

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОЙ КОЛОНКИ

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

Механическое поведение немерзлых и мерзлых грунтов при динамических нагрузках значительно различается. Так, по результатам испытаний в резонансной колонке динамический модуль сдвига первых может превосходить модуль вторых в десятки раз, коэффициент поглощения – в несколько раз, резонансная частота может достигать сотни герц и т. д. Это не позволяет использовать для испытаний мерзлых грунтов обычные резонансные колонки. В этом случае либо погрешность результатов окажется очень высокой, либо не удастся завершить эксперимент в целом. Поэтому для динамических испытаний мерзлых грунтов необходима разработка специализированного оборудования.

В представленной статье приведен зарубежный опыт модифицирования резонансной колонки для испытаний мерзлых грунтов начиная с 1970–1980-х годов и до настоящего времени. С учетом иностранных разработок и на основании обобщения показателей динамических свойств мерзлых грунтов даны рекомендации по разработке отечественного варианта резонансной колонки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

мерзлые грунты; динамические свойства; лабораторные испытания; испытания в резонансной колонке; модификация резонансной колонки.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 3. Оборудование для испытаний мерзлых грунтов методом резонансной колонки // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 5. С. 14–21
DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-5-14-21

DYNAMIC PROPERTIES OF FROZEN SOILS. PART 3. EQUIPMENT FOR TESTING FROZEN SOILS USING THE RESONANT COLUMN METHOD

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

The mechanical behavior of unfrozen soils and frozen ones under dynamic loads differs significantly. For example, according to the results of resonant column tests, the dynamic shear modulus of unfrozen soils can exceed that of the frozen ones by tens of times, the absorption coefficient can exceed by several times, the resonant frequency can reach hundreds of hertz, etc. This does not allow the use of conventional resonant columns for testing frozen soils. In this case, either the error of the results will be very high, or it will not be possible to complete the experiment as a whole. Therefore, for dynamic tests of frozen soils, it is necessary to develop specialized equipment.

The article presents foreign experience in modifying a resonant column for testing frozen soils from the 1970–1980s to the present. Taking into account foreign developments and on the basis of the generalization indicators of the dynamic properties of frozen soils, recommendations are given for developing a domestic version of a resonant column.

KEYWORDS:

frozen soils; dynamic properties; laboratory tests; resonant column tests; resonant column modification.

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Idrisov I.H., Mosina A.S. Dinamicheskiye svoystva merzlykh gruntov. Chast'3. Oborudovaniye dlya ispytaniy merzlykh gruntov metodom rezonansnoy kolonki [Dynamic properties of frozen soils. Part 3. Equipment for testing frozen soils using the resonant column method] // Geoinfo. 2024. Vol. 6. № 5. S. 14–21 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-5-14-21 (in Rus.).

Опыт испытаний мерзлых грунтов на резонансных колонках разных модификаций ►

Первые резонансные колонки для испытаний мерзлых грунтов начали создаваться в 1970–1980-х годах. Они не были оснащены самостоятельным контуром охлаждения, их помещали в морозильные камеры или морозильные комнаты. Так, в работе [1] приводится подробное описание принципов модификации резонансной колонки типа Hardin для испытаний мерзлых грунтов высокой жесткости. Для снижения возникающих колебаний испытательной системы резонансная колонка была смонтирована на виброизоляционном столе. В верхней части прибора для предотвращения движения двух постоянных магнитов установили дополнительный элемент, а основание установки значительно утяжелили. Дополнительное увеличение жесткости системы было проведено путем замены верхнего штампа с алюминиевого на стальной. Крутящий момент данной установки на единицу вращения составлял $2,9 \cdot 10^6$ г*см/рад.

В работе [1] указывается, что испытания в данной установке можно выполнять с амплитудой деформации от 10^{-8} и выше. Для увеличения сцепления образца с установкой при испытании задавали небольшое вертикальное напряжение, равное 10 кПа. Кроме того, на стальные штампы наносили слой воды для примораживания образца (в целях предотвращения проскальзывания). Цилиндр из акрилового пластика был удален. По сути, испытания проводили в одноосном режиме. Для контроля возникающих в установке вибраций были смонтированы 4 акселерометра – на основании резонансной колонки, штампах и в верхней части. По результатам предварительных испытаний на нижнем штампе была зафиксирована вибрация, в связи с чем он был полностью удален. Таким образом, образец разместили непосредственно на утяжеленном нижнем основании (рис. 1). Однако данная модификация резонансной колонки оказалась недостаточной – испытания показали повышенные вибрации в основании и верхней части установки,

а модуль сдвига материала отличался от реального.

В работе [2] описываются испытания мерзлого грунта и льда на резонансной колонке Stevens, выполненные в 1975 году (рис. 2). Эта установка не обладала собственным контуром охлаждения и была размещена в морозильной камере. Ее конструкция предусматривала передачу на образец как крутильных, так и продольных колебаний. Крутильные колебания передавались от двух вибромоторов (масса каждого составляла 11,3 кг) на вал, который был соединен с верхней и нижней плитами пружиной. Вертикальные колебания передались от нижнего вибродвигателя массой около 23 кг. Испытания мерзлых грунтов с применением данной установки возможны до частоты воздействия более 1000 Гц. При этом амплитуду деформаций можно задавать как минимум в диапазоне 10^{-6} – 10^{-5} . Проскальзывание образца исключалось примораживанием его торцов к установке.

