladanayi [23] выполнил 11 испытаний на ползучесть в мерзлом грунте, используя прессиометр Менарда диаметром 6 см, с объемом камеры 700 см³ и предельным давлением 10 МПа. Из них три были нагружены ступенями по 15 мин на ступень, один — ступенями по 60 мин на ступень, а остальные семь испытаний были средне- и долгосрочными испытаниями на ползучесть с периодами ползучести до 24 ч и более на одной ступени. Информация о ползучести, полученная из некоторых типичных испытаний прессиометра, которая была проведена на объекте исследований, показана на рис. 9. На рис. 9 логарифмическая мера деформации ползучести $\ln(V/V_{i-1})$, строится относительно времени t в логарифмическом масштабе. На таком графике кривые ползучести на каждом этапе чаще всего становятся линейными, что позволяет

выразить данные в виде общего уравнения ползучести, например, уравнение (11).

Типичные результаты испытаний образцов 310 и 307 показаны на рис. 9.

Релаксационные испытания были проведены с использованием прессиометра с рабочей камерой диаметром 3,8 см и длиной 16,5 см, которую можно расширить, нагнетая контролируемый объем жидкости, чтобы увеличить ее первоначальный диаметр до 15%. Система была рассчитана на давление 70 МПа. В ходе испытаний объем камеры постепенно увеличивался, и после каждого шага падение давления со временем регистрировалось по показаниям датчика. Всего было проведено шесть релаксационных испытаний в полевых условиях. Из них четыре были многоступенчатыми во времени по 15 или 30 мин на каждую ступень, в то время как остальные два были фактически конечными этапами краткосрочных нагрузочных испытаний. Обычно для каждого нового испытания подготавливалась скважина. Глубина испытаний варьировалась от 1,52 до 2,13 м, что соответствует диапазону температур грунта от -1,52 до -2,20°C. Скважина выполнялась специальным шнеком из нержавеющей стали диаметром 3,8 см, образуя чистые отверстия, плотно прилегающие к камере. Пе-

