



ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 4. ПРИБОРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО 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

Испытания мерзлых грунтов в динамическом режиме требуют применения специального оборудования, сконструированного непосредственно под эти цели. Использование приборов стандартной конструкции в данном случае приведет к получению результатов низкой точности. Первые рекомендации по части разработки отечественной резонансной колонки для мерзлых грунтов приведены в работе [1]. В настоящей статье представлены данные иностранных коллег по модифицированию прибора динамического трехосного сжатия для испытаний мерзлых грунтов. На основании зарубежного опыта и с учетом анализа показателей динамических свойств мерзлых грунтов [2] предложены некоторые рекомендации по разработке динамического стабилометра для мерзлых грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

мерзлые грунты; динамические свойства; лабораторные испытания; динамическое трехосное сжатие; приборы.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 4. Приборы динамического трехосного сжатия // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 6. С. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-6-....

DYNAMIC PROPERTIES OF FROZEN SOILS. PART 4. DYNAMIC TRIAXIAL COMPRESSION DEVICES

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

Testing frozen soils in the dynamic mode requires the use of special equipment designed specifically for these purposes. Using devices of the standard design in this case will lead to low-precision results. The first recommendations for the development of a domestic resonance column for frozen soils are given in the previous publication [1]. This article presents data from foreign colleagues on modifying a dynamic triaxial compression device for testing frozen soils. On the basis of foreign experience and taking into account the analysis of the dynamic properties of frozen soils [2], some recommendations for developing a dynamic stabilometer for frozen soils are proposed.

KEYWORDS:

frozen soils; dynamic properties; laboratory tests; dynamic triaxial compression; devices.

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Idrisov I.H., Mosina A.S. Dinamicheskiye svoystva merzlykh gruntov. Chast' 4. Pribory dinamicheskogo trehosnogo szhatiya [Dynamic properties of frozen soils. Part 4. Dynamic triaxial compression devices] // Geoinfo. 2024. Vol. 6. № 6. S. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-5-...-... (in Rus.).

Группы приборов трехосного сжатия ▶

Прибор трехосного сжатия шире используется для проведения динамических испытаний мерзлых грунтов, чем резонансная колонка. В литературе найдено множество его типов, модифицированных исследователями разных стран и сконструированных крупными производителями. Все разнообразие данных приборов можно подразделить на 4 группы.

К первой группе относятся приборы трехосного сжатия типа MTS (Material Test System). У них есть разные модификации. Изначально они были разработаны американскими производителями. В настоящее время приборы типа MTS видоизменяются китайскими учеными и активно ими же используются.

Ко второй группе относится прибор собственно китайского производства под названием TWDSZ300.

Третья группа приборов разработана английской компанией GDS. В литературе встречаются как обычные трехосные приборы этой компании, модифицированные исследователями для мерзлых грунтов, так и трехосные приборы, разработанные GDS непосредственно для динамических испытаний мерзлых грунтов.

Приборы американской компании GCTS для исследований динамических

свойств мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия отнесены к четвертой группе.

Рассмотрим особенности конструкции каждой из указанных групп приборов.

Группа приборов для динамического трехосного сжатия мерзлых грунтов типа MTS ▶

Первый вариант установки MTS был разработан в США в 1970–1980-е годы и часто упоминается или рассматривается в работах того времени. Авторы работы [3] в 1976 году разработали конструкцию динамического стабилометра с сервогидравлическим приводом. Испытательная система с замкнутым контуром MTS состояла из привода, сервоклапана, гидравлического насоса, сервоконтроллера и гидравлического контроллера (двигатель приводил в действие сервоклапан, который направлял гидравлическую жидкость под давлением в цилиндр привода, приводя его в движение) (рис. 1, 2). Деформации измерялись датчиком LVDT (дифференциальным трансформатором для измерения линейных перемещений – Linear Variable Differential Transformer), закрепленным вдоль образца между основанием и верхним штампом. С помощью данной установки можно прово-

дить испытания в диапазоне частот воздействия 0,05–50 Гц с амплитудой деформаций 10^{-5} – 10^{-3} и всесторонним давлением до 1,4 МПа.

В устройстве MTS система охлаждения была оборудована автономно (рис. 3). Камера трехосного сжатия из алюминия была помещена в прямоугольный резервуар, по которому циркулировал хладагент (азот). Алюминий был выбран в качестве материала для камеры из-за его высокой теплопроводности для эффективной передачи тепла от внешнего хладагента. Для контроля температуры на образце монтировались два терморезистора, третий термометр размещался в камере трехосного сжатия.

Для предотвращения крена образца (и влияния на показания датчика LVDT) использовали противокренное крепление, схематично показанное на рисунке 4.

Установку типа MTS активно используют китайские исследователи. Так, в литературе широко встречается вариант установки MTS-810 – ее применение отражено как минимум в 15 научных источниках. Этот прибор у разных исследователей имеет некоторые вариации, но основная его конструкция везде одинакова. Так, во всех MTS-810 применяется сервогидравлический привод, нагрузку можно передавать с часто-