Канадские исследователи в работе [3] в 1982 году представили результаты разработки прибора для статических и

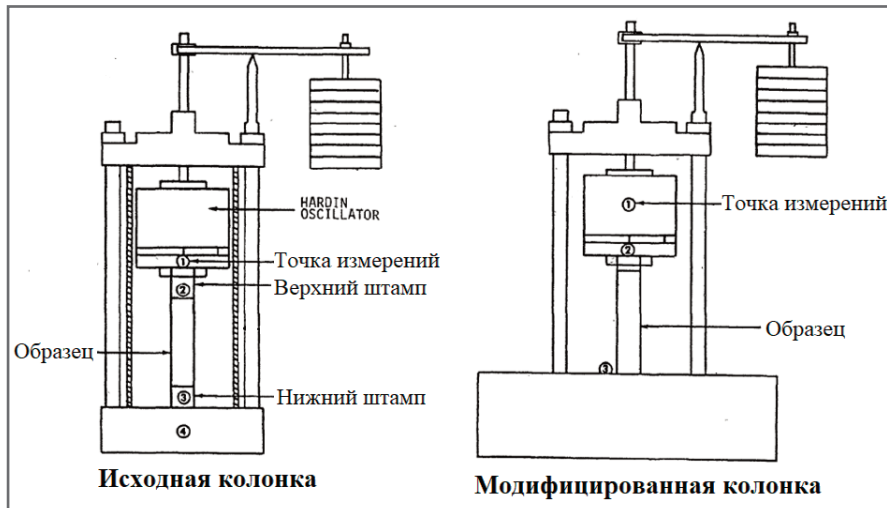


Рис. 1. Схема резонансной колонки типа Hardin до и после модификации (по [1])

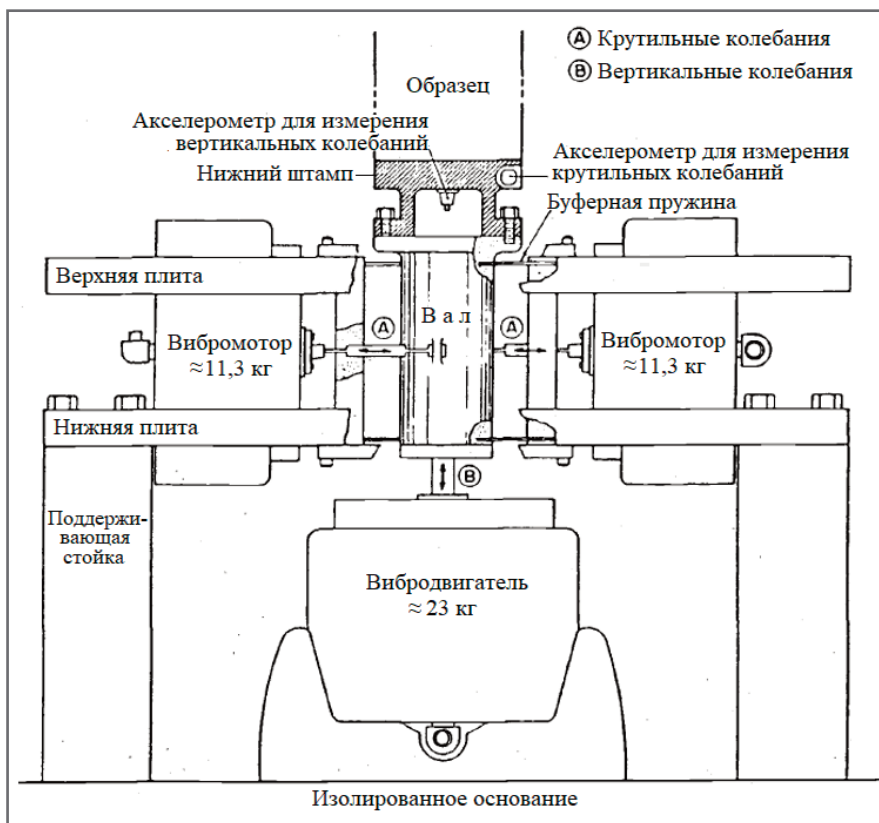


Рис. 2. Резонансная колонка Stevens (по [2])

динамических испытаний льда и мерзлых грунтов для исследований их ползучести. Это устройство сконструировано таким образом, что на нем можно одновременно проводить испытания двух образцов: первого – при статическом приложении нагрузки, второго – при статической и динамической нагрузках. Второй образец подвергается статическому осевому напряжению, равному напряжению для первого образца, а также синусоидальным крутильным колебаниям, приложенным к его основанию. Для создания динамических нагрузок за основу взята резонансная колонка ти-

па free-free. Принципиальная схема, иллюстрирующая конструкцию такого оборудования для динамических испытаний, показана на рисунке 3. Собственная резонансная частота этого устройства составляет 32,15 Гц, диапазон задаваемой частоты воздействия находится в пределе от 0 до 1000 Гц.

Авторы работы [4] выполнили динамические испытания мерзлых грунтов на резонансной колонке типа Stokoe достаточно стандартной конструкции. Система привода состояла из подвижного штампа, приводных катушек, генератора синусоидальных колебаний и усилителя

мощности. Крутильные колебания измерялись с помощью акселерометра, прикрепленного к приводной пластине со скоростью 40 000 проб/с. Для улучшения сцепления и предотвращения проскальзывания образца на штампах были сделаны насечки, а сам образец был заморожен путем добавления слоя воды на его торцевые части. Расчетный крутящий момент данной установки составлял 0,43 Н*м. Она позволяла реализовать частоты как минимум до 400 Гц с амплитудой деформаций от 10^{-6} .

Английские ученые представили в работе [5] итоги ряда экспериментов и численных расчетов с целью изучения влияния жесткости образца, массы прибора и прочего на результаты испытаний в резонансной колонке. Было установлено, что из всех типов резонансных колонок для испытаний жестких материалов лучше всего подходит именно колонка Stokoe типа fixed-free. Она обладает относительно высоким крутящим моментом. При использовании же резонансной колонки Stokoe типа «free-free» отсутствуют сложности с фиксацией образца, однако возникают проблемы с жесткостью соединений каналов. На основании анализа результатов испытаний и численного моделирования были обнаружены, что значительные отклонения показателей динамических свойств жестких материалов от реальных значений могут возникать из-за гибкости приводной головки, слабых соединений приводных магнитов, плохой фиксации образца и малой массы основания устройства. Так, при испытании на обычной резонансной колонке Stokoe модуль сдвига калибровочного стержня из алюминия оказался примерно на 25% ниже его реального значения.

