

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 2. ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к. т. н., г. Москва, Россия
info@indep-geo.ru

ИДРИСОВ И.Х.

Генеральный директор
ООО НПП «Геотек», г. Москва, Россия

МОСИНА А.С.

Научный сотрудник лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН, заместитель генерального директора ООО «Независимая геотехника», к. г.-м. н., г. Москва, Россия
Mosina.A.S@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В первой части предлагаемого читателям цикла статей были подробно представлены результаты испытаний мерзлых грунтов в резонансной колонке.

Как показывает анализ опубликованных данных, исследование динамических свойств мерзлых грунтов чаще выполняют методом трехосного сжатия. Его преимущество, по сравнению с испытаниями в резонансной колонке, заключается в возможности оценки упруго-вязкопластического деформирования мерзлых грунтов. Испытания низкочастотными высокоамплитудными колебаниями позволяют оценить механическое поведение мерзлого грунта, например при сейсмическом воздействии.

В данной статье приведен литературный обзор результатов испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия с упором на температурные изменения. Результаты обобщения динамических свойств мерзлых грунтов показали, что при низкой отрицательной температуре ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и менее) модуль деформации обычно бывает выше 4000 МПа, при температуре от минус 3 до минус 5 $^{\circ}\text{C}$ он в среднем варьирует от 600 до 3000 МПа, а при температуре выше минус 3 $^{\circ}\text{C}$ он снижается до 715-400 МПа в зависимости от состава, свойств грунта и условий испытания. Коэффициент поглощения мерзлого грунта D колеблется в широком диапазоне – от 0,01 до 0,2 и выше (в зависимости от состава, влажности, температуры грунта и условий проведения испытаний), причем в большинстве работ отмечается его увеличение при росте температуры мерзлого грунта.

В статье также приведены результаты измерений порового давления грунта с температурой минус 0,2 $^{\circ}\text{C}$ в ходе его динамического нагружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетнемерзлые грунты; мерзлый грунт; динамические свойства; лабораторные испытания; динамическое трехосное сжатие; температура; модуль деформации; коэффициент поглощения; поровое давление.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 2. Испытания методом трехосного сжатия // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 3. С. 24–32 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-24-32

DYNAMIC PROPERTIES OF FROZEN SOILS. PART 2. TRIAXIAL COMPRESSION TESTS

MIRNYY A.Yu.

Associate professor at the Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, the head of "Independent Geotechnics" LLC, PhD, Moscow, Russia
info@indep-geo.ru

IDRISOV I.Kh.

Head of "Geotek" LLC, Moscow, Russia

MOSINA A.S.

Researcher at the Laboratory for Studying the Composition and Properties of Soils, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science; the deputy general director of "Independent Geotechnic" LLC, PhD, Moscow, Russia
Mosina.A.S@yandex.ru

ABSTRACT

In the first part of the series of articles, which are offered to the readers of the "GeoInfo" journal, the results of testing frozen soils in a resonant column were presented in detail.

As an analysis of published data shows, studies of the dynamic properties of frozen soils is often carried out using the triaxial compression method. Its advantage, compared to testing in a resonant column, is the possibility of assessing the elastic-viscoplastic deformations of frozen soils. Testing by this method using low-frequency high-amplitude vibrations make it possible to evaluate the mechanical behavior of frozen soils (for example, under seismic influence).

This article provides a literature review of the results of triaxial compression tests of frozen soils with an emphasis on temperature variations. The results of generalization of the dynamic properties of frozen soils show that at low negative temperatures ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ or lower) the deformation modulus is usually more than 4000 MPa, at temperatures from minus $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ to minus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ it varies on average from 600 to 3000 MPa, at temperatures higher than minus $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ it decreases to 715–400 MPa, depending on the composition, properties of the tested soil and on the test conditions. The damping ratios of frozen soils (D) vary in a wide range (from 0.01 to 0.2 and higher), depending on the composition, humidity, temperature of the tested soil and on the test conditions). Most publications note increasing damping ratio values with increasing temperature of the tested frozen soil.

This article also presents the results of measuring the pore pressure of soil, which have a temperature of minus $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, during its dynamic loading.

KEYWORDS:

permafrost soils; frozen soil; dynamic properties; laboratory tests; dynamic triaxial compression; temperature; deformation modulus; damping ratio; pore pressure.

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Idrisov I.H., Mosina A.S. Dinamicheskiye svoystva merzlykh gruntov. Chast' 2. Ispytaniya metodom trekhosnogo szhatiya [Dynamic properties of frozen soils. Part 2. Triaxial compression tests] // GeoInfo. 2024. T. 6. № 3. S. 24–32 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-24-32 (in Rus.).

Введение ►

Испытания мерзлых грунтов методом динамического трехосного сжатия проводятся путем на сплошной цилиндрический образец осевой циклической нагрузки. По результатам экспериментов в основном определяют: начальный модуль сдвига, секущий модуль сдвига, модуль Юнга, коэффициент поглощения и их изменения с увеличением количества циклов нагрузки; в некоторых исследованиях определяют динамическую прочность мерзлого грунта по предельному уровню деформации. Однако, несмотря на единство определяемых параметров, в работах разных исследователей не представлено схожего подхода к методике выполнения испытаний. Основные различия заключаются в способах передачи колебаний на мерзлый об-

разец. Так, колебания могут задаваться путем циклического приложения постоянного значения либо деформации, либо напряжения. Последний вариант наиболее популярен у современных ученых.

Динамические испытания с передачей циклических напряжений реализуются по одноступенчатой (рис. 1, а) и многоступенчатой (рис. 1, б) схемам нагружения.

Одноступенчатая схема подразумевает приложение напряжений с постоянной амплитудой колебаний от начала эксперимента до его завершения. В случае многоступенчатых испытаний амплитуда динамического напряжения увеличивается на каждой ступени на некоторую постоянную величину, при этом в пределах каждой ступени его

значение постоянно и передается на образец некоторое количество раз. В подавляющем большинстве случаев данный метод встречается в работах китайских исследователей.