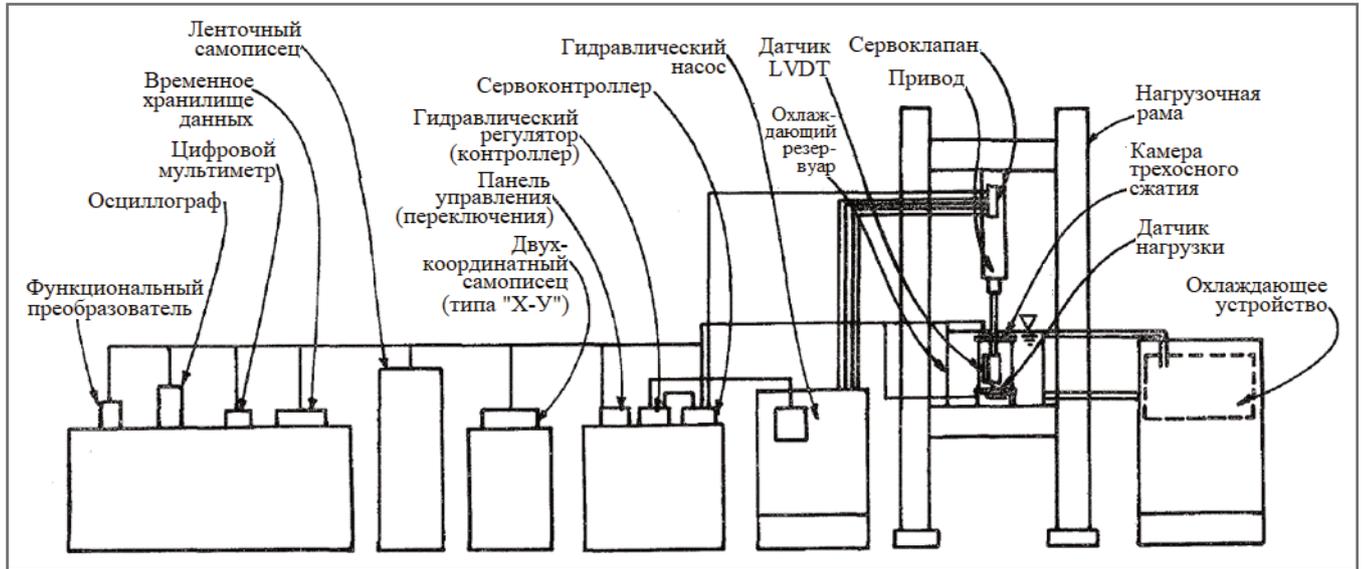


Рис. 1. Схема прибора динамического трехосного сжатия MTS [3]

той колебаний до 50 Гц; всестороннее давление может быть задано до 20 МПа, но в одной из модификаций максимальное значение составляет 10 МПа. Испытания чаще всего выполняются на мерзлых грунтах с размером образца 61,8/125 мм (диаметр/высота). Предельная деформация образца варьирует от 25 до 85 мм. Максимальная вертикальная нагрузка, задаваемая MTS-810, различается у разных приборов и варьирует от 50 до 250 кН, хотя чаще применяется установка с максимальной нагрузкой 100 кН.

Рассмотрим несколько работ, в которых описание стандартной конструкции установки динамического трехосного сжатия MTS-810 приведено более подробно. Авторы работ [4, 5] использовали прибор, позволявший задавать всестороннее давление до 20 МПа и температуру до минус 30 °С. Система вертикальной нагрузки состояла из рамы и гидравлического сервопривода, позволявшего проводить испытания с управлением деформацией или напряжением с максимальной частотой до 50 Гц. С помощью системы передачи осевой нагрузки прикладывались максимальное осевое усилие (статическое или динамическое) величиной до 100 кН и максимальное осевое смещение (статическое или динамическое) величиной до 25 мм. Система передачи всестороннего давления и система осевой нагрузки в процессе испытания были независимы друг от друга. Термокамера устройства была запатентована. Ее торцы были изготовлены из аморфного металла с высокой теплоизоляцией и прочностью. Конструкция данного прибора показана на рисунке 5.

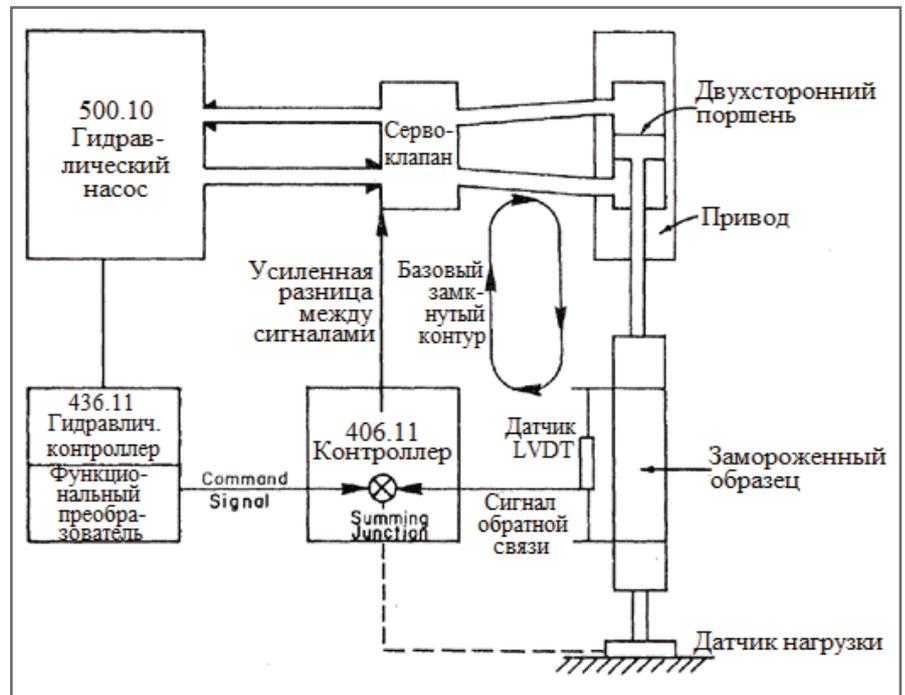


Рис 2. Схема электрогидравлического прибора трехосного сжатия с замкнутым контуром типа MTS (по [3])

Авторы статьи [6] использовали установку MTS-810 (5T), с помощью которой задавались: всестороннее давление величиной до 10 МПа, частота воздействия – до 50 Гц, максимальная осевая нагрузка – до 50 кН. Данный прибор был оборудован системой поддержания отрицательной температуры образца. Циркуляция хладоносителя была устроена в верхней части камеры, а не вокруг образца, как в других установках. Для контроля температуры рабочей жидкости в камере на некотором расстоянии от образца было вмонтировано два датчика – на уровнях верхней и нижней частей образца. В качестве сре-

ды для передачи всестороннего давления было использовано масло (рис. 6).