Авторы работы [5] установили, что предотвратить получение недостоверных результатов при динамических испытаниях жестких грунтов можно путем модификации резонансной колонки по следующим принципам. Для недопущения вибрации основания требуется, чтобы либо прибор был прочно соединен с полом лаборатории, либо его основание имело значительную массу. Первый из вариантов в реальности достаточно тяжело осуществить, так как обычно для удобства приборы устанавливаются выше уровня талии. Такая установка зачастую является нежесткой и влияет на данные испытаний. По результатам исследований было установлено, что при испытании жестких материалов для удовлетворительной точности измерений их резонансных частот

необходимо, чтобы массовый полярный момент инерции основания резонансной колонки был как минимум в 100 раз больше, чем у привода кручения. В этом случае вибрация основания составит менее 1% от вибрации образца. Для более высокой точности измерений резонансных частот жестких материалов, чтобы их отклонения от реальных значений были в районе 0,1%, массовый полярный момент инерции основания должен быть в 500 раз больше, чем у привода кручения. Если отличие между данными моментами будет 50-кратным, то измеряемая частота может отличаться от реальной на 1% и более. Для предотвращения изгиба привода и его элементов магниты на нем необходимо закрепить цианоакрилатным ударопрочным клеем.

Исследователи из Китая [6] использовали для испытаний мерзлых грунтов обычную резонансную колонку производства компании GDS, переоборудованную под отрицательную температуру. В конструкцию установки был добавлен охлаждающий контур – обмотка образца медной трубкой по типу змеевика. Дополнительно для поддержания отрицательной температуры камера была теплоизолирована теплозащитной крышкой. Контроль температуры осуществлялся термопарой в испытательной камере (рис. 4). Расчетный крутящий момент установки составил примерно $2,9 \text{ Н*м}$. Параметры резонансной колонки указаны в таблице.

В работе [6] также оценивается влияние разных сред, используемых для передачи всестороннего давления, и материалов оболочки на показатели динамических свойств мерзлых грунтов. Было выявлено, что при передаче всестороннего давления с помощью антифриза и сжатого воздуха при оболочке из натурального каучука фиксируется значительная разница в модулях сдвига и коэффициентах поглощения близких по строению образцов мерзлого грунта. При испытании мерзлого грунта с применением силиконового масла и искусственного (хлоропренового) каучука наблюдается малый разброс в показателях динамических свойств мерзлых грунтов (рис. 5). В связи с этим, по мнению авторов работы [6], сочетание силиконового масла и хлоропренового каучука наилучшим образом подходит для испытаний мерзлых грунтов в резонансной колонке.

Позже, в 2018 году, китайские исследователи выпустили работу [7], в которой привели результаты испытаний