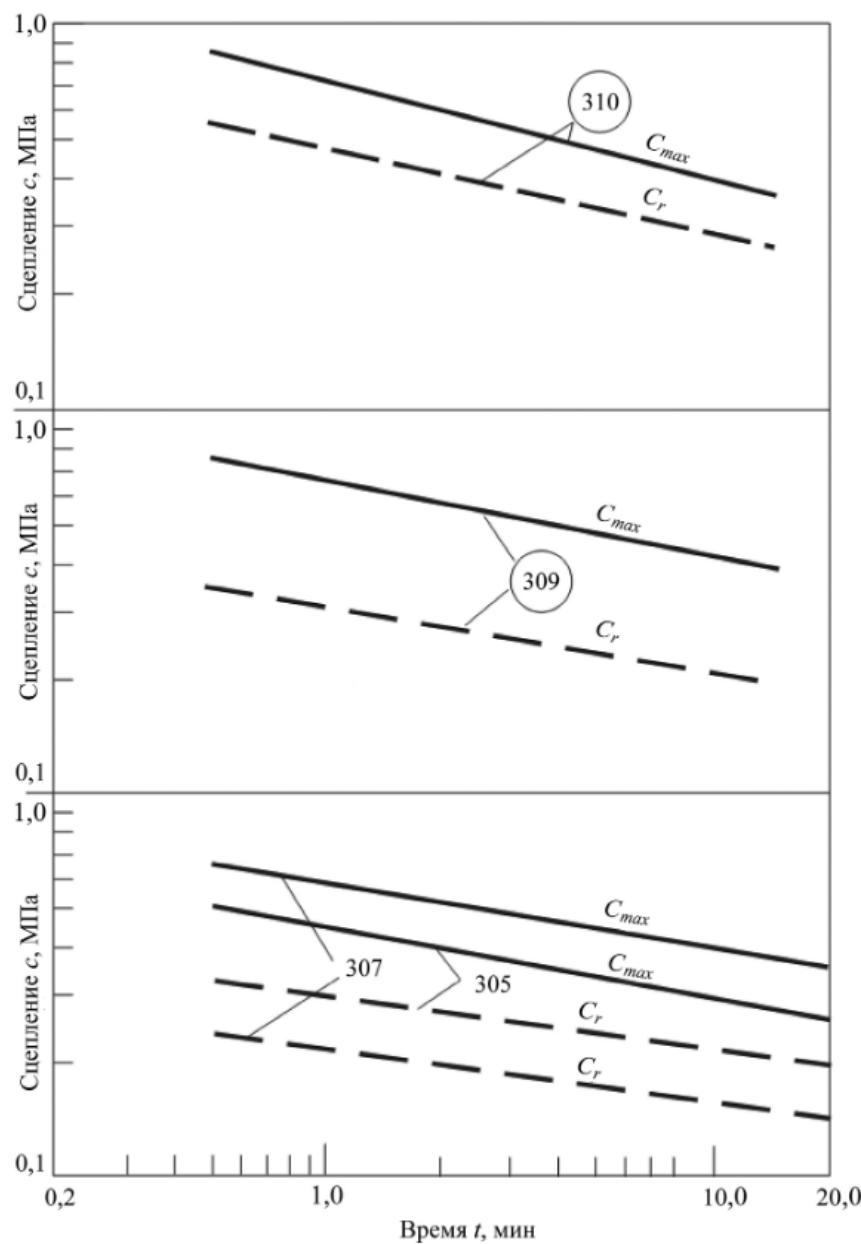


Рис. 10. Уменьшение пиковых и остаточных сил сцепления во времени для образцов 310, 309, 307, 305 [23]

Fig. 10. Decrease in peak and residual cohesive forces over time for samples 310, 309, 307, 305 [23]

перед каждым испытанием система была откалибрована так, чтобы определить коррекцию объема, в то время как коррекцию резиновой оболочки определяли путем расширения за пределами диаметра скважины аналогично случаю с калибровкой манометра. Эти две поправки имели незначительную зависимость от температуры.

Результаты этих испытаний представлены двояким образом. Результаты двух испытаний (см. рис. 9) показаны в виде набора изохронных кривых, связывающих скорректированное напряжение p_i с логарифмической мерой деформации $\ln(V/V_o) \approx \Delta V/V \approx \gamma \approx 2\epsilon_1$, со временем в качестве параметра.

Поскольку, согласно теории старения, каждая из этих изохронных кривых может рассматриваться как отдельная кривая давления расширения, то эти графики позволяют определить изменение со временем пиковой и остаточной прочности сцепления грунта. Их можно определить из прямолинейных участков каждой изохронной кривой, поскольку из любых двух последовательных точек $i, i+1$ мобилизованное сцепление (рис. 10) определяется уравнением

$$c_{i,i+1} = \frac{\Delta p_{i,i+1}}{\Delta \ln(\Delta V/V)_{i,i+1}}. \quad (28)$$

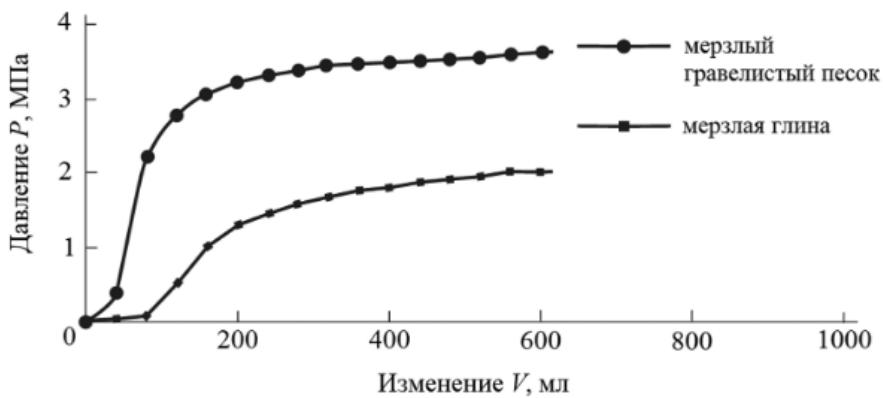


Рис. 11. Прессиометрические кривые [31]

Fig. 11. Pressuremetric test curves [31]

Другой способ представления тех же данных заключается в построении графика зависимости напряжения от времени с деформацией в качестве параметра (см. рис. 8). В объеме теории старения эти графики могут служить основой для определения параметров ползучести, используя метод, предложенный B. Ladanayi [28] (см. уравнения (23–25)). На рис. 8 показано, что кривые релаксации удивительно близки к прямым и параллельны друг другу, что позволило определить достоверные значения соотношений b/n (см. формулу (23)). Прямолинейная форма релаксационных кривых в логарифмическом масштабе, по-видимому, продолжается гораздо более длительное время, вероятно, превышающее 15 ч. К сожалению, как и в случае с испытаниями на давление, замерзание воды в скважинах не позволило провести испытания в течение ночи.

