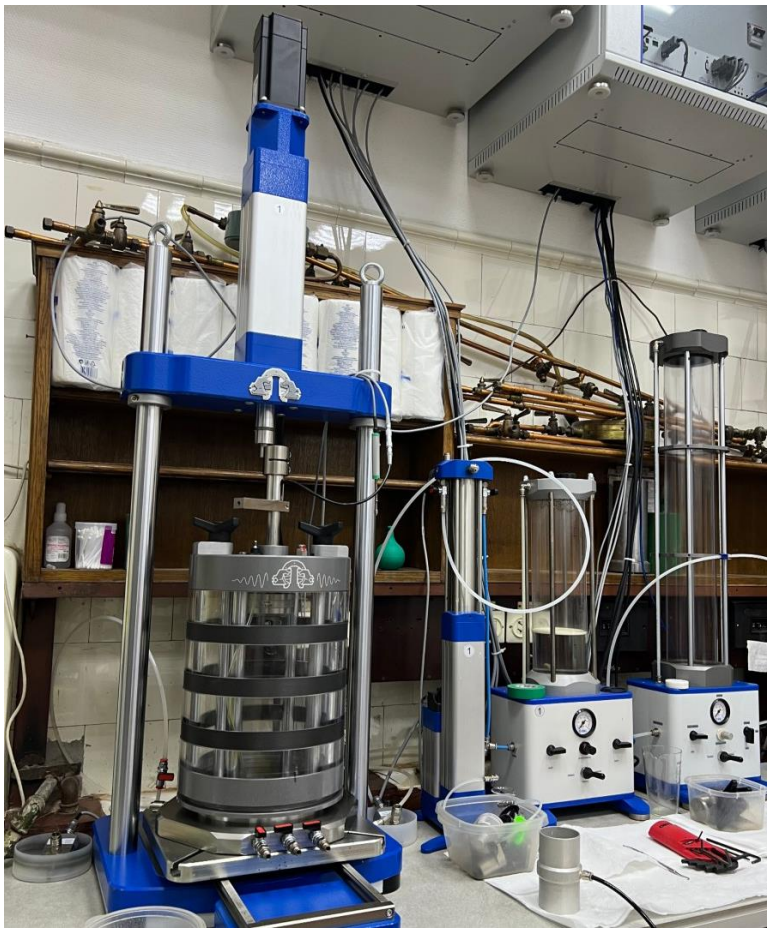
УДК 624.139.7



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

МИРНЫЙ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ

Доцент Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к.т.н., info@indep-geo.ru

ИДРИСОВ ИЛЬЯ ХАМИТОВИЧ

Генеральный директор ООО НПП «Геотек»

МОСИНА АННА СЕРГЕЕВНА

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

Оригинальная статья

Аннотация

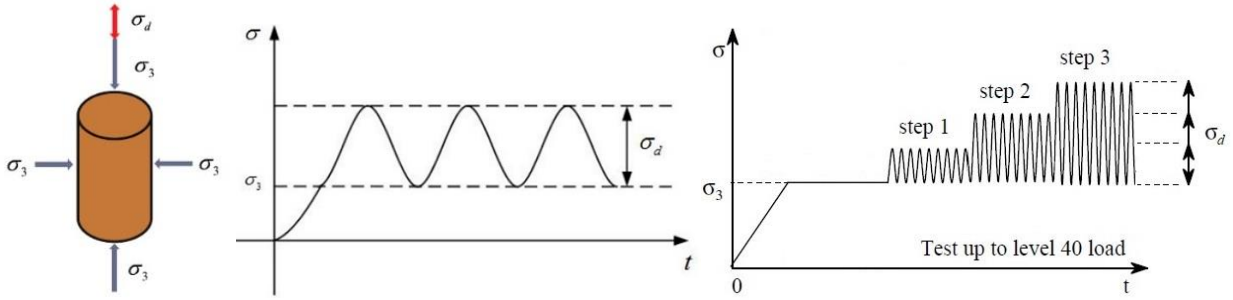
В первой части настоящего цикла статей были подробно представлены результаты испытаний мерзлых грунтов в резонансной колонке. Исходя из анализа опубликованных данных следует, что исследование динамических свойств мерзлых грунтов чаще выполняют методом трехосного сжатия. Его преимущество, по сравнению 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 настоящей статье приведен литературный обзор результатов испытания мерзлых грунтов методом трехосного сжатия с упором на температурные изменения. По результатам обобщения динамических свойств мерзлых грунтов получено, что при низкой отрицательной температуре −10ºС и менее модуль деформации обычно имеет значение выше 4000 МПа, при температуре от −3ºС до −5ºС - варьирует в среднем от 600 до 3000 МПа, а при температуре выше −3ºС снижается до 715-400 МПа в зависимости от состава, свойств грунта и условий испытания. Коэффициент поглощения мерзлого грунта *D* колеблется в широком пределе – от 0,01 до 0,2 и выше (в зависимости от его состава, влажности, температуры и условий проведения испытаний), в большинстве работ фиксируется его увеличение при увеличении температуры мерзлого грунта. В статье приведены результаты измерения порового давления грунта с температурой −0,2ºС в ходе его динамического нагружения.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые грунты; динамические свойства грунтов; метод динамического трехосного сжатия; коэффициент поглощения; лабораторные испытания; криолитозона.