Еще одним существенным отличием является разный подход к пониманию амплитуды динамических напряжений. Одни исследователи за амплитуду напряжения принимают половину разницы между минимальным и максимальным напряжениями за колебание (рис. 2, а). Другие под амплитудой понимают полную разницу между минимальным и максимальным напряжениями за колебание (от нижнего пика до верхнего пика нагрузки) (рис. 2, б). Кроме этого, не во всех научных трудах указан принцип фиксации амплитуды напряжений. Подобные неоднозначно-

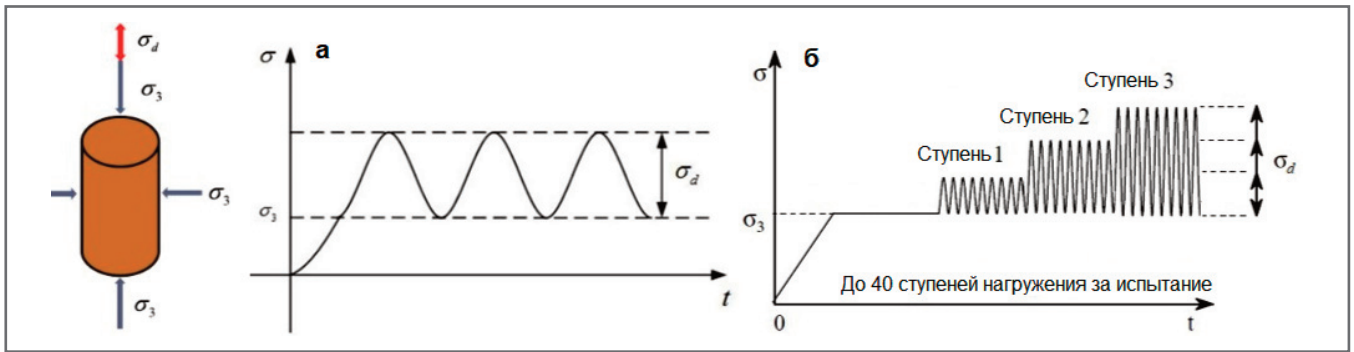


Рис. 1. Одноступенчатая (а) и многоступенчатая (б) схемы испытаний мерзлых грунтов методом динамического трехосного сжатия

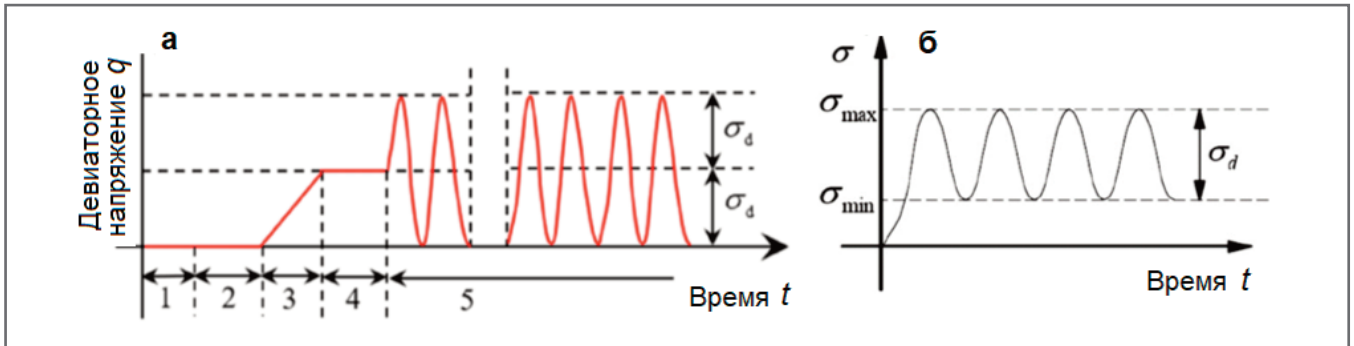


Рис. 2. Два подхода к пониманию амплитуды напряжений при испытании мерзлых грунтов методом динамического трехосного сжатия

сти могут привести к неверной интерпретации результатов. В настоящей статье подход к понятию амплитуды колебаний указан только для тех исследований, для которых он приведен в литературных источниках.

Испытания мерзлых грунтов методом динамического трехосного сжатия ведут либо до достижения заданного количества циклов нагрузки, либо до заданного уровня предельной деформации. В последнем случае диапазон деформаций в литературных источниках варьирует от 5 до 15%. Нередко для достижения заданного уровня деформации при многоступенчатом нагружении требуется передать на образец очень высокий уровень напряжений. Так, в некоторых исследованиях амплитуда деформаций доходила до 6–8 МПа. Частота нагрузки при испытаниях варьирует от 0,7 до 6 Гц.

Обзор литературы ▶

Исследования динамического поведения мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия начались в 70–80-х годах прошлого века. В 1976 году автор работы [1] для изучения сейсмического влияния на свойства мерзлых грунтов провел циклические испытания мерзлой глины в условиях трехосного сжатия при амплитудах деформаций от 3×10^{-3} до $2 \times 10^{-2} \%$ при разных значениях всестороннего давления, темпера-

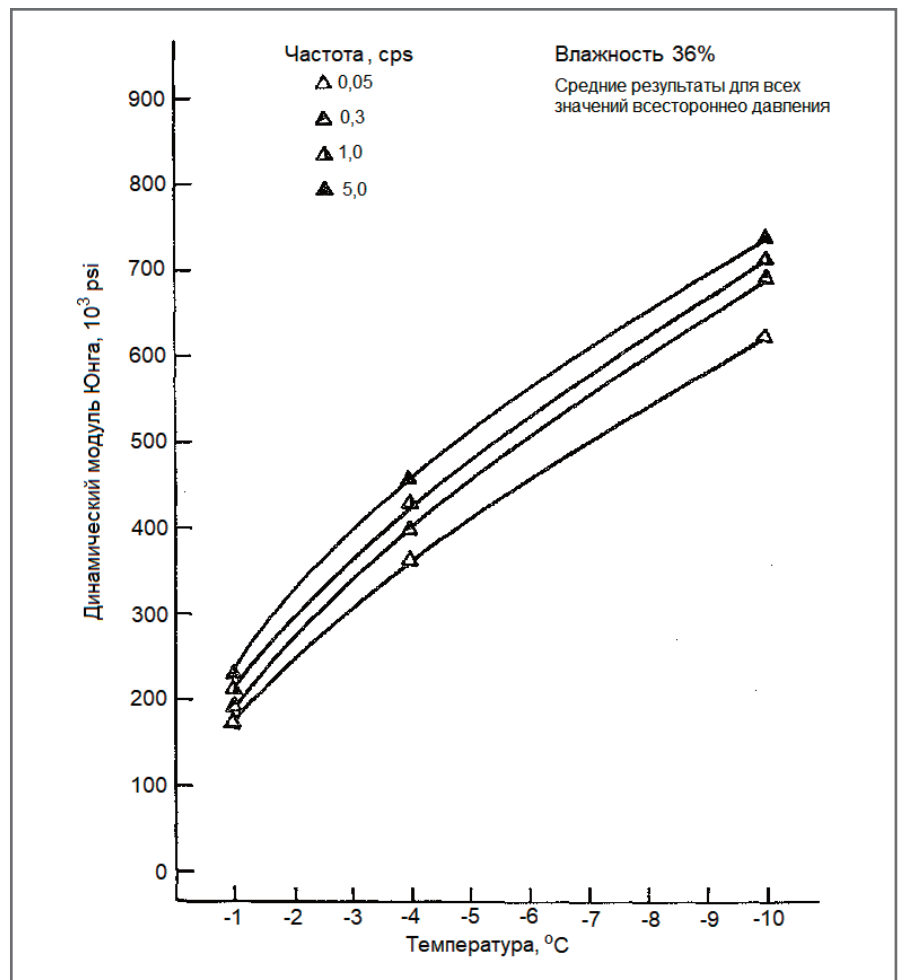


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга мерзлой глины от ее температуры при разной частоте испытаний (0,05–5 Гц), влажности 36% по результатам динамического трехосного сжатия при амплитуде осевой деформации $3,16 \times 10^{-3} \%$ (psi – фунт-сила/дюйм², 1 psi \approx 0,00689 МПа, 1 cps = 1 Гц) [1]