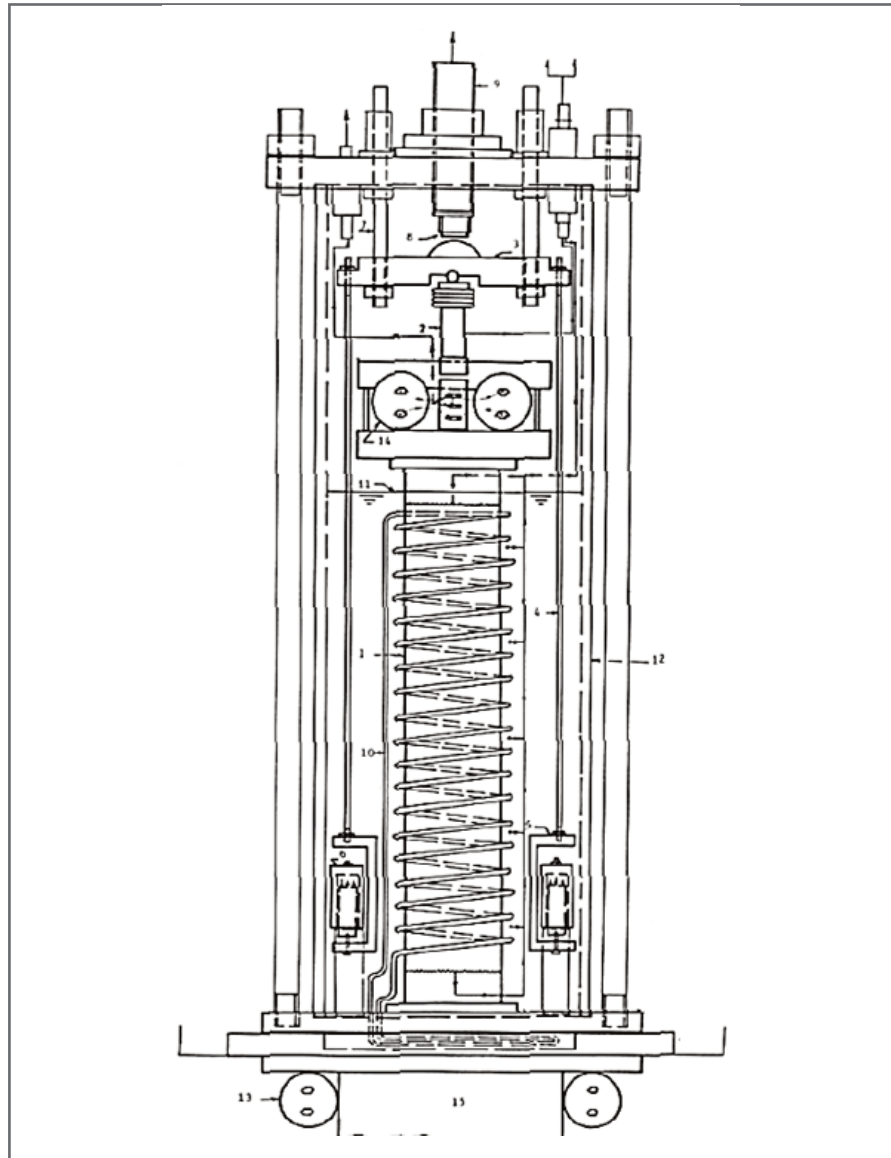


Рис. 3. Конструкция прибора, описанного в работе [3]: 1 – образец мерзлого грунта; 2 – датчик давления и упорный подшипник; 3 – нагрузочная балка; 4 – натяжные стержни для передачи нагрузки со скобы; 5 – латунная скоба для передачи статической нагрузки от штока на натяжные стержни; 6 – поршень и цилиндр; 7 – два выравнивающих стержня для предотвращения наклона образца; 8 – бесконтактный датчик вертикального перемещения; 9 – резьбовая втулка для фиксации датчика перемещений; 10 – внутренний охлаждающий контур (змеевик); 11 – антифриз; 12 – наружная акриловая камера; 13 – активные (подвижные) датчики скорости; 14 – пассивные (неподвижные) датчики скорости; 15 – вибрационное устройство

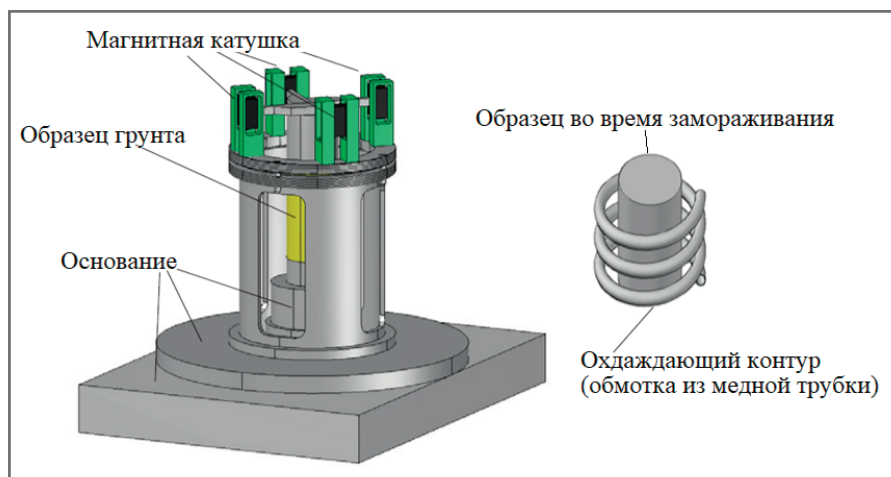


Рис. 4. Схема резонансной колонки производства компании GDS (по [6])

Таблица. Параметры резонансной колонки производства компании GDS (по [7])

Параметр	Значение
Размер образца	50/100 мм
Всестороннее давление	0–1000 кПа +/- 1 кПа
Напряжение возбуждения	0,001–1 В
Частота воздействия	5–1000 Гц
Шаг частоты	0,01 Гц
Диапазон деформации сдвига	10^{-7} – 10^{-4}
Температура в камере	$> -25 \pm 1$ °C