Испытания мерзлых грунтов методом динамического трехосного сжатия реализуются передачей 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 изменение 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 исследователей не представлено схожего подхода к методике выполнения испытаний. Основные отличия заключаются в способах передачи колебаний на мерзлый образец. Так, колебания могут задаваться путем циклического приложения постоянного значения либо деформаций, либо напряжений. 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 некоторую постоянную величину, при этом на каждой ступени его значение постоянно и передается на образец некоторое количество раз. В подавляющем большинстве случаев данный метод встречается в работах китайских исследователей.

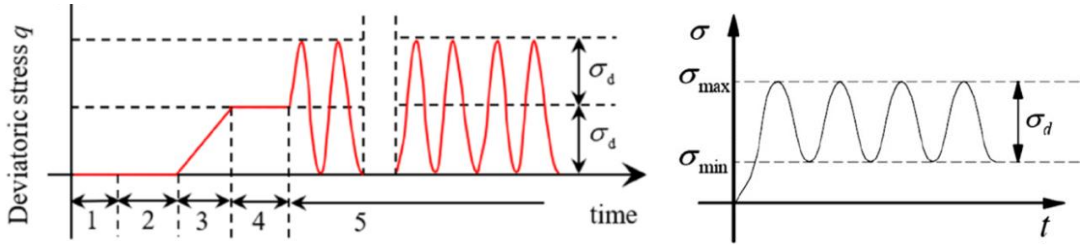


а) б)

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

Еще одним существенным отличием является разный подход к пониманию амплитуды динамических напряжений. Одни исследователи за амплитуду напряжения принимают значение половины колебательной волны (рис. 2, а). Другие под амплитудой

понимают напряжение от минимального и до максимального его значения за колебание (от пика до пика нагрузки) (рис. 2, б). Кроме этого, не во всех научных трудах указан принцип фиксации амплитуды напряжений. Подобные неоднозначности могут привести к неверной интерпретации результатов. В настоящей статье подход к понятию амплитуды колебаний указан только у тех исследований, у которых он приведен в литературных источниках.



а) б)

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

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 в испытаниях варьирует от 0,7 Гц до 6 Гц.

Исследования динамического поведения мёрзлых грунтов в условиях трехосного сжатия начались в 70-80-ых годах прошлого века. В 1976 г. Ted S. Vinson для изучения сейсмического влияния провел циклические испытания мерзлой глины в условиях трехосного сжатия при амплитудах деформации от 3 x 10^{-3} до 2 x 10^{-2} % при разных всесторонних давлениях, температуре и частоте воздействия и др. [7]. По результатам было получено, что влияние всестороннего давления и степени влажности на модуль Юнга оказалось незначительным, при этом увеличение температуры грунта привело к его снижению. Так, например, при повышении температуры от −10 до −1°С модуль Юнга снижается с 4206-4757 МПа до 1310-1480 МПа при амплитуде деформации 3,16 x 10^{-3} % и частотах 0,05-5 Гц (рис. 3).