Автор работы [7] выполнил испытания высокотемпературного мерзлого грунта на модифицированной установке динамического трехосного сжатия MTS TX. Данный прибор типа MTS отличается от предыдущих возможностью измерений порового давления в ходе проведения испытания. Его конструкция используется также для моделирования циклов замораживания-оттаивания грунта. Верхнее и нижнее основание установки были сконструированы таким образом, чтобы их можно было подключить к внешнему блоку охлаждения, ко-

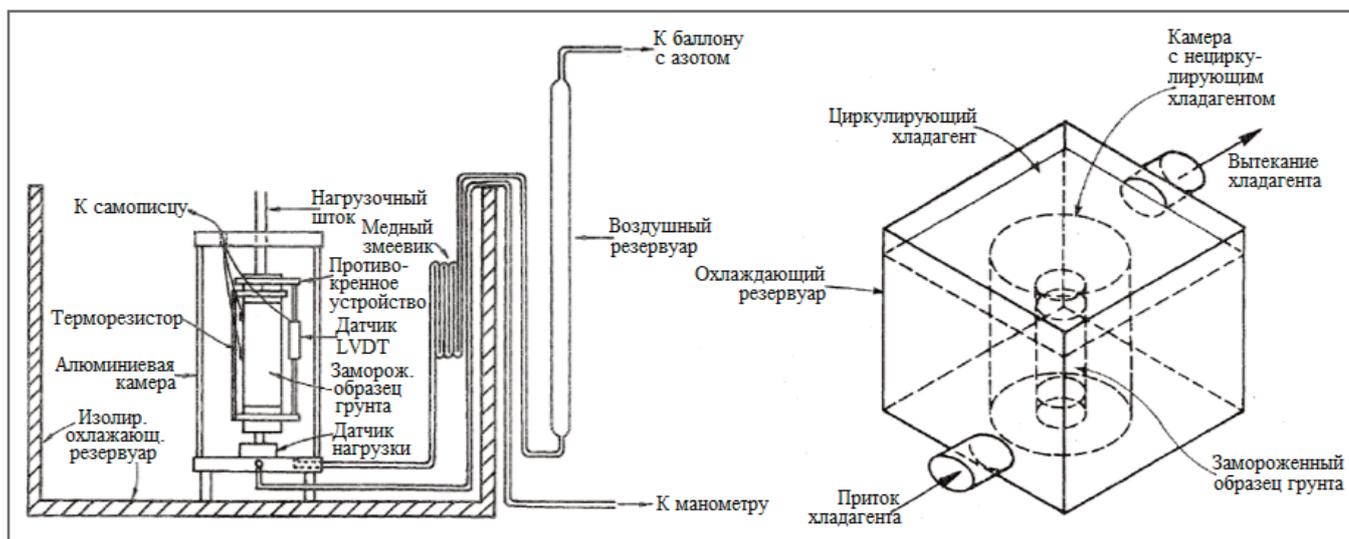


Рис. 3. Схема прибора трехосного сжатия в системе охлаждения (по [3])

торый позволяет поддерживать температуру образца. Также вокруг образца был установлен охлаждающий латунный контур в виде змеевика, по которому циркулировала охлаждающая жидкость – антифриз. Для сведения к минимуму потерь тепла и поддержания постоянной заданной температуры камера была изолирована пенополистиролом. Для непрерывного мониторинга и регулирования температуры вокруг образца грунта были установлены шесть терморезисторов, как показано на рисунке 7. Перемещения измерялись с помощью высокоточного датчика LVDT, а нагрузка контролировалась с помощью тензодатчика ($227 \pm 0,5$ кг). Передача всестороннего давления реализовывалась пневматически через антифриз. Дренажные каналы были подведены к верхней и нижней частям образца. Датчик порового давления, способный измерять давление до 0,7 МПа с точностью плюс-минус 0,001 МПа, был установлен в нижнем дренажном канале. Штампы были изготовлены из пористого камня. К верхней части образца был подведен датчик, измерявший изменений объема до (80 ± 1) мл (см. рис. 7).

Группа приборов для динамического трехосного сжатия мерзлых грунтов типа GDS ▶

Динамические испытания мерзлых грунтов часто выполняют на обычных приборах компании GDS, изначально предназначенных для немерзлых грунтов. Их модификацией занимаются преимущественно китайские ученые. Отдельно встречаются исследования на динамических трехосных установках, разработанных компанией GDS непо-

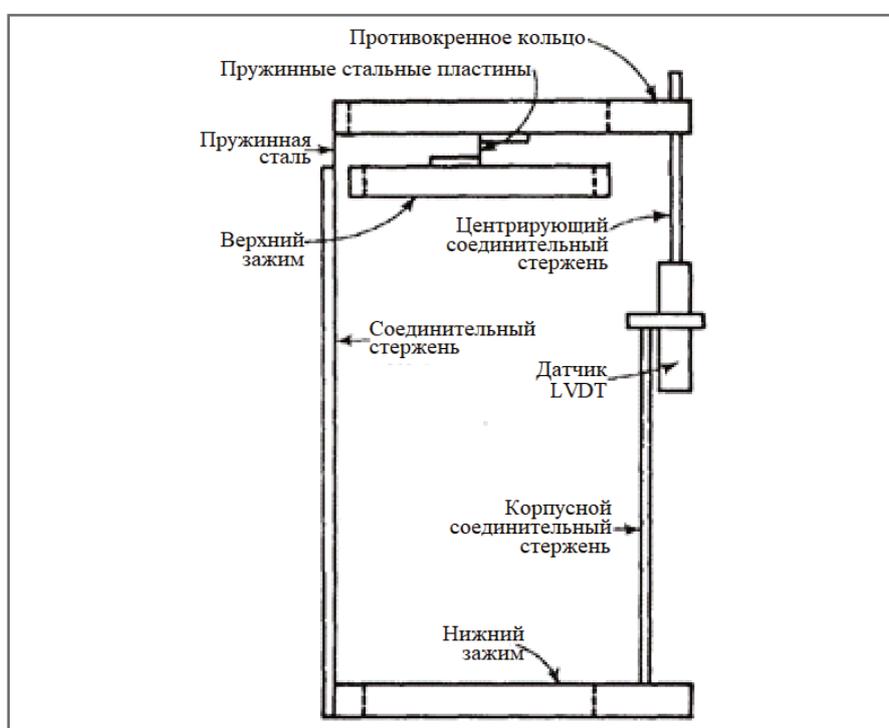


Рис. 4. Система предотвращения крена образца (по [3])

средственно для испытаний мерзлых грунтов.