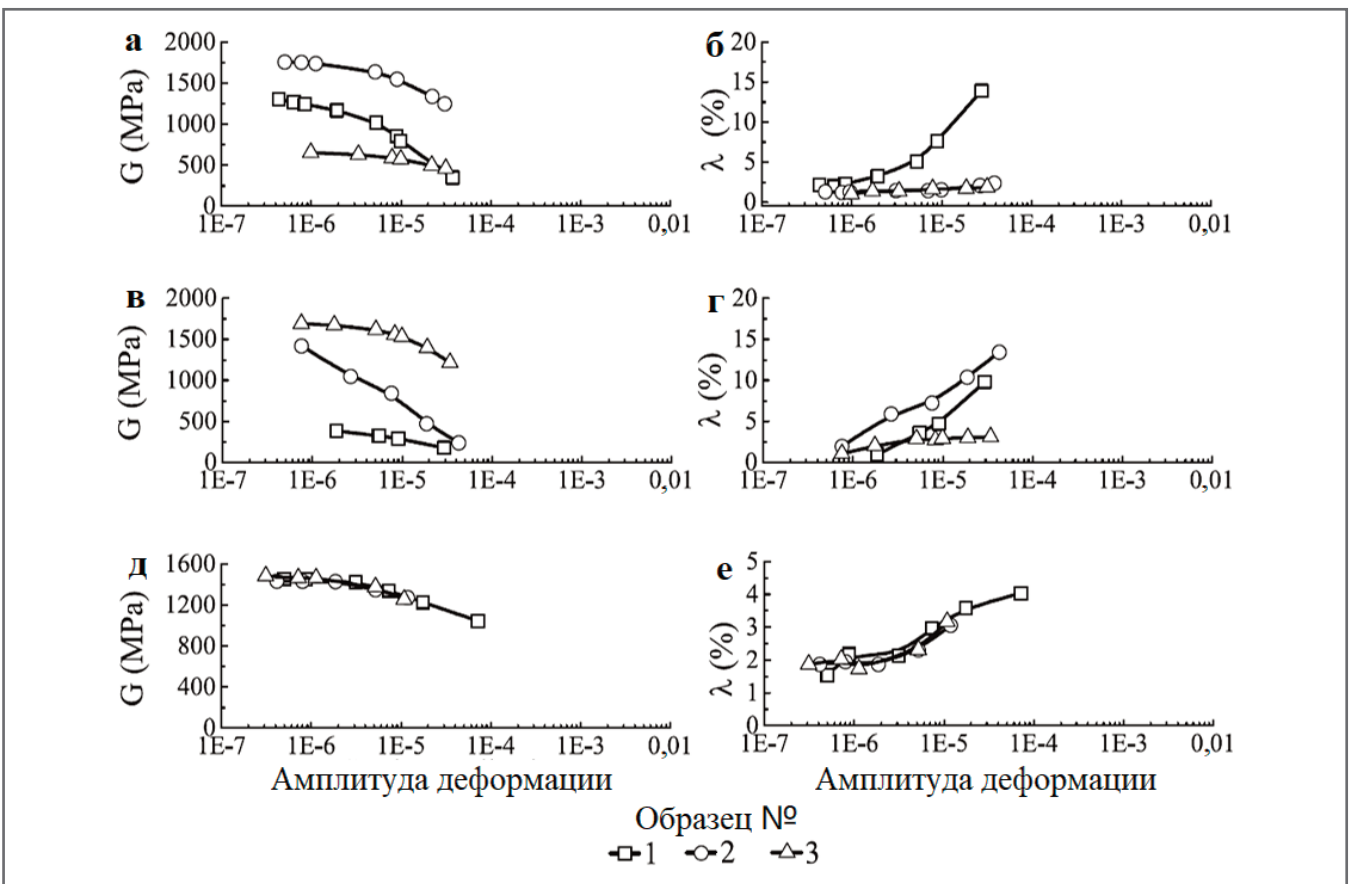


Рис. 5. Результаты испытаний мерзлого пылеватого грунта в резонансной колонке: а, б – по схеме «антифриз + натуральный каучук»; в, г – по схеме «сжатый воздух + натуральный каучук»; д, е – по схеме «силиконовое масло + искусственный (хлоропеновый) каучук» (по [6])

мерзлых грунтов, по-видимому, на вышеописанной (см. рис. 4) или схожей с ней модифицированной резонансной колонке производства компании GDS. Приведем некоторые дополнительные сведения, детализирующие конструкцию данного прибора. Для увеличения жесткости резонансной колонки в соответствии с публикацией [5] был увеличен массовый полярный момент инерции ее основания. С этой целью колонку жестко прикрепили к стальному столу с массовым полярным моментом инерции $46,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Поддержание отри-

цательной температуры осуществлялось таким же образом, как и в работе [6]. Контроль температуры испытания осуществлялся температурным датчиком, расположенным внутри камеры давления на расстоянии 2 см от образца.

Китайские ученые выполняли динамические испытания мерзлых грунтов также и на приборах собственного производства. Однако описание их особенностей в доступной литературе иногда приведено недостаточно подробно. Одной из современных китайских установок является резонансная колонка

DGZ-1, сконструированная Институтом инженерной механики Китая. Ее разработка выполнялась для динамических испытаний жестких материалов, в том числе, например, скальных грунтов [8]. Общий вид этой установки приведен на рисунке 6. Она обладает собственной системой охлаждения. Диапазон реализуемой частоты воздействия варьирует от 5 до 300 Гц. С помощью резонансной колонки DGZ-1 можно испытывать образцы по двум схемам нагрузки:

- 1) с амплитудой деформации 10^{-6} – 10^{-4} ;
- 2) с амплитудой деформации 10^{-7} – 10^{-5} .

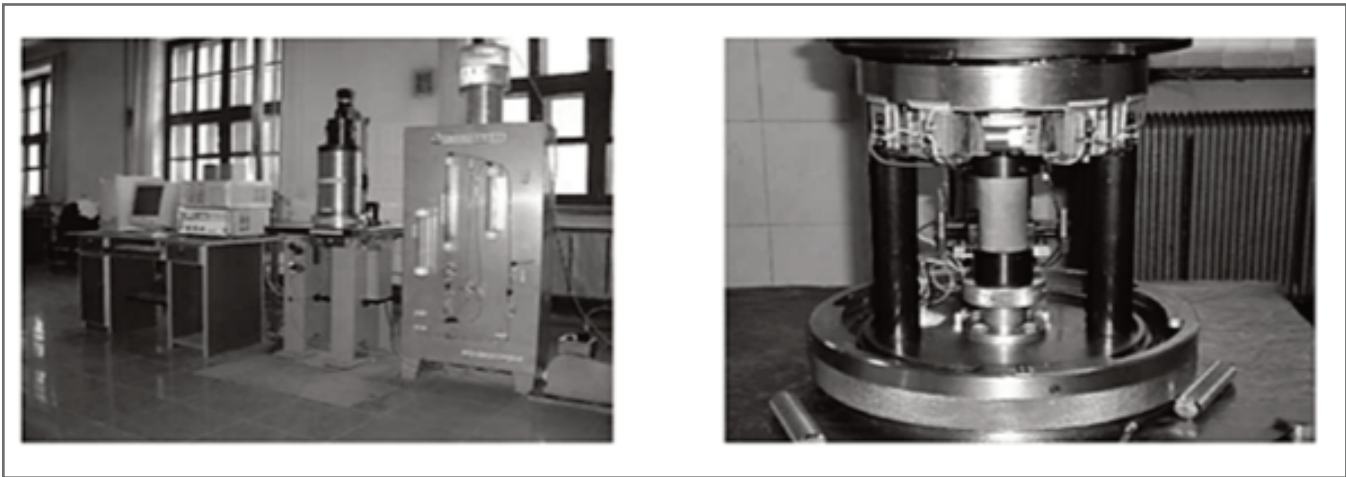


Рис. 6. Общий вид резонансной колонки DGZ-1 [8]