Результаты выполненных исследований [23, 24, 26] показывают, что при очень низких напряжениях степенной закон не всегда может быть наилучшим приближением для кривых «деформации-времени». Установлено также, что параметры ползучести в степенном законе могут изменяться в зависимости от уровня напряжений, что следует учитывать при использовании таких данных в расчетных целях.

Весьма примечательным преимуществом релаксационных испытаний по отношению к испытаниям на ползучесть является то, что в первом случае длительной стадии релаксации может предшествовать любое количество более коротких стадий, что позволяет из одного испытания определить значения n и σ_c , а также наблюдать на последнем этапе изменение параметра b во времени на любом желаемом временном интервале. При испытаниях на ползучесть это явно невозможно из-за ограничения общего объема камеры.

Сравнение параметров ползучести, полученных в результате испытаний на ползучесть и релаксацию, соответственно, показали хорошие результаты. Тем не менее однозначный ответ относительно обоснованности и ценности таких испытаний в скважине может быть получен только в том случае, если

они проводятся в хорошо контролируемых лабораторных условиях в толстых цилиндрах мерзлого грунта.

В исследованиях W.B. Yu [31] авторы использовали многокамерный прессиометр (см. рис. 3), который был приобретен в Канаде, чтобы проверить зависимость между давлением в грунтовой толще и перемещением границы криолитозоны на Цинхай-Тибетском плато. В данной работе представлена методика анализа результатов испытаний и формула, показывающая взаимосвязь между механическими параметрами прессиометра, такими как модуль деформации E , модуль сдвига G , критическая пластическая нагрузка P_p , а также содержание воды W и температура грунта T . Подвиды испытанных грунтов включали пески (с высоким содержанием гравия, крупнозернистые и мелкозернистые фракции) и глину (рис. 11). Температура грунта на полигонах изменялась приблизительно от -0,15 до -3,50°C, а содержание воды от 17,8% до 65,2%.

Исследования, выполненные авторами, показали, что механические свойства глины в мерзлом состоянии в диапазоне температур грунта от -0,15 до -3,50°C и содержании воды от 17,8% до 65,2% можно описать двумя уравнениями:

$$P_I = 0,66 + 0,02W + 0,38T; G = 80,71 + 0,8W + 38,47T, \quad (29)$$

и гравелистого песка в мерзлом состоянии:

$$P_I = 0,79 + 0,02W + 0,10T; G = 132,73 + 2,99W + 25,51T, \quad (30)$$

где T — температура грунта, °C; W — содержание воды, %; P_I и G , МПа; полученные в результате кратковременных прессиометрических испытаний, приблизительно линейны по отношению к основным влияющим факторам (температура грунта, содержание воды). Значения полученных параметров увеличиваются при снижении температуры грунта и увеличении содержания воды.

На основе данных испытаний прессиометром в условиях распространения многолетнемерзлых толщ авторы публикации [32] под руководством H. Zhang получили зависимости между напряжением и деформацией для мерзлых грунтов без каких-либо предварительных предположений относительно определяющих свойств грунта с помощью метода интерпретации, разработанного B. Ladanayi [23]. Кривые «напряжение-деформация» показывают характер деформационного упрочнения без конечного пика прочности, который может быть описан гиперболической моделью. Необходимо отметить, что два важных параметра — предельная прочность на сдвиг и начальный модуль сдвига — выводятся из представленной модели в виде линейной зависимости. Прочность на сдвиг зависит от температуры на разных уровнях содержания воды: она линейно возрастает с понижением температуры; скорость увеличения меньше, когда содержание воды выше. Зависимость прочности на сдвиг от содержания воды может быть описана экспоненциальной формой. Как правило, прочность, найденная при испытаниях прессиометром, больше, чем в лабораторных испытаниях. Кривая прессиометрических испытаний более приближена к трехосному испытанию, чем к условиям одноосного сжатия. Однако упомянутое в статье трехосное испытание было проведено только при всестороннем давлении 0,5 МПа, и поскольку всестороннее давление в некоторой степени влияет на результаты трехосного испытания, его влияние недооценено. На более ранней стадии нагружения грунта, при небольшом давлении на мерзлый грунт, его можно рассматривать как упругий материал, для которого тангенциальное напряжение уменьшается с тем же приращением, что и радиальное. Однако, когда радиальное напряжение достигает определенного значения, тангенциальное напряжение постепенно увеличивается и даже становится сжимающим напряжением. Поскольку меха-