Авторы статьи [8] выполнили динамические испытания мерзлых грунтов на модифицированном приборе DYNTTS GDS с сервогидравлическим приводом, который позволял передавать на образец динамическую нагрузку до 60 кН с максимальной частотой 10 Гц. Максимальное перемещение составляло 100 мм. Установка была оборудована охлаждающим контуром, проведенным вокруг образца в виде змеевика из медных труб. Размер образца составлял 39,1/80 мм.

Авторы работы [9] использовали прибор динамического трехосного сжа-

тия с сервогидравлическим приводом, который позволял создавать осевую нагрузку до 200 кН с максимальной частотой до 10 Гц. Максимальное перемещение в данном приборе составляло 60 см, размер образца – 50/100 мм. Камера трехосного сжатия была модифицирована и оснащена системой поддержания и контроля отрицательной температуры. Для этого в камеру были помещены три U-образные медные трубки, подсоединенные к охлаждающей установке. Вся установка трехосного сжатия была теплоизолирована материалом из полиэфира высокой пористости. Для контроля температуры были установлены датчики. Для передачи всестороннего

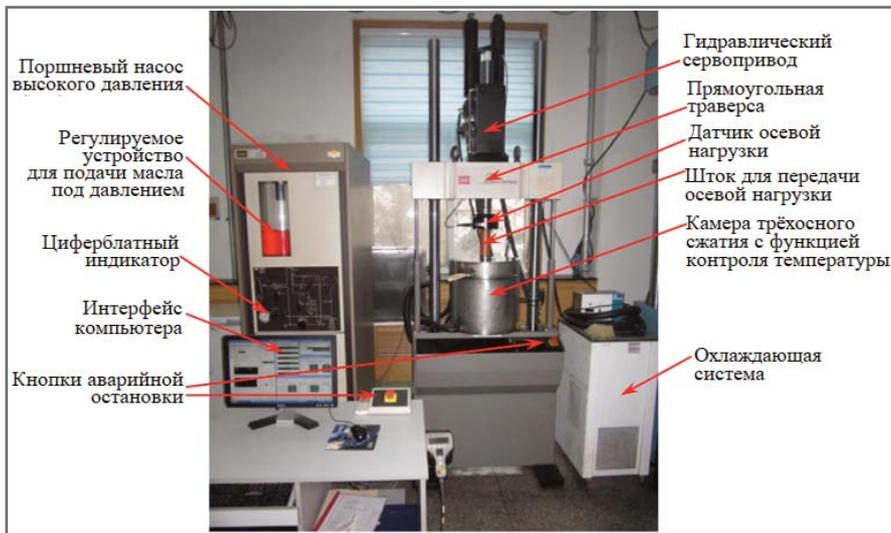


Рис. 5. Конструкция прибора MTS-810 для динамических испытаний мерзлых грунтов

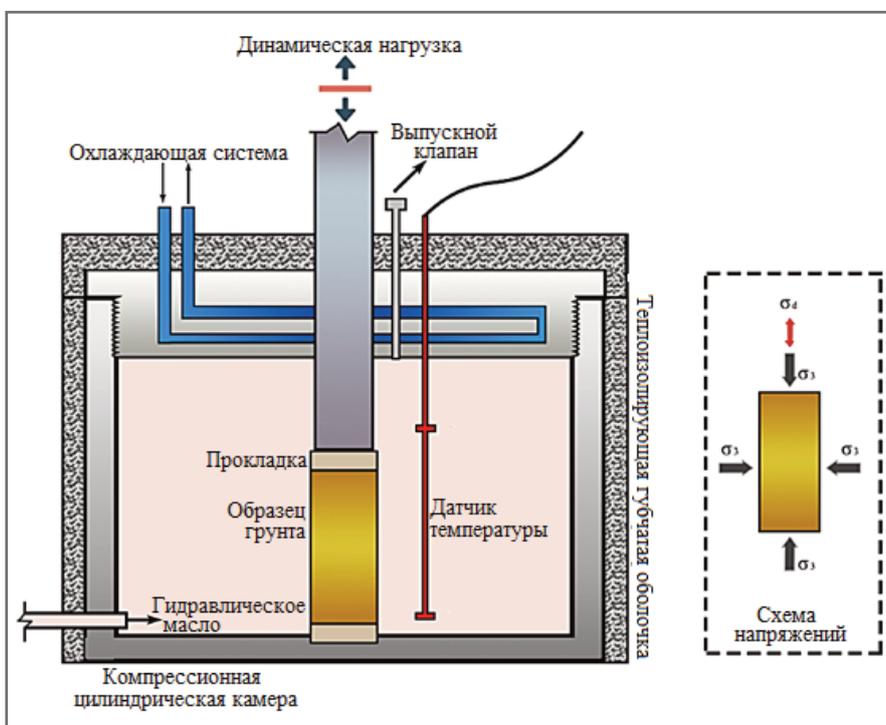


Рис. 6. Схема прибора динамического трехосного сжатия MTS-810 (5T) (по [6])

давления и поддержания отрицательной температуры использовалась полидиметилсилоксановая (ПДМС) жидкость. Данный прибор мог поддерживать температуру до минус 30 °С с колебаниями плюс-минус 0,1 °С.

Авторы статьи [10] выполнили испытания мерзлого грунта на модифицированной установке динамического трехосного сжатия, позволяющей задавать максимальную осевую нагрузку до 20 кН с частотой воздействия до 5 Гц. С помощью данного прибора передавалось всестороннее давление до 1 МПа. Максимальное осевое смещение составляло 100 мм при размере образца 50/100 мм.