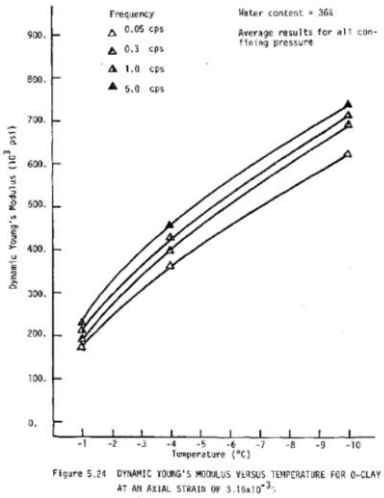


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга мерзлой глины от ее температуры с разной частотой испытаний при влажности 36% по результатам динамического трехосного сжатия (psi – фунт-сила/дюйм^2, 1 psi ≈ 0,00689 МПа…, 1 cps=1 Гц) [7]

В 1979 г. группа американских ученых J.C. Li, G.Y. Baladi, O.B. Andersland [2] провела серию динамических испытаний мерзлого песка методом трехосного сжатия. Использована схема динамического нагружения с амплитудой осевых деформаций в диапазоне от 3×10^{-3} до 3×10^{-2} %, всесторонним давлением 0-1,4 МПа, частотой 0,05-5,0 Гц и температурой от −1 до −10 °С. Результаты испытаний показали, что динамический модуль Юнга увеличивается с увеличением частоты, всестороннего давления, но уменьшается с увеличением амплитуды деформации и температуры. Так, например, при росте температуры грунта от −10°С до −1°С (σ_3 = 0,3 МПа, амплитуда деформации 1×10^{-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 −10°С и частоте 5,0 Гц до 0,25 при −1°С и частоте 0,05 Гц.

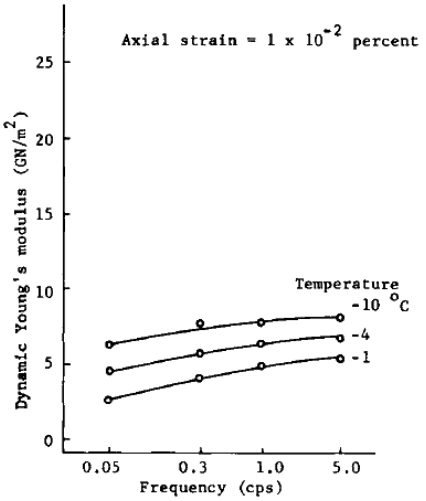


Рис. 4. Модуль Юнга мерзлого песка при разной частоте и температуре по результатам динамического трехосного сжатия с всесторонним давлением 0,3 МПа (1 cps= 1 Гц) [2]

В 2009 г. китайские исследователи Xian Ling, Zhan Zhu и др. [4] выполнили динамические испытания мерзлой глины. 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 увеличением температуры, увеличивался с увеличением всестороннего давления. Так, например, его значение при температуре −12 ºС составило 1600 МПа, а при −2 ºС уже менее 1200 МПа. Однако с ростом температуры грунта в диапазоне от −12 до −5 ºС 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 последних (рис. 5).

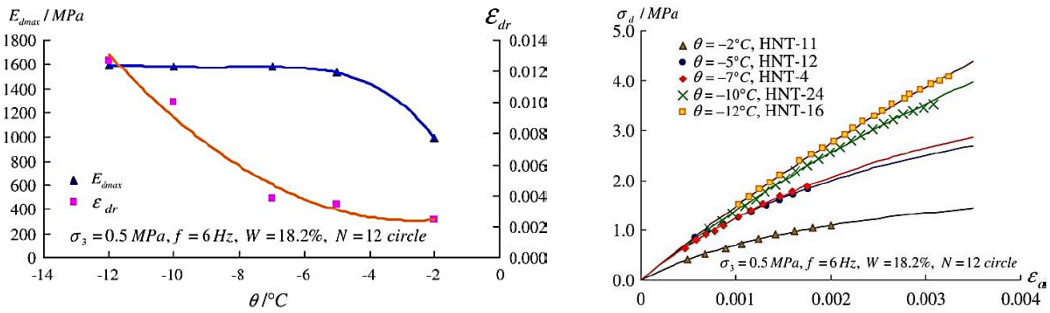


Рис. 5. Результаты испытаний мерзлой глины в условиях динамического трехосного сжатия [4]

В 2009 г. исследователь Yu Zhang [9] защитил диссертацию на тему “Влияние замораживания-оттаивания на потенциал разжижения и динамические свойства пылеватого грунта Мейбл-Крик”. В данной работе приведены интересные результаты динамических трехосных испытаний высокотемпературных мерзлых грунтов с измерением порового давления. Эксперименты выполнены при всестороннем давлении 0,1 МПа, частоте воздействия 0,1 Гц с заданной амплитудой деформации. Исследовалось динамическое поведение пылеватого грунта с положительной температурой и температурой −0,2 °С. Показатели динамических свойств грунта определялись по формулам:

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

где r_u – приведенное поровое давление; Δu - избыточное поровое давление в конце цикла нагрузки; σ'_3 - начальное эффективное всестороннее давление;

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

где $E = \sigma_{dmax}/\varepsilon_{max}$; σ_{dmax} - максимальное напряжение (значение половины колебательной волны); ε_{max} - максимальная осевая деформация; γ - деформация сдвига; ν - коэффициент Пуассона.