ническое поведение мерзлого грунта также зависит от времени, то кратковременные испытания, рассмотренные в данной работе, могут быть применены только для исследования общего характера высокотемпературных толщ криолитозоны, в связи с чем целесообразно проведение длительных прессиометрических испытаний.

Заключение

1. Авторами показано, что измерение бокового давления и изменение объема рабочей камеры прессиометра может быть использовано для исследования механических свойств мерзлых грунтов, что предлагается для широкого внедрения при проведении инженерно-геологических изысканий в районах распространения многолетнемерзлых толщ.

2. В СССР и РФ было предложено несколько конструкций прессиометров для испытаний мерзлых грунтов с оттаиванием, которые могут быть взяты за основу при дальнейшей их модификации и серийном выпуске.

3. Прессиометр является удобным оборудованием для исследования свойств грунтов в условиях криолитозоны, но методы испытаний и интерпретации, разработанные в период с 1970 по 1990-е гг., не отражают изменений свойств при оттаивании, поэтому необходимо дальнейшее усовершенствование не только испытательного оборудования, но также, что наиболее важно, теоретических основ методов интерпретации, которые должны учитывать фактическое поведение мерзлого грунта в полевых условиях.

4. Параметры деформируемости, прочности и ползучести мерзлого грунта, полученные в полевых условиях в результате кратковременных испытаний с использованием прессиометра, представляют собой приблизительную линейную зависимость от основных влияющих факторов, таких как температура грунта и содержание воды. 

Список литературы

- Амарян Л.С., 1986. Лопастная прессиометрия и ее применимость в инженерной геологии. В сб. научных трудов Технология и техника полевых испытаний грунтов. Изд-во ПНИИИС Госстроя СССР, Москва, с. 14–20.
- Васильев А.В., Кальбергенов Г.Г., 1986. Лабораторные и полевые нестандартные методы определения деформационных свойств оттаивающих грунтов. Инженерно-геологические изыскания в области вечной мерзлоты, Тезисы докладов научно-практической конференции, Благовещенск, 1986, с. 97–99.
- Дерябин Г.П., Маренинов И.А., Дубиков Г.И., Белов В.С., Моисей О.П., 1988. Способ испытания оттаивающих грунтов и прессиометр для его осуществления. Авторское свидетельство SU 1446236A1 от 23.12.1988 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
- Дерябин Г.П., Маренинов И.А., Чеботарев В.М., Моисей О.П., 1992. Устройство для испытания оттаивающих грунтов. Авторское свидетельство SU 1726640A1 от 15.04.1992 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
- Лебедев Е.Е., Лушников В.В., 1980. Способ испытания мерзлых грунтов термопрессиометром. Патент СССР на изобретение № 775221 от 30.10.1980.
- Лебедев Е.В., Лушников В.В., Маренинов И.А., 1982. Способ испытания мерзлого грунта и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство SU 933874A1 от 07.06.1982 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
- Лушников В.В., 1991. Развитие прессиометрического метода исследований нескользких грунтов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук, ВНИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева, Ленинград.