В работе [11] представлены результаты испытаний мерзлых грунтов на установке динамического трехосного сжатия, разработанной компанией GDS непосредственно для испытаний мерзлых грунтов (рис. 8). Данный прибор позволяет задавать осевое напряжение до 100 кН и всестороннее давление до 20 МПа. Для передачи всестороннего давления используется авиационное гидравлическое масло. В качестве хладоносителя применяется спирт. Минимальная задаваемая температура составляет минус 30 °С. Испытания можно выполнять на образцах размером 50/100 мм с максимальным осевым перемещением 60 мм.

Авторы работы [12] использовали американский прибор GCTS STX-100, разработанный специально для динамических испытаний мерзлого грунта. Он обладает собственной системой поддержания температуры, которую можно устанавливать от минус 50 °С до плюс 200 °С. Испытания можно проводить с максимальной осевой нагрузкой до 25 кН и частотой воздействия до 10 Гц. Всестороннее давление задается величиной до 2 МПа, а максимальная вертикальная деформация составляет 50 мм. Привод установки – сервогидравлический (рис. 9).

Китайские исследователи выполняют динамические трехосные испытания также на установках собственного производства. К ним относится прибор TWDSZ300 [13]. Он сконструирован с сервогидравлическим приводом, позволяющим реализовывать в первом варианте прибора осевое напряжение до 100 кН с частотой до 40 Гц. Вторая модификация этого прибора позволяет задавать осевое напряжение до 300 кН с частотой воздействия до 10 Гц. В первом и втором вариантах прибора передается всестороннее давление до 30 МПа и до 20 МПа соответственно. Размер образца может составлять 40/80 мм и 50/100 мм. Максимальное осевое перемещение составляет 85 и 100 мм соответственно (рис. 10).

Разработка оборудования для испытаний мерзлых грунтов методом трехосного сжатия ▶

Испытание методом динамического трехосного сжатия подразумевает передачу на образец осевой циклической нагрузки, позволяющей реализовать требуемые амплитуды воздействия. Опыт показывает, что максимальная осевая нагрузка в трехосных динамических приборах для мерзлых грунтов в целом варьирует от 20 до 300 кН. Передача такого значительного усилия на образец, особенно в динамическом режиме, в основном возможна, когда прибор оборудован сервогидравлическим приводом (как в рассмотренных выше примерах). Например, установка TWDSZ300 во второй модификации позволяет испытывать образец в динамическом режиме с усилием до 300 кН с частотой воздействия до 10 Гц. Создание прибора динамического трехосного сжатия с такими широкими возможностями позволит использовать его для испытаний большого количества грунтов в разных условиях. Однако если прибор динамического трехосного сжатия будет скон-

струирован с электромеханическим приводом, реализация такой нагрузки будет технически затруднена и может привести к погрешностям испытаний. В этом случае лучше ограничить диапазон применимости прибора, но при этом увеличить точность измерений.

Следует отметить, что указанная выше значительная осевая нагрузка является лишь верхним граничным пределом некоторых приборов и может не реализовываться при реальных испытаниях. Поэтому определение оптимального значения максимальной осевой нагрузки в приборе трехосного сжатия необходимо проводить с точки зрения практической значимости его реализации под конкретную цель испытания. Для этого проанализируем реальную задаваемую амплитуду колебаний напряжений при динамических трехосных испытаниях мерзлых грунтов по найденным литературным источникам.

В таблице по данным работ [3–16] суммирована информация по некоторым способам испытаний с указанием амплитуды напряжений, частоты воздействия, всестороннего давления, температуры мерзлых грунтов и др. Из таблицы видно, что амплитуда девиатора напряжений задается в широком диапазоне от сотых долей до 7 МПа и выше. При этом испытания с большими амплитудами напряжений чаще встречаются в работах китайских исследователей – обычно с целью достижения предельного уровня деформации от 5 до 15%. Схема их испытаний часто подразумевает передачу на образец множества сту-