По результатам было получено, что при температуре −0,2 °С не фиксируется снижение модуля сдвига с увеличением циклов нагружения, его начальное значение при γ = 0,005% составило около 340 МПа. Коэффициент поглощения при γ = 0,005% составил 4% (рис. 6).

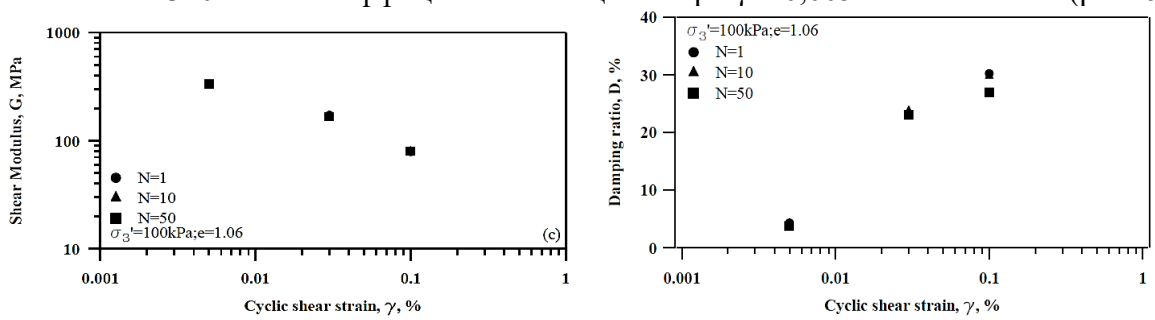


Рис. 6. Модуль сдвига и коэффициент поглощения пылеватого грунта в зависимости от уровня деформации сдвига и количества циклов нагрузки при температре −0,2 °С по результатам динамического трехосного сжатия [9]

По результатам испытаний обнаружено низкое значение приведенного порового давления у грунта с температурой −0,2 °С. Так, его значение при амплитуде деформации сдвига 0,03 % с увеличением 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 −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) [9].

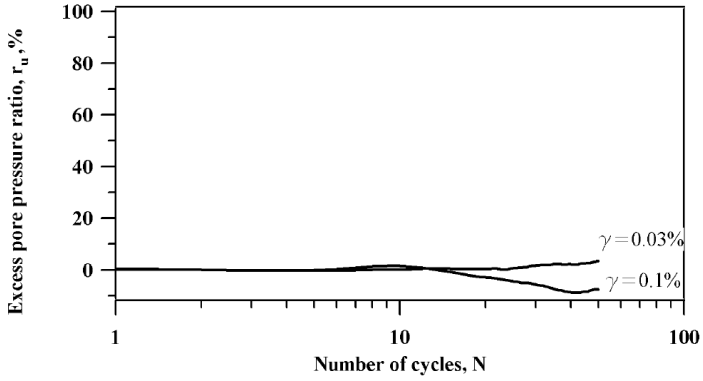


Рис. 7. Изменение избыточного приведенного порового давления (r_u) с увеличением количества циклов нагрузки (N) пылеватого грунта при температуре −0,2ºС (уровень деформаций приведен на графике) [9]

Исследователи Lingshi An и др. в 2017 г. представили результаты [5] динамических испытаний мерзлого сильнольдистого песка. Была использована одноступенчатая схема нагружения с частотой нагрузки 2,4 и 6 Гц при всестороннем давлении 0,1-0,3 МПа. Испытания проведены при трех значениях температуры мерзлого песчаного грунта: −5, −10, −15 °С. За амплитуду принято значение от минимума до максимума напряжения. Определение модуля деформации схематически приведено на рис. 8.

Рис. 8. Определение модуля деформации [5]

По результатам было получено, что начальный модуль деформации мерзлого сильнольдистого песка при температуре −5°С составляет 2941 МПа, при снижении температуры до −10 и −15°С его значение увеличивается до 4480 МПа и 8333 МПа соответственно (частота нагрузки 4 Гц, всестороннее давление 0,2 МПа). При увеличении всестороннего давления с 0,1 МПа до 0,3 МПа начальный модуль деформации увеличился с 3870 МПа до 5306 МПа (температура грунта −10ºС, частота нагрузки 4 Гц). Увеличение частоты нагрузки с 4 до 6 Гц привело к увеличению начального модуля деформации от 3600 МПа до 6300 МПа (температура грунта −10ºС, всестороннее давление 0,2 МПа).