туры и частоты воздействия. Влияние всестороннего давления и степени влажности на модуль Юнга оказалось незначительным, при этом увеличение температуры грунта привело к его уменьшению. Например, при повышении температуры от минус 10 до минус 1 °С модуль Юнга снижался с 4206–4757 до 1310–1480 МПа при амплитуде осевой деформации $3,16 \times 10^{-3} \%$ и частотах 0,05–5 Гц (рис. 3).

В 1979 году группа американских ученых [2] провела серию динамических испытаний мерзлого песка методом трехосного сжатия. Ими была использована схема динамического нагружения с амплитудой осевых деформаций в диапазоне от 3×10^{-3} до $3 \times 10^{-2} \%$, всесторонним давлением 0–1,4 МПа, частотой 0,05–5,0 Гц и температурой от минус 1 до минус 10 °С. Результаты испытаний показали, что динамический модуль Юнга увеличивается с увеличением частоты и всестороннего давления, но уменьшается с увеличением амплитуды деформации и температуры. Например, при росте температуры грунта от минус 10 до минус 1 °С ($\sigma_3 = 0,3$ МПа, амплитуда деформации $1 \times 10^{-2} \%$, частота 1 Гц) модуль Юнга изменялся от 7600 МПа до 4800 МПа соответственно (рис. 4). Коэффициент поглощения мерзлого песка в среднем варьировал от 0,025 при минус 10 °С и частоте 5,0 Гц до 0,25 при температуре минус 1 °С и частоте 0,05 Гц.

В 2009 году китайские исследователи [3] выполнили динамические испытания мерзлой глины. Ими была использована многоступенчатая схема динамического нагружения (12 циклов на каждую ступень) с контролем напряжений. Амплитуда осевых напряжений была принята от минимума до максимума нагрузки (до осевого напряжения 3,9 МПа с частотой воздействия 6 Гц). По результатам испытаний, начальный модуль деформации мерзлой глины снижался с

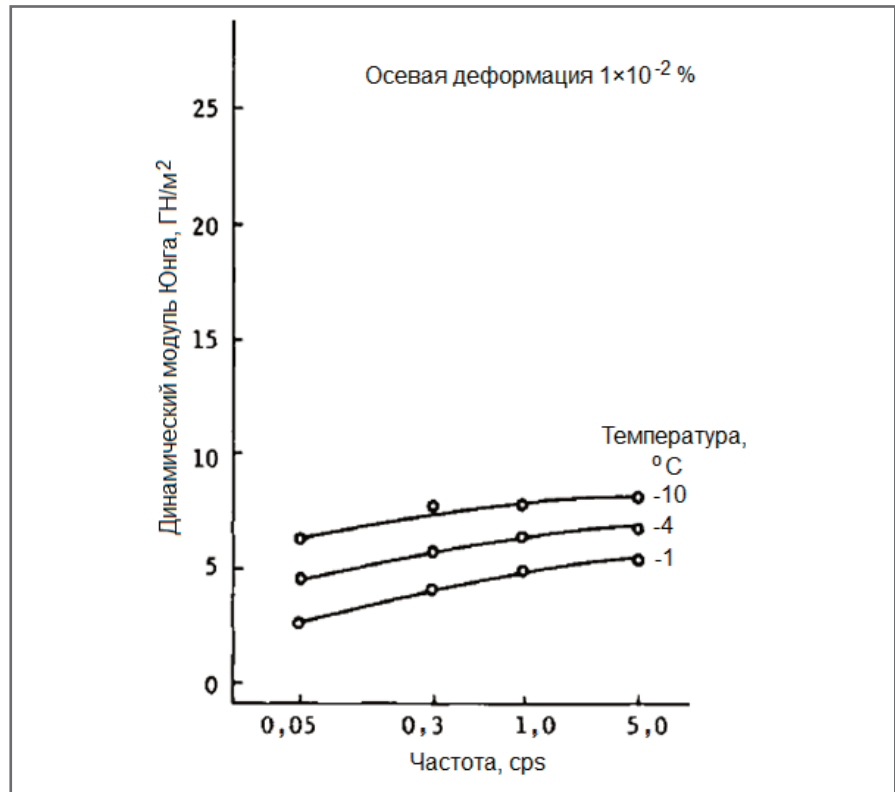


Рис. 4. Модуль Юнга мерзлого песка при разной частоте и температуре по результатам динамического трехосного сжатия с всесторонним давлением 0,3 МПа (1 cps=1 Гц) [2]

увеличением температуры и увеличивался с ростом всестороннего давления. Например, его значение при температуре минус 12 °С составило 1600 МПа, а при минус 2 °С – уже менее 1200 МПа. Однако с ростом температуры грунта в диапазоне от минус 12 до минус 5 °С снижение начального модуля деформации происходило менее интенсивно – от 1600 МПа до 1500 МПа соответственно. Повышение температуры привело к резкому изменению кривой зависимости динамического напряжения от осевой деформации – увеличился уровень последней (рис. 5).

В 2009 году автор работы [4] защитил диссертацию на тему «Влияние замораживания-оттаивания на потенциал разжижения и динамические свойства пы-

леватого грунта из Мейбл-Крик». В данной работе приведены интересные результаты динамических трехосных испытаний высокотемпературных мерзлых грунтов с измерением порового давления. Эксперименты были выполнены при всестороннем давлении 0,1 МПа и частоте воздействия 0,1 Гц с заданной амплитудой деформации. Исследовалось динамическое поведение пылеватого грунта с положительной температурой и температурой минус 0,2 °С. Показатели динамических свойств грунта определялись по формулам:

$$r_u = \Delta u / \sigma'_3;$$

$$G = E/2/(1 + \nu),$$

где r_u – приведенное поровое давление;