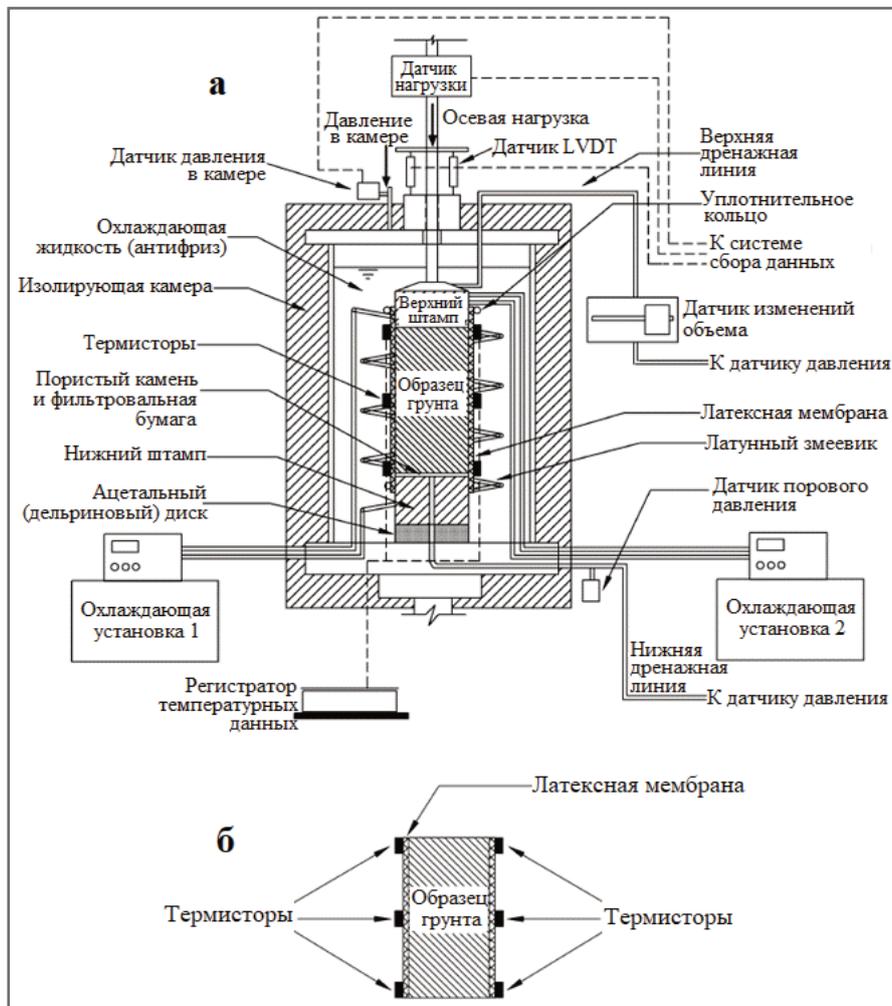


Рис. 7. Конструкция прибора динамического трехосного сжатия MTS TX: а – схема испытательного устройства; б – схема размещения температурных датчиков, зафиксированных на образце грунта (по [7])

пеней, каждая из которых прикладывается одинаковое количество раз до достижения указанного уровня де-

формации. Испытания мерзлых грунтов по такой схеме могут выполняться с амплитудой осевых напряжений



Рис. 8. Установка динамического трехосного сжатия, разработанная компанией GDS для испытаний мерзлых грунтов [11]



Рис. 9. Внешний вид прибора GCTS STX-100 для динамических испытаний мерзлых грунтов [12]



Рис. 10. Внешний вид установки динамического трехосного сжатия TWDSZ300 для испытаний мерзлых грунтов

Таблица. Некоторые из методов испытаний и технических характеристик установок динамического трехосного сжатия мерзлых грунтов по данным работ [3–16]

Макс. осевая нагрузка прибора, кН	Амплитуда колебаний динамических напряжений, МПа	Всестороннее давление, МПа	Размер образца (диаметр/высота), мм	Тип измерения амплитуды	Частота, Гц	Тип (схема) испытаний по колич. ступеней	Прибор	Температура, °С
25	девиатор 0,025; 0,040; 0,043	до 0,03	38/76	пик – пик	6	одно-ступенчатые	GCTS STX-100	-1,5
50	девиатор до 0,3	0,4	61,8/125	пик – пик	1	много-ступенчатые	MTS-810 (5T)	-5
	девиатор 0,7							-15
60	девиатор 0,5	0,2	39,1/80	пик – пик	2	много-ступенчатые	модификация GDS	-1
	девиатор 1,0							-5
	девиатор 3,0							-10
	девиатор 4,4							-15
100	девиатор 0,5	0,5	50/100	пик – пик	0,67	одно-ступенчатые	GDS	-10
	девиатор 0,5–1,5	0,5–3,0						-10
100	осевое до 2,5	0,2	39,1/80	пик – пик	4	одно-ступенчатые	TVDSZ300 № 1	-5
	осевое до 3,8							-10
	осевое до 5,0							-15
100	осевое 0,4–0,6	0,3	61,8/125	пик – пик	2	одно-ступенчатые	MTS-810	-0,5
	осевое 0,4–0,7							-1
	осевое 0,4–0,6							-1,5
100	осевое 1,5	0,2	61,5/125	пик – пик	2	одно-ступенчатые	MTS-810	от -3 до -11
	осевое 1,2–2,7	0,05–0,65						-5
Не менее 42	девиатор 5,0–7,8	0,6–6,0	61,8/125	пик – пик	1	одно-ступенчатые	MTS-810	-15
200	девиатор 0,8–1,1	0,2	50/100	половина	1	одно-ступенчатые	модификация GDS	-3
	девиатор 0,9–1,1							-5
	девиатор 0,9–1,45							-7
	девиатор 0,9–1,8							-9
250	осевое до 0,8	0,5	61,8/120	?	6	много-ступенчатые	MTS-810	-2
	осевое до 1,7							-5
	осевое до 1,8							-7
	осевое до 3,4							-10
	осевое до 3,9							-12

до 8 МПа и выше, иногда при высоком всестороннем давлении.

В целом, на основании проанализированной литературы видно увеличение задаваемой амплитуды напряжений при снижении температуры мерзлого грунта и наоборот. Так, при температуре грунта ниже минус 9 °С диапазон осевых напряжений варьирует от 1 до 8 МПа. Испытания мерзлых грунтов с температурой от минус 3 °С до минус 7 °С проводят с амплитудой от 0,7 до 3,1 МПа. Если рассматривать трехосные испытания мерзлых грунтов высокой температуры от минус 0,5 °С до минус 2 °С, то в них амплитуда осевых напряжений в целом варьирует от 0,06 до 0,8 МПа. На рисунке 11 приведен обобщенный график амплитуды осевых напряжений при некоторых из динамических трехосных испытаний мерзлых грунтов.

Анализ амплитуд динамических осевых напряжений позволил предварительно оценить диапазон их значений, реализуемый фактически. Используя эти значения и зная размеры образцов мерзлого грунта, можно вычислить прикладываемую на практике осевую нагрузку. На рисунке 12 приведены результаты расчетных осевых нагрузок, необходимых для проведения динамических испытаний мерзлых грунтов.

По результатам расчетов видно, что диапазон передаваемых на образец осевых нагрузок колебался от 0,2 кН до почти 50 кН. При этом чем ниже температура грунта, тем большую динамическую нагрузку задавали исследователи при трехосных испытаниях. При температуре мерзлого грунта ниже минус 9 °С осевую нагрузку задавали с амплитудой от примерно 8 кН до 47 кН. На мерзлый грунт с температурой от минус 3 °С до минус 7 °С передавали динамическую осевую нагрузку от примерно 6 кН до 32 кН. Трехосные испытания мерзлых грунтов с температурой выше минус 2 °С были выполнены с осевой нагрузкой от 0,2 до 10 кН (см. рис. 12).