8. Лушников В.В., 2014. Развитие в России прессиометрического метода испытаний грунтов. Геотехника, № 5–6, с. 46–61.
9. Малышев М.В., Чумичев Б.Д., 1968. Прессиометр. Патент СССР на изобретение № 286308A1 от 08.08.1968.
10. Маренинов И.А., Вострецов О.К., Леонов М.В., 1992. Способ испытания грунтов в скважине и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство SU 1783420A1 от 23.12.1992 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
11. Маренинов И.А., Дерябин Г.И., Моисей О.П., Пожидаева В.И., Проняева Ю.И., 1990. Способ испытания оттаивающих грунтов прессиометром. Авторское свидетельство SU 1573088A1 от 23.06.1990 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
12. Маренинов И.А., Дерябин Г.И., Чеверев В.Г., Рублев П.И., 1991. Способ испытания оттаивающих грунтов на сжимаемость. Авторское свидетельство SU 1680867A1 от 30.09.1991 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
13. Маренинов И.А., Лушников Е.В., Ямов В.И., 1986. Способ испытания оттаивающих грунтов на сжимаемость. Авторское свидетельство SU 1240826A1 от 30.06.1986 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
14. Маренинов И.А., Орлов В.А., Дерябин Г.И., Пожидаева В.И., 1986. Проблемы полевого метода испытаний оттаивающих грунтов термопрессиометром. Инженерно-геологические изыскания в области вечной мерзлоты, Тезисы докладов научно-практической конференции, Благовещенск, 1986, с. 159–160.
15. Маренинов И.А., Ямов В.И., 1984. Способ испытания мерзлых грунтов при оттаивании в полевых условиях. Авторское свидетельство SU 1079749A1 от 15.03.1984 Государственного Комитета СССР по делам изобретений и открытий.
16. Работнов Ю.П., 1966. Ползучесть элементов конструкций. Наука, Москва.
17. Ульянов В.Ю., 2019. Из опыта первых испытаний талых крупнообломочных грунтов лопастными прессиометрами Л.С. Амаряна. URL: <https://geoinfo.ru/product/ulyanov-vasilij-yurevich/iz-opyta-pervyh-ispytanij-talyh-krupnooblomochnyh-gruntov-lopastnymi-pressiometrami-l-samarjana-40624.shtml> (дата обращения: 10.11.2022).
18. Andersland O.B., Ladanyi B., 2004. An introduction to frozen ground engineering. Chapman and Hall, New York, NY, USA.
19. Fensury II., 1985. Determination of creep parameters of frozen soil using the pressurumeters test. Mastet of Science Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
20. Lacerda W.A., Houston W.N., 1973. Stress relaxation in soils. Proceedings of the 8th International Conference on soil mechanics and foundations engineering, Vol. 1, Moscow, 1973, pp. 221–227.
21. Ladanyi B., 1972. Interpretation of pressuremeter test results in frozen soils. Internal Report No. 401 of the Division of Building Research, <https://doi.org/10.4224/20386700>.
22. Ladanyi B., 1979. Borehole relaxation test as a means for determining the creep properties of ice covers. Proceedings of the 5th on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions Conference, Vol. 1, Trondheim, Norway, 1979, pp. 757–770.
23. Ladanyi B., 1982. Borehole creep and relaxation tests in ice-rich permafrost. Proceedings of the 4th Canadian permafrost Conference, Calgary, Alberta, Canada, 1982, pp. 406–415.
24. Ladanyi B., 1996. Borehole penetration and expansion devices for ice testing. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 156–164, <https://doi.org/10.1139/l96-016>.
25. Ladanyi B., Johnston G.H., 1973. Evaluation of in situ creep properties of frozen soils with pressuremeter. Evaluation of in situ creep properties of frozen soils with pressuremeter. Proceedings of the permafrost Second International Conference, Yakutsk, 1978, pp. 310–318.
26. Ladanyi B., Melouki M., 1993. Determination of creep properties of frozen soils by means of the borehole stress relaxation test. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 170–186, <https://doi.org/10.1139/t93-015>.
27. Ladanyi B., Saint-Pierre R., 1978. Evaluation of creep properties of sea ice by means of a borehole dilatometer. Proceedings of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Symposium on ice problems, Part 1, Lulea, Sweden, 1978, pp. 97–115.
28. Ladanyi B., Barthelemy A., Saint-Pierre R., 1978. In situ determination of creep properties of ice covers by means of borehole creep and relaxation tests. Proceedings of the Workshop on the bearing capacity of ice covers, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1978, pp. 44–64.
29. Menard L., 1957. Mesures in situ des propriétés physiques des sols. Annales des Ponts et Chausées, Vol. 1, No. 3, pp. 357–376.
30. Ostergard F.E., Zubeck H.K., 2013. Practice of testing frozen soils. ASTM Committee D18, pp. 62–75, <https://doi.org/10.1520/STP156820130012>. URL: <https://www.astm.org/STP156820130012.html> (дата обращения: 10.11.2022).
31. Yu W.B., Lai Y.M., Zhu Y.L., Li H.P., Zhang J.M., Zhang X.F., Li H.P., Zhang S.J., 2002. In situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter. Cold Regions Science and Technology, Vol. 34, Issue 3, pp. 179–189, [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00005-8).
32. Zhang H., Zhang J.M., Su K., Liu S.W., 2015. Comparison between pressuremeter test and uni-axial compression test of frozen soil. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), Vol. 45, No. 5, pp. 1479–1484, <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201505202>.