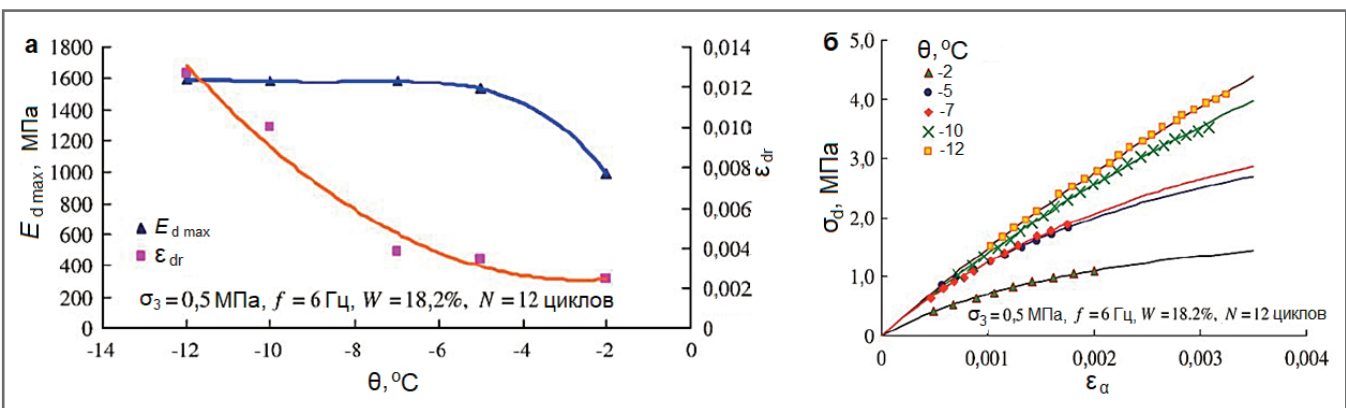


Рис. 5. Результаты испытаний мерзлой глины в условиях динамического трехосного сжатия [3]

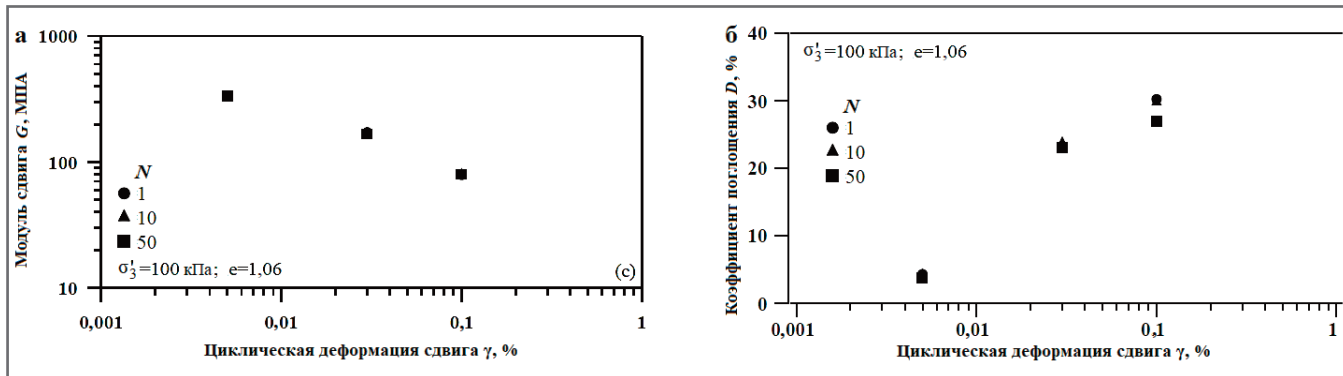


Рис. 6. Модуль сдвига G и коэффициент поглощения D пылеватого грунта в зависимости от уровня деформации сдвига γ и количества циклов нагрузки N при температуре минус $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ по результатам динамического трехосного сжатия [4]

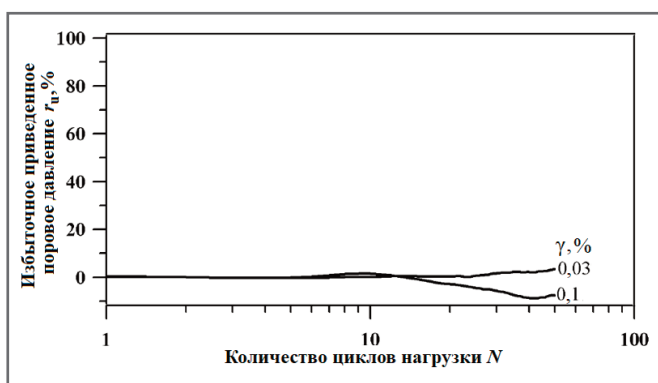


Рис. 7. Изменения избыточного приведенного порового давления r_u с увеличением количества циклов нагрузки N для пылеватого грунта при температуре минус $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ (уровень деформаций приведен на графике) [4]

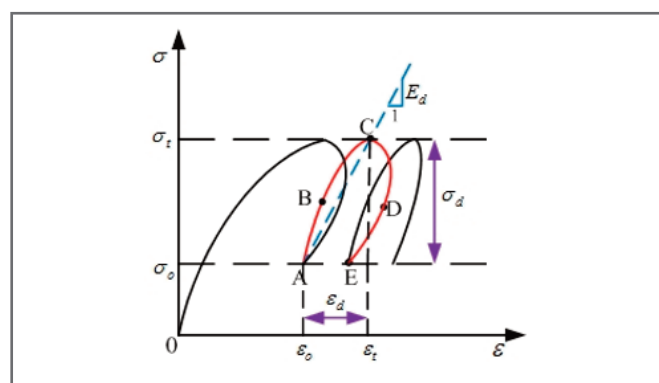


Рис. 8. Определение модуля деформации [5]

Δu – избыточное поровое давление в конце цикла нагрузки; σ_3^1 – начальное эффективное всестороннее давление; $E = \sigma_{d \max} / \epsilon_{\max}$; $\sigma_{d \max}$ – максимальное напряжение (значение половины размаха колебательной волны); ϵ_{\max} – максимальная осевая деформация; γ – деформация сдвига; ν – коэффициент Пуассона.

Результаты показали, что при температуре минус $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ не происходит снижение модуля сдвига с увеличением циклов нагружения. Его начальное значение при $\gamma=0,005\%$ составило около 340 МПа . Коэффициент поглощения при $\gamma=0,005\%$ составил 4% (рис. 6).

По результатам испытаний было обнаружено низкое значение приведенного порового давления у грунта с температурой минус $0,2\text{ }^\circ\text{C}$. Так, его значение при амплитуде деформации сдвига $0,03\%$ с увеличением количества циклов нагрузки практически не изменялось – на всем протяжении эксперимента поровое давление r_u оставалось ниже 4% . А при амплитуде деформации $0,1\%$ спустя 10 циклов нагрузки поровое давление даже начало снижаться в сторону отрицательного значения,

дойдя при этом до минус $7,5\%$ спустя 50 циклов нагрузки. Вероятно, наблюдение эффекта отрицательного порового давления связано с перераспределением незамерзшей воды внутри образца в ходе динамического нагружения (рис. 7) [4].