Конструирование прибора трехосного сжатия с реализацией той или иной осевой нагрузки может быть проведено в зависимости от цели его разработки. Это объясняется высокой зависимостью требований к техническим характеристикам оборудования от температуры мерзлого грунта (или, скорее, от его жесткости) (см. рис. 12). Соответственно, для испытаний высокотемпературных мерзлых грунтов динамический стабилометр может быть разработан с более низкими возможностями передачи осевой нагрузки. Например, для мерзлых

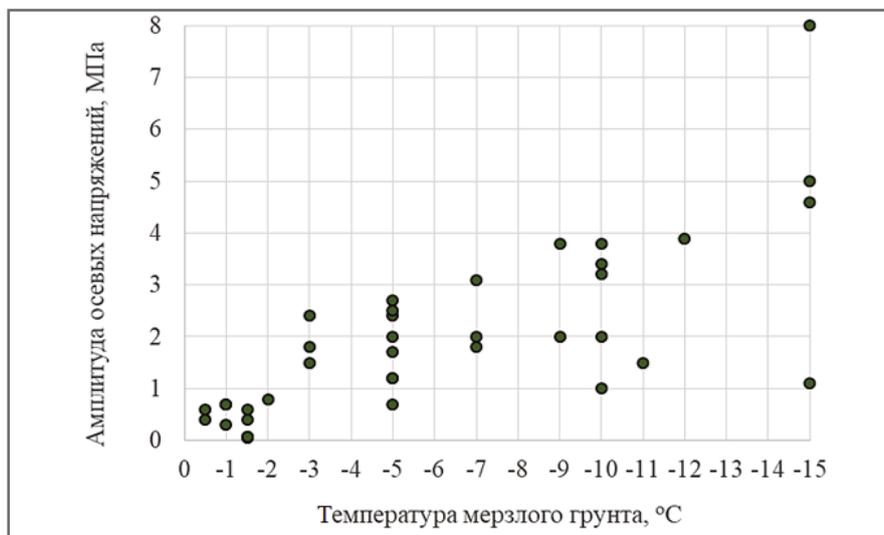


Рис. 11. Амплитуды колебаний осевых напряжений при динамических трехосных испытаниях мерзлых грунтов с разной температурой (амплитуда дана от пика до пика нагрузки) по данным работ [3–16]

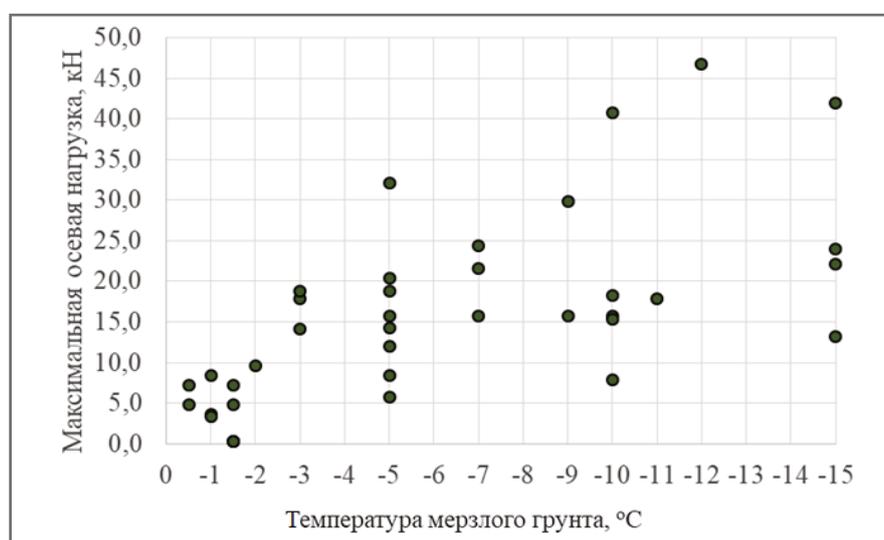


Рис. 12. Расчетная максимальная осевая нагрузка при трехосных динамических испытаниях мерзлых грунтов с разной температурой по данным работ [3–16]

грунтов с температурой выше минус 3 °С прибор должен иметь возможность передачи нагрузки как минимум до 10–15 кН. Подобные значения можно реализовать в динамическом стабилометре с электромеханическим приводом. Если разработка прибора направлена на испытания мерзлых грунтов с широким диапазоном особенностей состава, строения и свойств, то осевую нагрузку необходимо увеличить. В данном случае увеличение осевой нагрузки, вероятно, потребует применения сервогидравлического привода. При этом следует понимать, что температура грунта не может абсолютно характеризовать его состояние, так как оно зависит от комплекса свойств, например от степени дисперсности, засоленности и пр. В связи с этим лучше ориентиро-

ваться на общую жесткость и прочность мерзлых грунтов, динамические испытания которых планируется проводить.

Как видно из приведенных данных, в подавляющем большинстве случаев исследователи проводят испытания мерзлых грунтов динамическим трехосным сжатием с контролем напряжений. Лишь некоторые из них используют схемы с передачей на образец амплитуды деформаций. В литературе встречаются данные амплитуды осевой деформации от 0,005 до 0,1%.

Частота колебаний при динамических трехосных испытаниях мерзлых грунтов задается в зависимости от исследуемого источника воздействия. Ее диапазон в целом соответствует таковому при испытаниях немерзлых грунтов и колеблется от 1 до 6 Гц (см. таблицу).

При разработке прибора динамического трехосного сжатия рекомендуется реализовать возможность нагружения с частотой воздействия до 10 Гц.

В заключение кратко приведем некоторые из общих рекомендаций, которые относятся к конструированию резонансной колонки и трехосного прибора (их более полное описание представлено в статье [1]). Проблему проскальзывания (подвижности) образцов в ходе испытаний можно решить путем примораживания мерзлого грунта к прибору, используя при этом стальные штампы с нанесенными на них насечками.