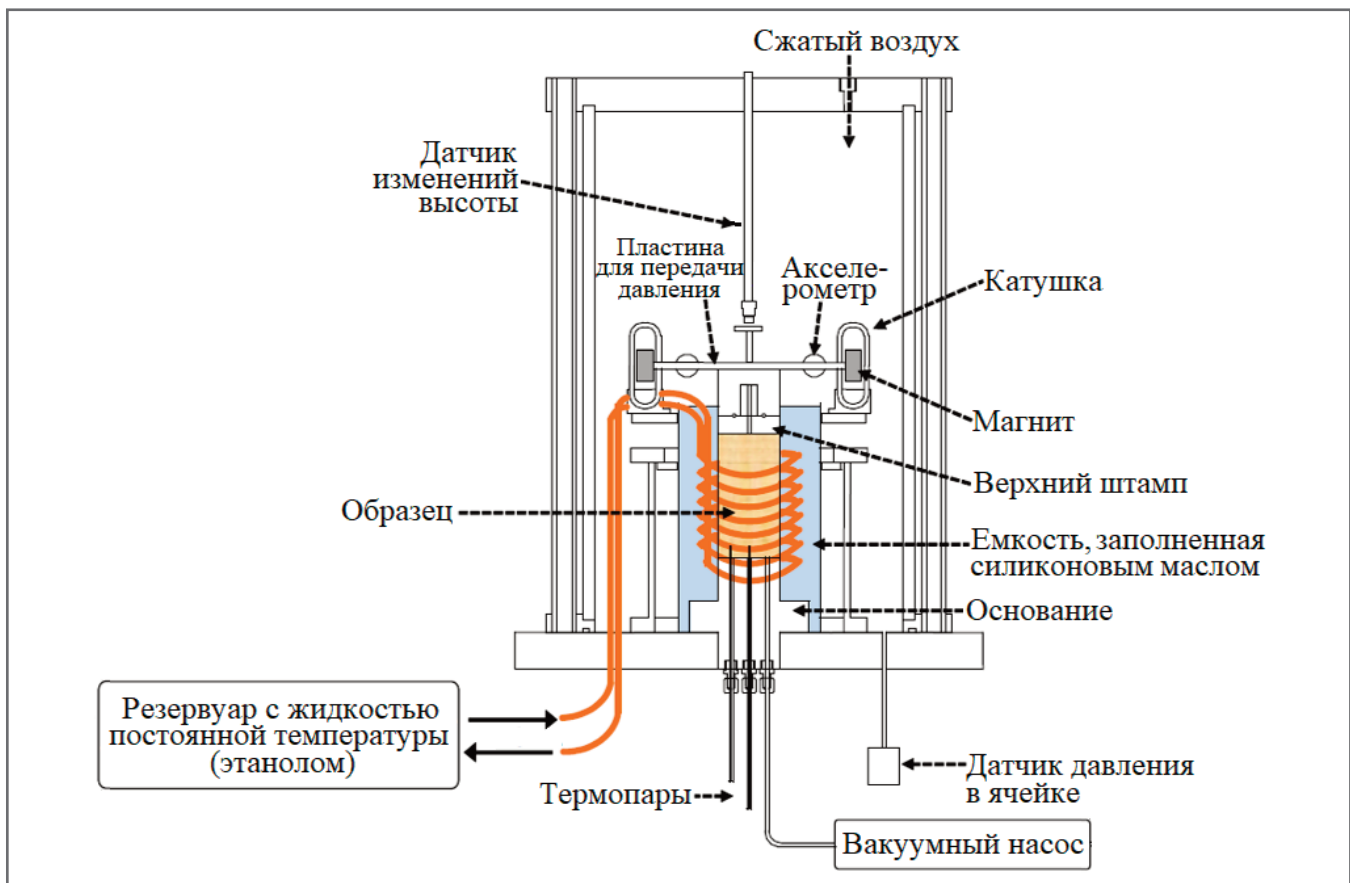


Рис. 7. Схема резонансной колонки типа Stokoe (по [9])

Первая схема, по работе [8], предназначена для испытаний дисперсных грунтов, вторая – для скальных. Максимальный момент инерции установки составляет 3 Н*м , полярный момент инерции подвижного штампа равен $140,3 \text{ кг/см}^2$. В данной резонансной колонке можно испытывать образцы размером $40/80 \text{ мм}$. Также в работе [8] приведены результаты анализа погрешности динамического модуля сдвига; при снижении реального модуля сдвига разница между экспериментальным и расчетным значениями уменьшалась.

При модуле сдвига менее 900 МПа сходимость была достаточно высокой. При жесткости образца, сопоставимой с жесткостью оборудования, снижалась резонансная частота материала, что приводило к снижению его модуля сдвига.

Исследователи из Южной Кореи [9] выполнили испытания мерзлых грунтов на резонансной колонке типа Stokoe (рис. 7). Передача всестороннего давления на образец производилась пневматически – путем передачи давления сжатого воздуха на силиконовое масло. На верхней подвижной платформе было

закреплено два акселерометра. Деформации измерялись бесконтактным датчиком деформаций Proximity (Proximity) Bently Nevada. Резонансная колонка была оборудована системой охлаждения, обернутой вокруг образца по типу змеевика. Медные охлаждающие трубки находились во внутренней камере передачи бокового давления. В качестве хладоносителя использовали этанол. В прибор с нижней стороны образца (в нижнее основание) были установлены два датчика контроля температуры – термопары типа К. Диаметр датчиков