Авторы работы [5] в 2017 году представили результаты динамических испытаний мерзлого сильнольдистого песка. Ими была использована одноступенчатая схема нагружения с частотой нагрузки $2,4$ и 6 Гц при всестороннем давлении $0,1$ – $0,3\text{ МПа}$. Испытания проводились при трех значениях температуры грунта: $-5, -10, -15\text{ }^\circ\text{C}$. За амплитуду была принята разница между минимумом и максимумом напряжения. Определение модуля деформации схематически приведено на рисунке 8.

По полученным результатам было определено, что начальный модуль деформации мерзлого сильнольдистого песка при температуре минус $5\text{ }^\circ\text{C}$ составляет 2941 МПа , при снижении температуры до минус 10 и минус $15\text{ }^\circ\text{C}$ его значения увеличиваются до 4480 МПа

и 8333 МПа соответственно (при частоте нагрузки 4 Гц , всестороннем давлении $0,2\text{ МПа}$). При увеличении всестороннего давления с $0,1$ до $0,3\text{ МПа}$ начальный модуль деформации вырос с 3870 до 5306 МПа (при температуре грунта минус $10\text{ }^\circ\text{C}$, частоте нагрузки 4 Гц). Увеличение частоты нагрузки с 4 до 6 Гц привело к возрастанию начального модуля деформации с 3600 до 6300 МПа (при температуре грунта минус $10\text{ }^\circ\text{C}$, всестороннем давлении $0,2\text{ МПа}$).

Авторы работы [6] получили динамические параметры мерзлого пылеватого грунта при температуре грунта от минус 1 до минус $15\text{ }^\circ\text{C}$ и всестороннем давлении $0,1$ – $0,4\text{ МПа}$. Была использована многоступенчатая схема нагружения с амплитудой осевой нагрузки, доходившей до 4 – 5 МПа (за амплитуду была принята разница между минимумом и максимумом нагрузки), и частотой нагрузки 2 Гц . Каждая ступень нагрузки прикладывалась 12 раз. Испытание продолжалось до достижения предельной осевой деформации 10% . Результаты испытания

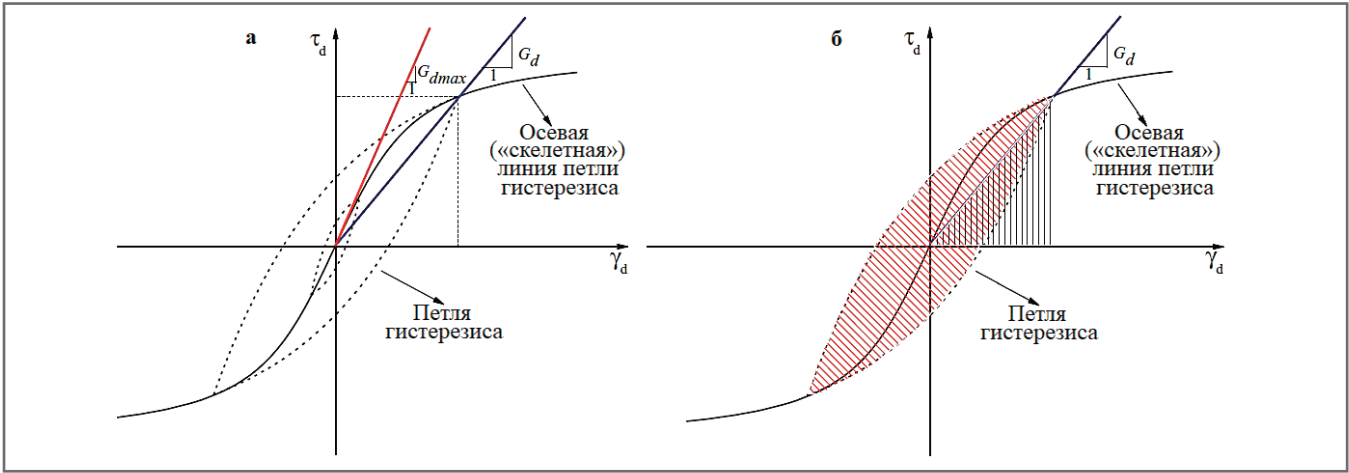


Рис. 9. Определение модуля сдвига мерзлого грунта по результатам динамического трехосного сжатия [6]

интерпретировались по следующим зависимостям (рис. 9):

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \varepsilon_d (1 + \mu); \\ \tau_d &= \sigma_d / 2; \\ \tau_d &= \gamma_d / (a + b \times \gamma_d); \\ G_d &= \tau_d / \gamma_d; \\ G_{d \max} &= G_d |_{\gamma_d \rightarrow 0} = 1/a; \\ \tau_{d \text{ ult}} &= \tau_d |_{\gamma_d \rightarrow +\infty} = 1/b; \\ y_{dr} &= \tau_{d \text{ ult}} / G_{d \max} = a/b; \\ G_d &= G_{d \max} / (1 + y_d / y_{dr}). \end{aligned}$$

По полученным результатам было определено, что динамическая прочность грунта (ступенчатое достижение предела деформации 10%) при повышении температуры с минус 15 до минус 1 °С снизилась почти в 10 раз (рис. 10). Начальный модуль сдвига снизился с 870 до 276 МПа при увеличении температуры с минус 15 до минус 1 °С. Его значение при температуре минус 5 °С составило 294 МПа. Коэффициент поглощения увеличивался с повышением температуры. Так, при

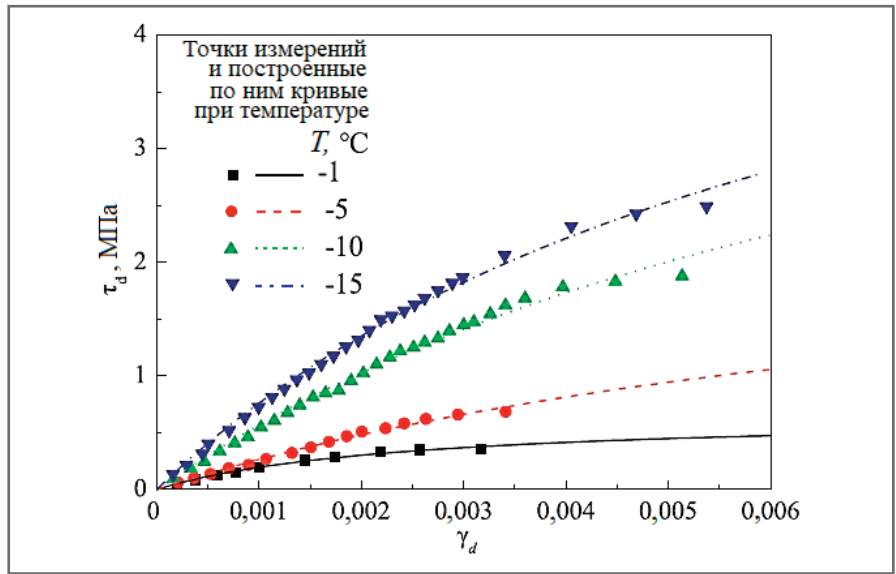


Рис. 10. Фрагменты графиков деформирования мерзлого пылеватого грунта по результатам динамического трехосного сжатия [6]

температуре минус 15 °С его значение составило 0,0169, а при минус 1 °С – 0,0435 (рис. 11).