Конструкция динамического стабилометра должна позволять реализовывать всестороннее давление до значений 0,3–0,4 МПа. В некоторых из работ используются приборы, максимальное всестороннее давление с помощью которых задается до 20–30 МПа, что для решения геотехнических задач оказывается излишним. Ведь в большинстве случаев важно понимание динамического поведения мерзлого грунта в пределах 10–15 м от поверхности. В качестве незамерзающей жидкости для передачи всестороннего давления применимы силиконовые масла, спиртовые растворы и антифризы. Данные работы [17] показывают, что наилучшая сходимость в результатах динамических испытаний мерзлых грунтов наблюдается при использовании оболочки из хлоропренового каучука (искусственного каучука) в сочетании с силиконовым маслом.

Для испытаний грунтов с отрицательной температурой может быть использована система охлаждения, разработанная ранее компанией ООО НПП «Геотек». Для мониторинга температуры испытания рекомендуется использовать несколько высокоточных температурных датчиков, установленных в разных частях стабилометра непосредственно в теле образца и/или на его внешней поверхности (например, датчики могут быть смонтированы в верхний и нижний штампы) и в объеме камеры.

Отдельным вопросом является необходимость измерения порового давления в ходе испытаний. В целом, добавление в динамические приборы возможности измерения порового давления в мерзлых грунтах вряд ли будет иметь большое значение. В твердомерзлых грунтах вся свободная вода находится в мерзлом состоянии – соответственно, поровое давление в них равно нулю. В высокотемпературных грунтах, даже на границе фазового перехода, часть оттаявшей воды создает лишь незначительное поровое давление. Рациональность его измерения может быть подчеркнута исключительно научной постановкой задачи. Конечно, большое количество исследований мерзлых грунтов сопровождается также изучением их динамического поведения при оттаивании [14] (иногда циклическом), что актуально в связи с сезонным изменением свойств. В этих случаях важно отслеживать динамику порового давления. Поэтому для увеличения универсальности

разрабатываемых установок, а именно для дополнительной возможности изменений порового давления в талых грунтах, можно оснастить их данной опцией.

Выводы ►

Рассмотрены конструкции и технические характеристики приборов динамического трехосного сжатия мерзлых грунтов, модифицируемых с 1970-х годов до настоящего времени. На основании опыта зарубежных исследователей даны рекомендации по разработке их отечественного аналога. Так, максимальное значение осевой нагрузки, реализуемое в приборах, должно выбираться исходя из цели их конструирования, но быть не менее 10 кН. При этом следует учитывать особенности состава, строения и свойств мерзлых грунтов, испытания которых планируются. Оборудование должно реализовывать частоту нагружения до 10 Гц и всестороннее давление до 0,3–0,4 МПа. Комплектующие такого прибора должны позволять испытывать грунт при постоянной отрицательной температуре, в частности они должны быть оборудованы термодатчиками, незамерзающей жидкостью, теплоизоляцией и пр. Добавление возможности измерений порового давления в динамические стабилометры для мерзлых грунтов является необязательным. При этом наличие такой опции позволит более широко использовать данное оборудование, например для проведения испытаний оттаивающих грунтов. **и**

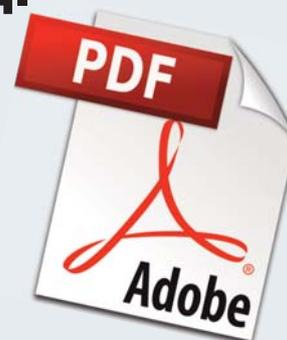
Список литературы ►

1. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 3. Оборудование для испытаний мерзлых грунтов методом резонансной колонки // ГеоИнфо. Т. 6. № 5.
2. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 2. Испытания методом трехосного сжатия // ГеоИнфо. Т. 6. № 3.
3. Vinson T.S. Chaichanavong Th. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions: research report MSU-CE-76-4. Michigan, USA: Division of Engineering, Michigan State University, 1976. 288 p.
4. Liu E., Lai Yu., Liao M. Fatigue and damage properties of frozen silty sand samples subjected to cyclic triaxial loading // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53. № 12. P. 1939–1951. DOI:10.1139/cgj-2016-0152.
5. Li Q., Ling X., Sheng D. Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading. Part I. Experimental investigation // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 125. P. 138–151.
6. Lv 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. Article 3985. DOI:10.3390/polym14193985.
7. Yu Zhang. Impact of Freeze-Thaw on Liquefaction Potential and Dynamic Properties of Mabel Creek Silt: Ph.D. Thesis. 2009. 191 p.
8. 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. № 9, Article 102938. DOI:10.1016/j.coldregions.2019.102938.
9. Xu X., Li Q., Xu G. Investigation on the behavior of frozen silty clay subjected to monotonic and cyclic triaxial loading // Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15. № 3. P. 1289–1302. DOI:10.1007/s11440-019-00826-6.

10. 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.
11. Xu X., Zhang W., Fana C., Laid Yi., Wu J. Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model // Road Materials and Pavement Design. 2019. Vol. 22. № 4. P. 1–17. DOI:10.1080/14680629.2019.1696221.
12. 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. 2022. Vol. 1. P. 1–8. DOI:10.1155/2022/7548284.
13. An L.S., Ling X.Z., Geng Y.C., Li Q., Zhang F., Wang L. Dynamic and static mechanical properties of ice-rich frozen sand // Electron. J. Geotech. Eng. 2017. № 22. P. 1325–1344.
14. 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. Vol. 57. № 1. P. 7–12.
15. Li Q., Ling X., Hu J., Xu X. Experimental investigation on dilatancy behavior of frozen silty clay subjected to long-term cyclic loading // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 153. DOI:10.1016/j.coldregions.2018.05.008.
16. Ling X., Li Q., Wang L., Zhang F. Stiffness and damping ratio evolution of frozen clays under long-term low-level repeated cyclic loading: experimental evidence and evolution model // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. № 5. P. 45–54. DOI:10.1016/j.coldregions.2012.11.002.
17. Yu X., Sun R., Yuan X., Chen Zh., Zhang J. Resonant column test on the frozen silt soil modulus and damping at different temperatures // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017. Vol. 61. № 4. P. 762–769. DOI:10.3311/PPci.10349.

Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

**С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.**



WWW.GEOINFO.RU