Futang Zhao и др. [1] получили динамические параметры мерзлого пылеватого грунта при температуре грунта от −1 до −15 ºС с всесторонним давлением 0,1-0,4 МПа. Использована многоступенчатая схема нагружения с амплитудой осевой нагрузки доходящей до 4-5 МПа (за амплитуду принято значение от минимума до максимума нагрузки) с частотой нагрузки 2 Гц. Каждая ступень нагрузки прикладывалась 12 раз, испытание продолжалось до достижения предельной осевой деформации 10 %. Результаты испытания были интерпретированы по следующим зависимостям (рис. 9):

$$\gamma_d = \varepsilon_d (1 + \mu)$$

$$\tau_d = \sigma_d/2$$

$$\tau_d = \gamma_d / (a + b*\gamma_d)$$

$$G_d = \tau_d/\gamma_d$$

$$G_{dmax} = G_d \mid_{\gamma d \to 0} = 1/a$$

$$\tau_{dult} = \tau_d \mid_{\gamma d \to +\infty} = 1/b$$

$$y_{dr} = \tau_{dult}/G_{dmax} = a/b$$

$$G_d = G_{dmax} /(1+ y_d /y_{dr})$$

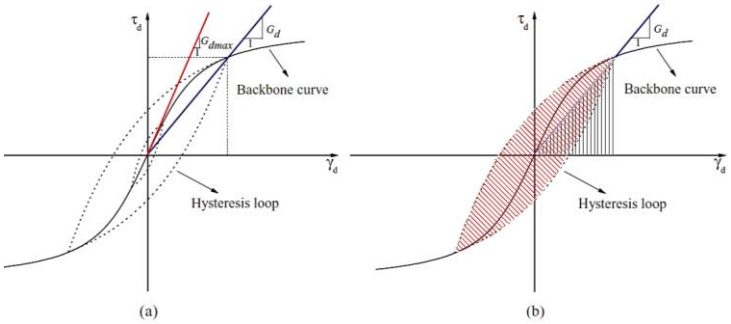


Рис. 9. Определение модуля сдвига мерзлого грунта по результатам динамического трехосного сжатия [1]

По результатам было получено, что динамическая прочность грунта (ступенчатое достижение предела деформации 10%) при повышении температуры с −15°C до −1°C снизилась почти в 10 раз (рис. 11). Начальный модуль сдвига снизился с 870 МПа до 276 МПа при увеличении температуры с −15°C до −1°C. Его значение при температуре −5°C составило 294 МПа. Коэффициент поглощения увеличивался с повышением температуры, так, при температуре −15°C его значение составило 0,0169, а при −1°C - 0,0435 (рис. 10).

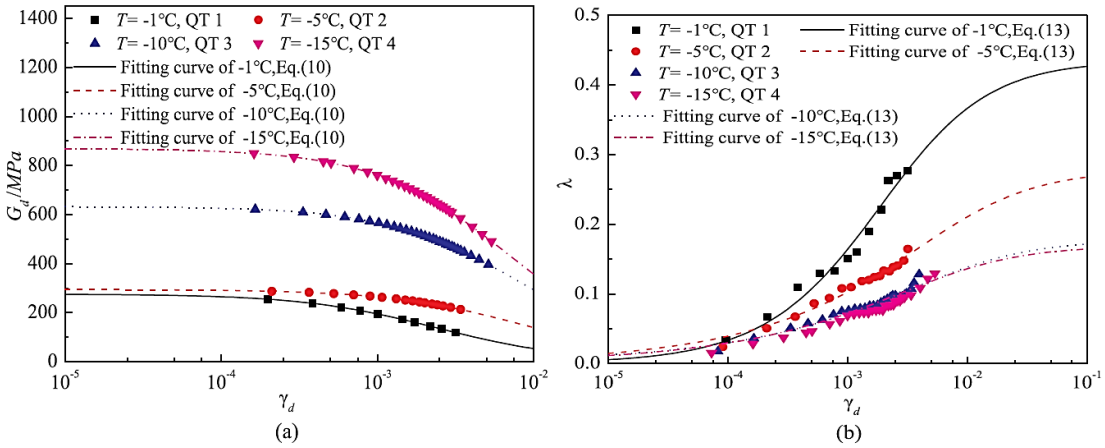


Рис. 10. Модуль сдвига, коэффициент поглощения мерзлого пылеватого грунта при разных температурах по результатам динамического трехосного сжатия [1]