Авторы работы [7] исследовали динамическое поведение мерзлого грунта при температуре минус 1,5 °С. Экспе-

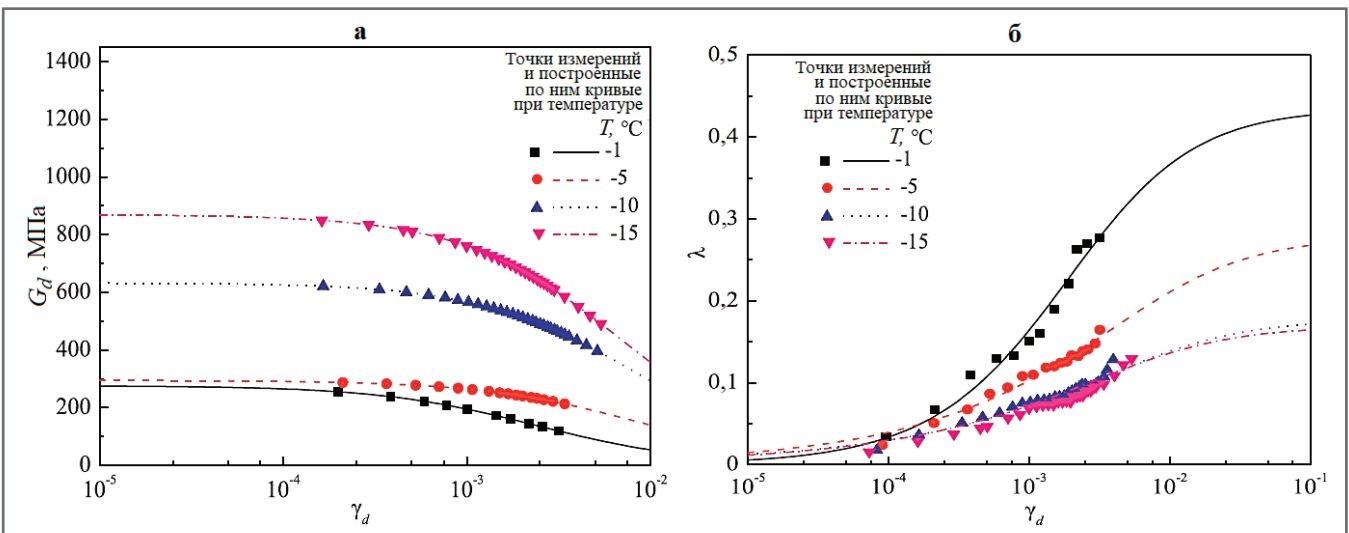


Рис. 11. Модуль сдвига (а) и коэффициент поглощения (б) мерзлого пылеватого грунта при разных температурах по результатам динамического трехосного сжатия [6]

рименты были проведены по одноступенчатой схеме нагружения с амплитудами девиатора напряжений: 25, 40, 42,5 кПа (амплитуда соответствовала разнице между минимумом и максимумом нагрузки), при всестороннем давлении 0,020–0,03 МПа и частоте 6 Гц. Испытания завершали при относительной осевой деформации 5% или спустя 50 тыс. циклов нагрузки. По полученным результатам было определено, что с увеличением амплитуды воздействия модуль деформации падал. Его максимальное значение было получено при амплитуде девиатора напряжений 25 кПа. Спустя 1 тыс. циклов нагрузки он составил 90 МПа, спустя 50 тыс. циклов – 96,1 МПа [7].

В 2022 году авторы работы [8] получили параметры динамических свойств мерзлых грунтов при температурах минус 5 и минус 15 °С (в большинство об-

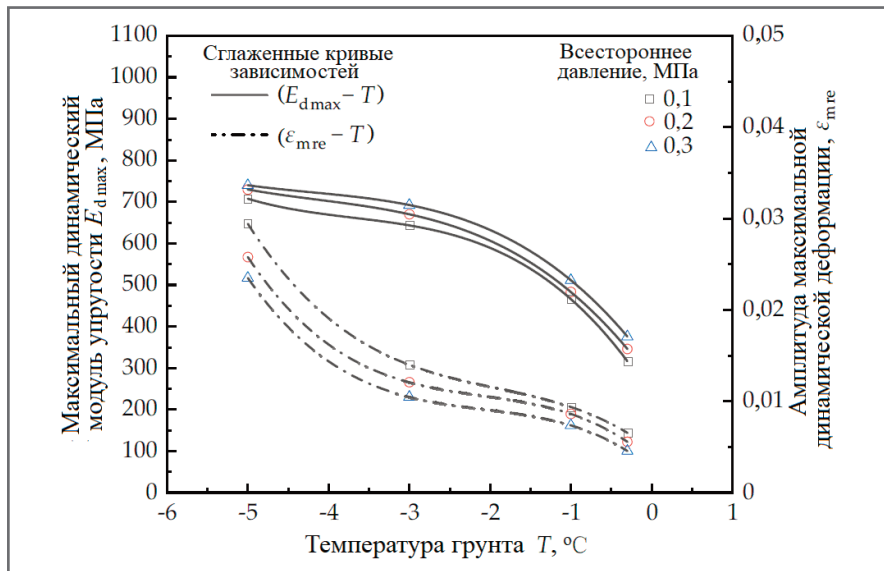


Рис. 12. Зависимость начального модуля деформации от температуры мерзлого грунта и всестороннего давления при влажности грунта 16% и частоте нагрузки 4 Гц по результатам динамического трехосного сжатия [9]

Результаты испытания мерзлой глины методом динамического трехосного сжатия [9]

Таблица 1.