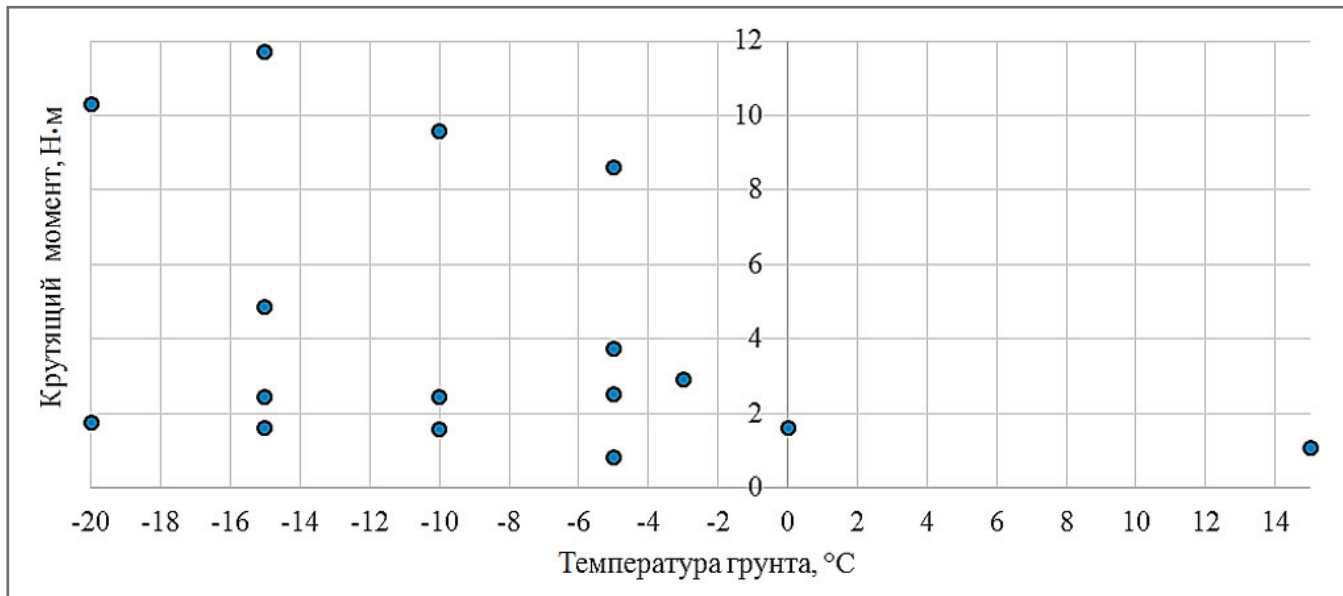


Рис. 8. Максимальные крутящие моменты резонансных колонок при испытаниях мерзлых грунтов разной температуры по расчетным и техническим характеристикам приборов

составлял 2 мм. Они возвышались над основанием на 1 см.

Основные направления разработки оборудования для испытаний мерзлых грунтов методом резонансной колонки

Анализ опыта испытаний мерзлых грунтов на резонансной колонке позволяет выделить основные направления ее разработки.

В первую очередь следует учитывать значительную жесткость мерзлых грунтов, которая может привести к колебанию самой установки и ее составных частей и, как следствие, к некорректным результатам экспериментов. Такое негативное влияние прибора можно предотвратить путем увеличения его собственной жесткости. В первую очередь следует конструктивно обеспечить неподвижность резонансной колонки. Так как фиксация установки путем прикрепления к полу лаборатории не всегда возможна, то наиболее эффективным методом представляется увеличение массового полярного момента инерции ее основания. В целом для выполнения динамического испытания мерзлого грунта массовый полярный момент инерции основания можно установить как минимум в 100 раз выше, чем у привода кручения [5]. Кроме того, необходимо обеспечить жесткость крепления к резонансной колонке остальных комплектующих. Например, предупредить изгиб приводной головки можно с помощью прочного крепления магнитов к ее основанию ударопрочным цианоакрилатным клеем.

Второй проблемой, возникающей вследствие высокой жесткости мерзлого грунта, является необходимость передачи на образец значительных усилий для реализации крутильных колебаний с заданным уровнем деформации. Величина усилия зависит от способности мерзлого грунта к деформированию, которая со снижением температуры грунта значительно падает. Это обстоятельство требует передачи на образец все большей амплитуды крутильных колебаний. К сожалению, в проанализированной литературе не для всех типов резонансных колонок приведены величины максимального крутящего момента. В связи с этим значения прикладываемого крутящего момента в используемых установках были получены расчетными методами по показателям динамических свойств мерзлых грунтов, представленным в работах иностранных исследователей (см. 1-ю часть цикла настоящих статей). Расчеты выполнялись по следующим формулам:

$$M_z = \tau \cdot I_p \cdot r$$

$$\tau = G_{\max} \cdot \gamma$$

$$I_p = \pi \cdot r^4 / 2$$

где M_z – максимальный крутящий момент резонансной колонки, Н*м; τ – максимальное касательное напряжение (Па), вызывающее максимальную деформацию сдвига; I_p – полярный момент инерции, м⁴; G_{\max} – начальный модуль сдвига мерзлого грунта, Па; γ – деформация сдвига.

С помощью расчетов были получены крутящие моменты, прикладываемые

при испытаниях мерзлых грунтов с разной температурой (рис. 8). В целом, исходя из произведенных вычислений и на основании проанализированной литературы, можно сказать, что максимальный крутящий момент в резонансных колонках варьирует от первых Н*м до 12 Н*м. При этом необходимость реализации высокого крутящего момента – выше 4 Н*м возникает в основном при температуре ниже минус 6 °С. Для динамических испытаний мерзлых грунтов с меньшей температурой максимальный крутящий момент разрабатываемой установки можно установить до 4 Н*м.

Следующим важным обстоятельством является необходимость расширения диапазона задаваемой амплитуды деформаций резонансной колонки из-за низкой деформируемости мерзлых грунтов. Так, для получения начального модуля сдвига (с фиксацией характерной «полки» на графике) исследователи в некоторых работах задают амплитуду деформации начиная с 10⁻⁸. При разработке резонансной колонки наилучшим вариантом является реализация диапазона деформации сдвига в диапазоне 10⁻⁸–10⁻⁵, приемлемым вариантом – 10⁻⁷–10⁻⁴.

Исследование динамического поведения мерзлого грунта в резонансной колонке предполагает определение его резонансной частоты. К сожалению, в проанализированной литературе приводится малое количество данных о резонансной частоте мерзлых грунтов, что не позволяет в точности установить рекомендации по ее диапазону. Частные

результаты исследований говорят о том, что резонансная частота мерзлого грунта с температурой ниже минус $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превосходит 330 Гц, а если опираться на данные исследователей прошлого века, то она может достигать 500–1000 Гц при температуре минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. Установление необходимого диапазона частоты воздействия для испытаний мерзлых грунтов может быть решено путем дополнительных исследований. На основе существующих данных максимальное значение частоты воздействия может быть задано на уровне *не менее* 300–400 Гц.