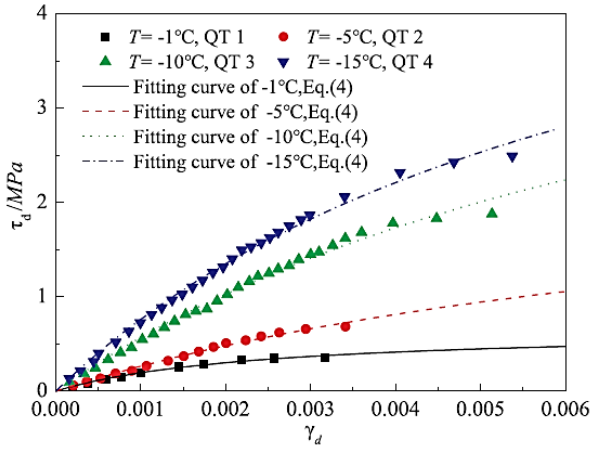


Рис. 11. Фрагменты графиков деформирования мерзлого пылеватого грунта по результатам динамического трехосного сжатия [1]

Liwei Song и др. исследовали динамическое поведение мерзлого грунта при температуре −1,5 °C [6]. Эксперименты проведены по одноступенчатой схеме нагружения с амплитудами девиатора напряжений – 25 кПа, 40 кПа, 42,5 кПа (амплитуда соответствовала значению от минимума до максимума нагрузки), с всесторонним давлением 0,020 - 0,03 МПа и частотой 6 Гц. Испытания завершали при 5% относительной осевой деформации или спустя 50 000 циклов нагрузки. По результатам было получено, что с увеличением амплитуды воздействия модуль деформации падал, его максимальное значение получено при амплитуде девиатора напряжений 25 кПа – спустя 1000 циклов нагрузки он составил 90 МПа, спустя 50 000 – 96,1 МПа [6].

В 2022 г. Jianhang Lv и др. получили параметры динамических свойств мерзлых грунтов при температурах −5 °C и −15°C (в большинство образцов при их формировании была добавлена резина). Результаты были интерпретированы по зависимостям, аналогичным работе [3] и рис. 9. Эксперименты выполнены многоступенчатым нагружением (каждая ступень нагружалась 40 раз) с частотой воздействия 1 Гц и всесторонним давлением 0,4 МПа. Амплитуда девиатора напряжений достигла 0,7 МПа (за амплитуду принято значение

от минимума до максимума нагрузки). Испытания велись до достижения предельной деформации равной 5%. По результатам получено, что начальный модуль сдвига “чистой” мерзлой глины при температуре −5 °С составил около 200 МПа, при снижении температуры до −15 °С его значение увеличилось до 510 МПа. Коэффициент поглощения при температуре −5 °С варьировал от 0,18 до 0,175.

Xiyin Zhang и др. [8] выполнили исследования динамического поведения мерзлой глины многоступенчатой схемой нагружения (за амплитуду принято значение от минимума до максимума 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. В испытаниях была задана температура мерзлой глины от −0,3 °С до −5°С Определение модуля деформации приведено по принципу, отражённому на рис. 9.

По результатам было получено, 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 −3 до −0,3 ºС, при повышении температуры с −5 до −3 ºС его снижение идет менее интенсивно. Так, при температуре −5 ºС начальный модуль деформации составил 708-740 МПа, при температуре −3 ºС - 581-715 МПа, −1 ºС - 466-512 МПа, −0,3 ºС - 316-376 МПа (рис. 12). Коэффициент поглощения мерзлой глины варьировал от 0,035-0,04 при −5 ºС до 0,049-0,062 при −0,3 ºС. Некоторые из результатов испытаний приведены в табл. 1.