| Влажность грунта w, % | Всестороннее давление σ_3 , МПа | Температура грунта T, °С | Частота нагрузки f, Гц | Начальный модуль деформации $E_{d,max}$, МПа | Коэффициент поглощения λ_{min} |
|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 14 | 0,1 | -3 | 4 | 597,7286 | 0,0533 |
| 14 | 0,2 | -3 | 4 | 616,9031 | 0,0494 |
| 14 | 0,3 | -3 | 4 | 629,3266 | 0,0460 |
| 16 | 0,1 | -3 | 4 | 643,5006 | 0,0503 |
| 16 | 0,2 | -3 | 4 | 670,2413 | 0,0459 |
| 16 | 0,3 | -3 | 4 | 692,5208 | 0,0431 |
| 18 | 0,1 | -3 | 4 | 665,5790 | 0,0480 |
| 18 | 0,2 | -3 | 4 | 689,1799 | 0,0444 |
| 18 | 0,3 | -3 | 4 | 715,3076 | 0,0412 |
| 16 | 0,1 | -1 | 4 | 465,9832 | 0,0546 |
| 16 | 0,2 | -1 | 4 | 483,0918 | 0,0494 |
| 16 | 0,3 | -1 | 4 | 511,5090 | 0,0463 |
| 16 | 0,1 | -5 | 4 | 707,7141 | 0,0429 |
| 16 | 0,2 | -5 | 4 | 729,9270 | 0,0392 |
| 16 | 0,3 | -5 | 4 | 740,1925 | 0,0353 |
| 16 | 0,1 | -3 | 2 | 634,1154 | 0,0619 |
| 16 | 0,2 | -3 | 2 | 661,3757 | 0,0606 |
| 16 | 0,3 | -3 | 2 | 681,1989 | 0,0558 |
| 16 | 0,1 | -3 | 1 | 627,3526 | 0,0667 |
| 16 | 0,2 | -3 | 1 | 651,0417 | 0,0667 |
| 16 | 0,3 | -3 | 1 | 672,0430 | 0,0638 |
| 14 | 0,3 | -3 | 1 | 581,3953 | 0,0667 |
| 14 | 0,3 | -3 | 2 | 602,4096 | 0,0551 |
| 18 | 0,3 | -3 | 1 | 653,5948 | 0,0600 |
| 18 | 0,3 | -3 | 2 | 684,9315 | 0,0545 |
| 16 | 0,1 | -0,3 | 4 | 316,4557 | 0,0619 |
| 16 | 0,2 | -0,3 | 4 | 346,0208 | 0,0538 |
| 16 | 0,3 | -0,3 | 4 | 375,9398 | 0,0490 |

разцов при их формировании была добавлена резина). Результаты интерпретировались по зависимостям, аналогичным представленным в работе [6] и на рисунке 9. Эксперименты выполнялись с многоступенчатым нагружением (каждая ступень, в свою очередь, нагружалась 40 раз) с частотой воздействия 1 Гц и всесторонним давлением 0,4 МПа. Амплитуда девиатора напряжений достигла 0,7 МПа (за амплитуду была принята разница между минимумом и максимумом нагрузки). Испытания велись до достижения предельной деформации 5%.

По полученным результатам было определено, что начальный модуль сдвига «чистой» мерзлой глины при температуре минус 5 °С составил около 200 МПа, при снижении температуры до минус 15 °С его значение увеличилось до 510 МПа. Коэффициент поглощения при температуре минус 5 °С варьировал от 0,18 до 0,175.

Авторы публикации [9] выполнили исследования динамического поведения мерзлой глины при многоступенчатой схеме нагружения (за амплитуду была принята разница между минимумом и максимумом нагрузки) с разными частотами воздействия: 1, 2, 4 Гц. Каждый шаг нагрузки прикладывался в течение 15 циклов, всестороннее давление варьировало от 0,1 до 0,3 МПа. При испытаниях была задана температура мерзлой глины от минус 0,3 до минус 5 °С. Определение модуля деформации проводилось по принципу, отраженному на рисунке 9.

По полученным результатам было определено, что с увеличением всестороннего давления, влажности грунта, частоты нагружения и снижением температуры коэффициент поглощения уменьшается, а начальный модуль деформации увеличивается. При этом наибольшее изменение начального модуля деформации происходит при повышении температуры от минус 3 до минус 0,3 °С. При повышении температуры от минус 5 до минус 3 °С его снижение идет менее интенсивно. Так, при температуре минус 5 °С начальный модуль деформации составил 708–740 МПа, при температуре минус 3 °С – 581–715 МПа, при минус 1 °С – 466–512 МПа, при минус 0,3 °С – 316–376 МПа (рис. 12). Коэффициент поглощения мерзлой глины варьировал от 0,035–0,040 при минус 5 °С до 0,049–0,062 при минус 0,3 °С. Некоторые из результатов испытаний приведены в таблице.

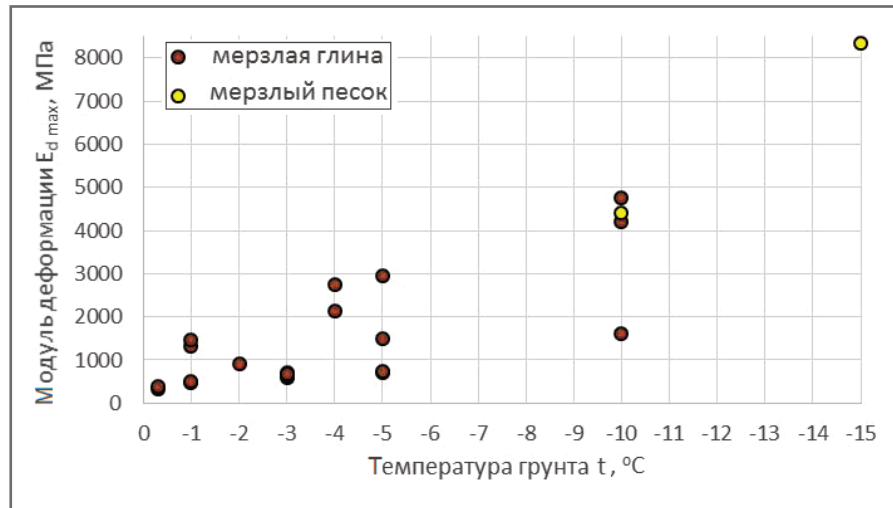


Рис. 13. Обобщенный график зависимости начального модуля деформации мерзлого грунта от его температуры по результатам испытаний в условиях динамического трехосного сжатия