References

1. Amaryan L.S., 1986. Blade pressuremetry and its applicability in engineering geology. In collection of scientific papers Technology and equipment for field soil testing. Publishing house of the Production and Scientific Research Institute of Engineering Research in the Construction of the USSR State Construction Committee, Moscow, pp. 14–20. (in Russian)
2. Vasiliev A.V., Kalbergenov G.G., 1986. Laboratory and field non-standard methods for determining the deformation properties of thawing soils. Engineering-geological surveys in the field of permafrost, Abstracts of reports of the scientific and practical Conference, Blagoveshchensk, 1986, pp. 97–99. (in Russian)
3. Deryabin G.N., Mareninov I.A., Dubikov G.I., Belov V.S., Moses O.N., 1988. Method for testing thawing soils and a pressuremeter for its implementation. Author's Certificate SU 1446236A1 dated December 23, 1988 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
4. Deryabin G.N., Mareninov I.A., Chebotarev V.M., Moses O.N., 1992. Device for testing thawing soils. Author's Certificate SU 1726640A1 dated April 15, 1992 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
5. Lebedev E.V., Lushnikov V.V., 1980. Method for testing frozen soils with a thermopressiometer. The patent of the USSR No. 775221 dated October 30, 1980. (in Russian)
6. Lebedev E.V., Lushnikov V.V., Mareninov I.A., 1982. Method for testing frozen soil and device for its implementation. Author's Certificate SU 933874A1 dated June 07, 1982 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
7. Lushnikov V.V., 1991. Development of the pressureometric method for studying non-rocky soils. Extended abstract of DSc Thesis, Vedeneev All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering, Leningrad. (in Russian)
8. Lushnikov V.V., 2014. Development of the pressuremetric soil testing method in Russia. Geotechnics, No. 5–6, pp. 46–61. (in Russian)
9. Malyshev M.V., Chumichev B.D., 1968. Pressiometer. The patent of the USSR No. 286308A1 dated August 08, 1968. (in Russian)
10. Mareninov I.A., Vostrețov O.K., Leonov M.B., 1992. Способ испытания грунтов в скважине и устройство для его осуществления. Author's Certificate SU 1783420A1 dated December 23, 1992 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
11. Mareninov I.A., Deryabin G.N., Moses O.N., Pozhidaeva V.I., Pronyaeva Yu.I., 1990. Method for testing thawing soils with a pressuremeter. Author's Certificate SU 1573088A1 dated June 23, 1990 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
12. Mareninov I.A., Deryabin G.N., Cheverev V.G., Rublev N.I., 1991. Method for testing thawing soils for compressibility. Author's Certificate SU 1680867A1 dated September 30, 1991 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
13. Mareninov I.A., Lushnikov V.V., Yamov V.I., 1986. Method for testing thawing soils for compressibility. Author's Certificate SU 1240826A1 dated June 30, 1986 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
14. Mareninov I.A., Orlov V.A., Deryabin G.N., Pozhidaeva V.I., 1986. Problems of the field method of testing thawing soils with a thermopressiometer. Engineering-geological surveys in the field of permafrost, Abstracts of reports of the scientific and practical Conference, Blagoveshchensk, 1986, pp. 159–160. (in Russian)
15. Mareninov I.A., Yamov V.I., 1984. Method for testing frozen soils during thawing in field conditions. Author's Certificate SU 1079749A1 dated March 15, 1984 of the USSR State Committee on Inventions and Discoveries. (in Russian)
16. Rabotnov Yu.N., 1966. Creep of structural elements. Nauka, Moscow. (in Russian)
17. Ulyanov V.Yu., 2019. From the experience of the first tests of thawed coarse-clastic soils with blade pressureometers L.S. Amaryan. URL: <https://geoinfo.ru/product/ulyanov-vasilij-yurevich/iz-opyta-pervyh-ispytanij-talyh-krupnooblozhnyh-gruntov-lopastnymi-pressiometrami-l-s-amaryana-40624.shtml> (accessed: 10 November 2022). (in Russian)
18. Andersland O.B., Ladanyi B., 2004. An introduction to frozen ground engineering. Chapman and Hall, New York, NY, USA.
19. Fensury II., 1985. Determination of creep parameters of frozen soil using the pressurometers test. Mastet of Science Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
20. Lacerda W.A., Houston W.N., 1973. Stress relaxation in soils. Proceedings of the 8th International Conference on soil mechanics and foundations engineering, Vol. 1, Moscow, 1973, pp. 221–227.
21. Ladanyi B., 1972. Interpretation of pressuremeter test results in frozen soils. Internal Report No. 401 of the Division of Building Research, <https://doi.org/10.4224/20386700>.
22. Ladanyi B., 1979. Borehole relaxation test as a means for determining the creep properties of ice covers. Proceedings of the 5th on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions Conference, Vol. 1, Trondheim, Norway, 1979, pp. 757–770.
23. Ladanyi B., 1982. Borehole creep and relaxation tests in ice-rich permafrost. Proceedings of the 4th Canadian permafrost Conference, Calgary, Alberta, Canada, 1982, pp. 406–415.