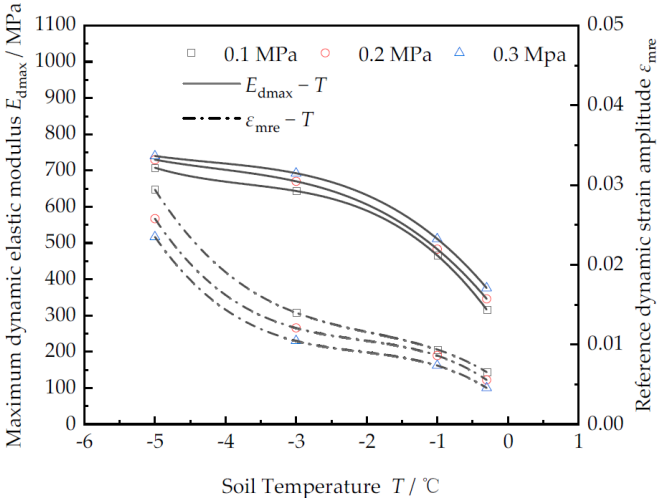


Рис. 12. Зависимость начального модуля деформации от температуры мерзлого грунта и всестороннего давления при влажнсоти грунта 16% и частоте нагрузки 4 Гц по результатам динамического трехосного сжатия [8]

Табл. 1. Результаты испытания мерзлой глины методом динамического трехосного сжатия [8]

w /%	σ_3 /MPa	T /°C	f /Hz	E_{dmax} /MPa	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	665.7790	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

Примечание: w – влажность грунта, $б_3$ – всестороннее давление, T – температура грунта, f – частота нагрузки, E_{dmax} – начальный модуль деформации, λ_{min} – коэффициент поглощения

Выводы

По результатам количественного обобщения показателей динамических свойств мёрзлых грунтов получены следующие данные. При низкой отрицательной температуре −10°С и менее модуль деформации мерзлого грунта чаще имеет значение выше 4000 МПа, а модуль сдвига колеблется от 500 МПа до 1100 МПа. При температуре мерзлого грунта от −3°С до −5°С модуль деформации варьирует в среднем от 600 до 3000 МПа. Увеличение температуры мерзлого грунта выше −3°С приводит к снижению модуля деформации до 512-715 МПа (−3°С), до менее 400 МПа при −0,3°С и модуля сдвига до 280-350 МПа при температуре менее −1°С (рис. 13, 14). Однако следует понимать, что значение модуля деформации будет зависеть от состава, свойств грунта и условий проведения динамических испытаний.

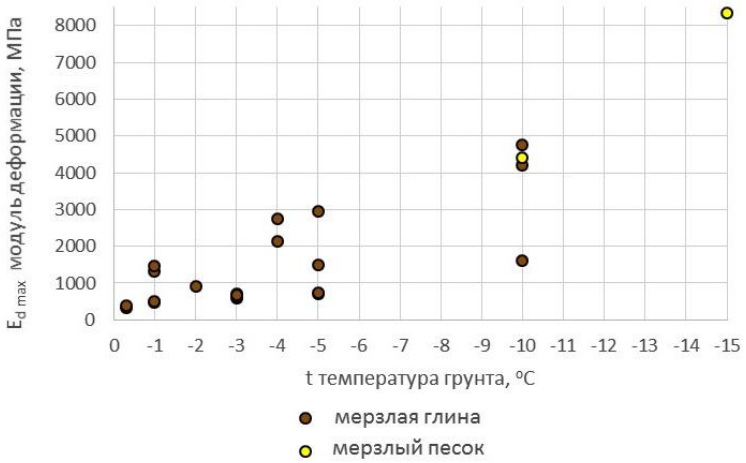


Рис. 13. Обобщённый график зависимости начального модуля деформации мерзлого грунта от его температуры по результатам испытаний в условиях динамического трехосного сжатия

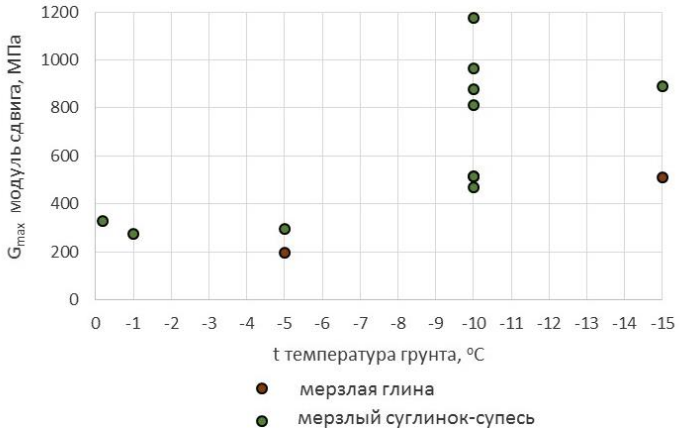


Рис. 14. Обобщённый график зависимости начального модуля сдвига мерзлого грунта от его температуры по результатам испытаний в условиях динамического трехосного сжатия