На основании приведенных в статье исследований известно, что в ходе динамических испытаний мерзлых грунтов зачастую возникает проблема проскальзывания образца. Для устранения его подвижности можно рекомендовать прочное прикрепление (цементацию, примораживание) мерзлого грунта к прибору до начала испытания. Для улучшения фиксации образца резонансную колонку можно снабдить стальными штампами с нанесенными на них насечками.

Конструкция резонансной колонки для испытаний мерзлых грунтов должна обладать собственным контуром охлаждения и поддержания отрицательной температуры. За основу может быть принята система охлаждения, разработанная компанией ООО НПП «Геотек». Для контроля температуры испытания резонансную колонку необходимо оборудовать высокоточными температурными датчиками. Варианты их установки могут быть различными – в теле образца, на его внешней поверхности (на-

пример, датчики могут быть вмонтированы в верхний и нижний штампы) либо в объеме камеры. Однако наиболее ценными являются температурные данные, полученные при измерениях датчиком, расположенным в непосредственной близости к образцу или внутри него.

Комплекующие резонансной колонки должны отвечать требованиям работы при отрицательной температуре. Например, это относится к жидкости, передающей всестороннее давление на образец мерзлого грунта. Исходя из распространенной практики, для передачи всестороннего давления на мерзлый образец используют незамерзающие жидкости, такие как силиконовые масла, спиртовые растворы и антифризы.

Проблемным остается вопрос выбора материала для изготовления оболочки в целях изоляции жидкости в камере от образца мерзлого грунта. Они должны обладать высокой степенью эластичности, чтобы не создавать дополнительного сопротивления при выполнении испытаний. Однако распространенные латексные оболочки при отрицательной температуре теряют свою упругость. Их использование в этом случае может несколько влиять на процесс деформирования. На основании исследований, представленных в работе [6], наилучшая сходимость результатов испытаний мерзлых грунтов методом резонансной колонки наблюдается при применении оболочки из хлоропренового каучука (искусственного каучука) в сочетании с силиконовым маслом.

Выводы ►

Под действием динамической нагрузки в мерзлых грунтах наблюдается малый уровень деформаций. В связи с этим исследование работы грунта при сверхмалых деформациях оказывается ценным для понимания его динамического поведения. Однако высокая жесткость грунта не позволяет использовать для испытаний обычные резонансные колонки, которые в большинстве своем не могут обеспечить необходимых условий. Для получения достоверных показателей динамических свойств мерзлых грунтов необходимо реализовать в резонансной колонке крутящий момент основания величиной как минимум $4\text{ Н}\cdot\text{м}$, оборудование должно обеспечивать частоту воздействия как минимум 300–400 Гц, если планируется испытание высокотемпературных мерзлых грунтов. Для испытания низкотемпературных мерзлых грунтов крутящий момент можно увеличить до $10\text{ Н}\cdot\text{м}$, а частоту воздействия – до 1000 Гц. Амплитуду деформаций для более высокой точности лучше реализовать в диапазоне 10^{-8} – 10^{-5} , приемлемым вариантом является также диапазон 10^{-7} – 10^{-4} . Кроме того, конструкция резонансной колонки должна обеспечить ее полную неподвижность, чего можно достичь: увеличением массового полярного момента инерции ее основания так, чтобы он был в 100 раз выше, чем у привода кручения; креплением магнитов цианоакрилатным ударопрочным клеем и т. д. Установку резонансной колонки следует оборудовать системой охлаждения, теплоизоляцией и возможностью фиксации температуры испытания. **И**

Список литературы ►

(References) ►

1. Turcott-Rios E.E. Resonant Column-Testing of Frozen Soils. 1980. P. 135.
2. Vinson T.S.. Dynamic Properties of Naturally Frozen Ice. 1983. P. 182.
3. Youssef H., Kuhlemeyer R., Frenc R. Development of an apparatus for static and dynamic creep testing of ice and frozen soils // Laboratory Testing of Frozen Soils // Proc. of the 4th Can. Permafrost Conf. 1982. P. 429–432.
4. Al-Hunaidi M., Chen P.A., Rainer J.H., Tremblay M. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests // Canadian Geotechnical Journal. 1996. Vol. 33. № 3. P. 510–514. DOI:10.1139/T96-073.
5. Clayton C., Zervos A., Kim S.G., Priest J.A., Bui M.T. The Stokoe resonant column apparatus: effects of stiffness, mass and specimen fixity // Geotechnique. 2009. Vol. 59. № 5. P. 429–437. DOI:10.1680/geot.2007.00096.
6. Xiaobo Yu, Rui Sun, Xiaoming Yuan, Zhuoshi Chen, Jiuqi Zhang. 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.
7. Xiaobo Yu, Huabei Liu, Rui Sun, Xiaoming Yuan. Improved Hardin-Drnevich model for the dynamic modulus and damping ratio of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 153. № 1. DOI:10.1016/J.COLDREGIONS.2018.05.004.
8. Yuan Xiaoming, Sun Jing, Sun Rui. A Modified approach for calculating dynamic shear modulus of stiff specimens by resonant column tests // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2006. Vol. 5. P. 143–150.
9. Kim Jae-Hyun, Kwon Yeong-Man, Park Keunbo, Kim YoungSeok, Kim Dong-Soo. Dynamic Soil Properties of Frozen and Unfrozen Soils from Terra Nova Bay in Eastern Antarctica // Journal of the Korean geotechnical society. 2017. Vol. 33. № 3. P. 37–47. URL: <https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.3.37>.