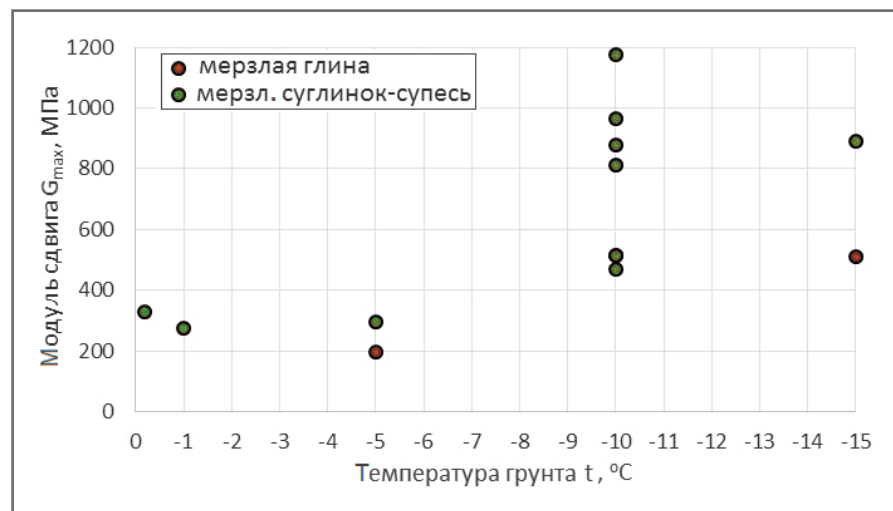


Рис. 14. Обобщенный график зависимости начального модуля сдвига мерзлого грунта от его температуры по результатам испытаний в условиях динамического трехосного сжатия

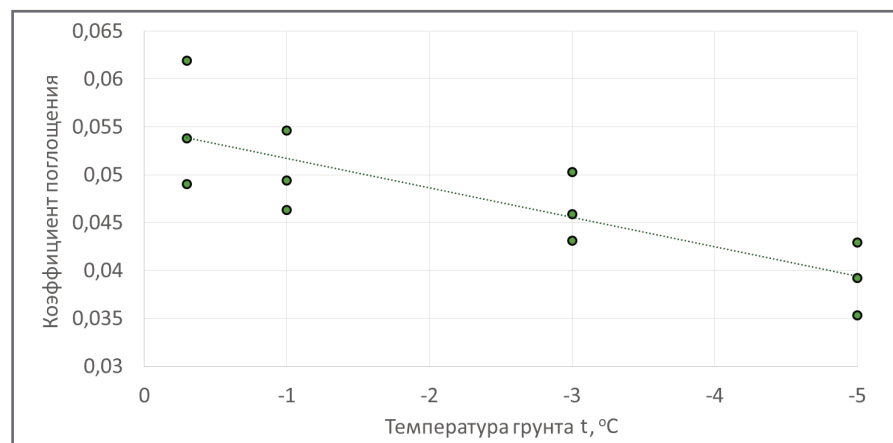


Рис. 15. Температурная зависимость коэффициента поглощения мерзлой глины по результатам испытания методом динамического трехосного сжатия при влажности грунта 16% и частоте нагрузки 4 Гц (при всестороннем давлении 0,1–0,3 МПа)

Обобщение и выводы ►

По результатам количественного обобщения показателей динамических

свойств мерзлых грунтов различными исследователями были получены следующие данные.

При низкой отрицательной температуре ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и менее) модуль деформации мерзлого грунта чаще имеет значение выше 4000 МПа, а модуль сдвига колеблется от 500 до 1100 МПа. При температуре мерзлого грунта от минус 3 до минус $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ модуль деформации варьирует в среднем от 600 до 3000 МПа. Увеличение температуры мерзлого грунта выше минус $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению модуля деформации до 512–715 МПа при минус $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, до менее чем 400 МПа при минус $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и к уменьшению модуля сдвига до 280–350 МПа при температуре ниже минус $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 13, 14). Однако следует понимать, что значение модуля деформации будет зависеть от состава, свойств грунта и условий прове-

дения динамических испытаний.

В проанализированной литературе был найден только один пример изменения порового давления в мерзлых грунтах при их динамических испытаниях с достаточно высокой температурой ($-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) [4]. По результатам, полученным авторами работы [4], величина порового давления оказалась либо незначительной (4% при амплитуде деформации 0,03%), либо отрицательной, но также малой ($-7,5\%$ при амплитуде деформации 0,1%). Отсюда можно предположить, что даже в высокотемпературных мерзлых грунтах поровое давление, по-видимому, не будет оказывать значительного влияния на их динамическое поведение.

Коэффициент поглощения мерзлого грунта колеблется в широких пределах – от 0,01 до 0,2 и выше в зависимости от его состава, влажности, температуры и условий проведения испытаний. При увеличении температуры чаще всего наблюдается увеличение коэффициента поглощения. Так, на рисунке 15 видно, что увеличение температуры от минус 5 до минус $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к росту коэффициента поглощения мерзлой глины от 0,035–0,042 до 0,049–0,062 соответственно (при частоте 4 Гц, всестороннем давлении 0,1–0,3 МПа, влажности 16%). Однако в некоторых работах встречается обратная зависимость – снижение коэффициента поглощения с ростом температуры. **и**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

(REFERENCES) ►

1. Vinson T.S. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions. Final Report of Research Conducted Under Research Grant ENG74-13506 “Shear Moduli and Damping Factors in Frozen Soils” for the Period October 1, 1974 to September 30, 1976. East Lansing, Michigan, USA: Division of Engineering Research, Michigan State University, 1976. Report № MSU-CE-76-4. P. 288.
2. Li J.C., Baladi G., Andersland O. Cyclic triaxial tests on frozen sand // Engineering Geology. 1979. № 13. P. 233–246. DOI:10.1016/0013-7952(79)90035-8.
3. Ling X., Zhu Z., Zhang F. Dynamic elastic modulus for frozen soil from the embankment on Beiluhe Basin along the Qinghai-Tibet Railway // Cold Regions Science and Technology. 2009. № 57 (1). P. 7–12.
4. Yu Zh. Impact of Freeze-Thaw on Liquefaction Potential and Dynamic Properties of Mabel Creek Silt: PhD Thesis. 2009. P. 191.
5. An L.S., Ling X.Z., Geng Y.C. Dynamic and Static Mechanical Properties of Ice-Rich Frozen Sand Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 22. P. 1325–1344.
6. Zhao F., Chang L., Zhang W. Experimental investigation of dynamic shear modulus and damping ratio of Qinghai-Tibet frozen silt under multi-stage cyclic loading // Cold Regions Science and Technology. 2019. Vol. 170. Article 102938. DOI:10.1016/j.coldregions.2019.102938.
7. Song L., Liu J., Jin Y., Li Ch., Cai S. Experimental study on warm permafrost dynamic characteristics under cyclic loading in the cold region // Advances in Civil Engineering. Vol. 2022. Article ID 754828. DOI:10.1155/2022/7548284.
8. Lu J., Yang Zh., Shi W., Lu Zh. Dynamic characteristics of rubber reinforced expansive soil (ESR) at positive and negative ambient temperatures // Polymers. 2022. Vol. 14. № 19. DOI:10.3390/polym14193985.
9. Zhang X., Sun B., Xu Zh., Huang A., Guan J. Experimental study on the dynamic characteristics of frozen silty clay and its influencing factors // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 2. Article 1205. DOI:10.3390/su15021205.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>