В проанализированной литературе найден только один пример измерения порового давления в мерзлых грунтах при их динамических испытаниях с достаточно высокой температурой −0,2°С [9]. По результатам было определено, что 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 широком пределе – 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 рис. 15 видно, что увеличение температуры от –5 до – 0,3 °С приводит к росту коэффициента поглощения мерзлой глины от 0,035-0,042 до 0,049-0,062 (частота 4 Гц, всесторонне давление 0,1-0,3 МПа, влажность 16%). Однако в некоторых работах встречается обратная зависимость – снижение коэффициента поглощения с ростом температуры.

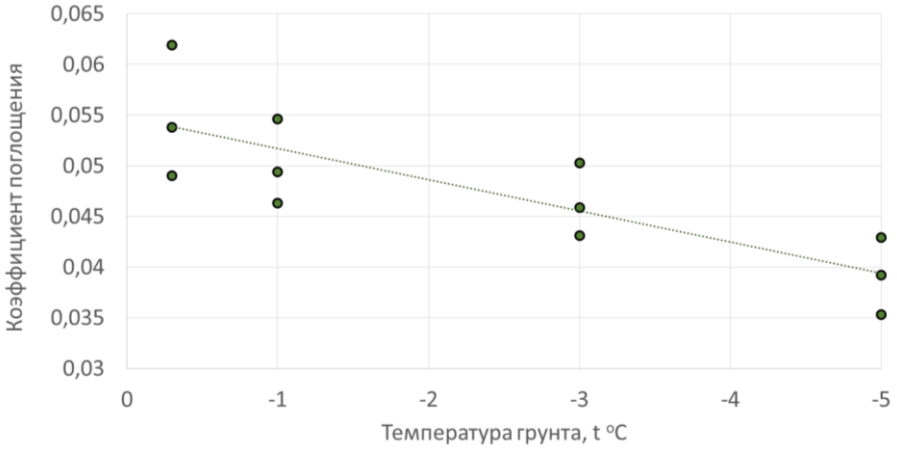


Рис. 15. Температурная зависимость коэффициента поглощения мерзлой глины по результатам испытания методом динамического трёхосного сжатия при влажности грунта 16% и частоте нагрузки 4 Гц (всестороннее давление 0,1-0,3 МПа)

Список литературы

1. Futang Zhao, Lijun Chang, Wuyu Zhang. Experimental investigation of dynamic shear modulus and damping ratio of Qinghai-Tibet frozen silt under multi-stage cyclic loading // Cold Regions Science and Technology, №170(9), 2019. DOI:10.1016/j.coldregions.2019.102938.
2. John C. Li, G. Baladi, O. Andersland. Cyclic triaxial tests on frozen sand // Engineering Geology, №13, 1979, СС. 233-246. DOI:10.1016/0013-7952(79)90035-8.
3. Jianhang Lv, Zhongnian Yang, Wei Shi, Zhaochi Lu. Dynamic Characteristics of Rubber Reinforced Expansive Soil (ESR) at Positive and Negative Ambient Temperatures // Polymers, №14(19), 2022. DOI:10.3390/polym14193985.
4. 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, №57 (1), 2009, СС. 7-12.
5. Lingshi An, Xianzhang Ling, Yongchang Geng, Qionglin Li, Feng Zhang, Lina Wang Dynamic and Static Mechanical Properties of Ice-Rich Frozen Sand. № 22, 2017, СС. 1325-1344.
6. Liwei Song, Junfang Liu, Yan Jin, Chi Li, and Songbao Cai. Experimental Study on Warm Permafrost Dynamic Characteristics under Cyclic Loading in the Cold Region September // Advances in Civil Engineering, 2022, СС. 1-8. DOI:10.1155/2022/7548284.
7. Ted S. Vinson. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions. 1976. с. 288.
8. Xiyin Zhang, Binjie Sun, Zhenjiang Xu, Anqi Huang and Jiada Guan Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Frozen Silty Clay and Its Influencing Factors // Sustainability, № 15(2), 2023. DOI:10.3390/su15021205.
9. Yu Zhang. Impact of Freeze-Thaw on Liquefaction Potential and Dynamic Properties of Mabel Creek Silt. Ph.D. Thesis., 2009, с. 191.