24. Ladanyi B., 1996. Borehole penetration and expansion devices for ice testing. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 156–164, <https://doi.org/10.1139/l96-016>.
25. Ladanyi B., Johnston G.H., 1973. Evaluation of in situ creep properties of frozen soils with pres-suremeter. Proceedings of the permafrost Second International Conference, Yakutsk, 1978, pp. 310–318.
26. Ladanyi B., Melouki M., 1993. Determination of creep properties of frozen soils by means of the borehole stress relaxation test. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 170–186, <https://doi.org/10.1139/t93-015>.
27. Ladanyi B., Saint-Pierre R., 1978. Evaluation of creep properties of sea ice by means of a borehole dilatometer. Proceedings of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Symposium on ice problems, Part 1, Lulea, Sweden, 1978, pp. 97–115.
28. Ladanyi B., Barthelemy A., Saint-Pierre R., 1978. In situ determination of creep properties of ice covers by means of borehole creep and relaxation tests. Proceedings of the Workshop on the bearing capacity of ice covers, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1978, pp. 44–64.
29. Menard L., 1957. Mesures in situ des proprietes physiques des sols. Annales des Ponts et Chaussees, Vol. 1, No. 3, pp. 357–376.
30. Ostergaard F.E., Zubeck H.K., 2013. Practice of testing frozen soils. ASTM Committee D18, pp. 62–75, <https://doi.org/10.1520/STP156820130012>. URL: <https://www.astm.org/stp156820130012.html> (accessed: 10 November 2022).
31. Yu W.B., Lai Y.M., Zhu Y.L., Li H.P., Zhang J.M., Zhang X.F., Li H.P., Zhang S.J., 2002. In situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter. Cold Regions Science and Technology, Vol. 34, Issue 3, pp. 179–189, [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00005-8).
32. Zhang H., Zhang J.M., Su K., Liu S.W., 2015. Comparison between pressuremeter test and uni-axial compression test of frozen soil. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), Vol. 45, No. 5, pp. 1479–1484, <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201505202>.

Информация об авторах

БОЛДЫРЕВ ГЕННАДИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

Директор по научной работе и инновациям ООО «НПП “Геотек”,
д.т.н., г. Пенза, Россия

ИДРИСОВ ИЛЬЯ ХАМИТОВИЧ

Генеральный директор ООО «НПП “Геотек”, к.т.н., г. Пенза,
Россия

Information about the authors

GENNADII G. BOLDYREV

DSc (Technics); Director for Research and Innovation at the Scientific Production Enterprise Geotek LLC; Penza, Russia

ILIY Kh. IDRISOV

PhD (Technics); General Director of the Scientific Production Enterprise Geotek LLC; Penza, Russia



Фото Т.В. Андреевой