

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 69.04

DOI 10.52684/2312-3702-2023-43-1-5-9

ГРУНТОВЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ШАРИКОВЫЙ ВИСКОЗИМЕТР

З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев, И. Е. Демин

Тер-Мартirosян Завен Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (495) 287-49-14, доб. 1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Шебуняев Александр Николаевич, аспирант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (977) 946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru;

Демин Иван Евгеньевич, инженер, ООО «ПГС», г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (929) 607-12-70; e-mail: Tihan11@inbox.ru

В статье приводится описание конструкции грунтового динамического шарикового вискозиметра, предназначенного для измерения коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации. В сравнении с аналогами предложенное решение позволяет проводить измерение более корректно с учетом рационально подобранных размеров рабочей камеры и шарика по отношению к размеру частиц исследуемой дисперсной среды, исключения передачи дополнительных инерционных сил на перемещаемый шарик, контроля уровня обжимающего статического давления и использования поправок Ладенбурга к формуле Стокса в вычислении коэффициента вязкости. В выводах статьи сформировано предложение по дальнейшей разработке темы в виде проведения серии экспериментов для установления влияния уровня касательных напряжений и обжимающего давления на величину коэффициента вязкости сыпучего грунта при действии вибрации.

Ключевые слова: динамический грунтовой вискозиметр, песчаный грунт, виброползучесть, динамическая нагрузка, обжимающее давление.

GROUND DYNAMIC BALL VISCOMETER

Z. G. Ter-Martirosyan, A. N. Shebunyaev, I. Ye. Demin

Zaven Grigoryevich Ter-Martirosyan, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (495) 287-49-14, ext. 1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Shebunyaev Aleksandr Nikolaevich, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (977) 946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru;

Demin Ivan Yevgenyevich, engineer, LLC «PGS», Moscow, Russian Federation, phone: +7 (929) 607-12-70; e-mail: Tihan11@inbox.ru

The article describes the design of a ground dynamic ball viscometer designed to measure the viscosity coefficient of sandy soil under the action of vibration. In comparison with analogues, the proposed solution makes it possible to measure more correctly, taking into account the rationally selected dimensions of the working chamber and the ball in relation to the particle size of the dispersed medium under study, eliminating the transfer of additional inertial forces to the ball being moved, controlling the level of compressing static pressure and using Ladenburg corrections to the Stokes formula in calculating the viscosity coefficient. In the conclusions of the article, a proposal has been formed for further development of the topic in the form of a series of experiments to establish the influence of the level of tangential stresses and compressive pressure on the value of the viscosity coefficient of loose soil under the action of vibration.

Keywords: dynamic soil viscometer, sandy soil, vibration creep, dynamic load, compressive pressure.

Целью настоящего исследования является разработка конструкции вискозиметра, позволяющего проводить измерение вязкости в заданном состоянии, когда в песчаном грунте при действии динамической нагрузки происходят большие сдвиговые вязкопластические деформации. Для достижения поставленной цели выполнен обзор имеющихся конструкций аналогичных приборов с критическим анализом их недостатков, решены опытно-конструкторские задачи по формированию механики работы и сборке технического устройства, выполнено описание порядка проведения измерения коэффициента вязкости с

учетом базовых принципов механики жидкости и твердых дисперсных сред.

В настоящий период времени деформационные (в т. ч. реологические) параметры песчаных грунтов при динамическом нагружении определяются в его допредельном состоянии, а совокупность статического и динамического воздействия изменяют структуру грунта в процессе испытания. Например, в динамическом стабилometре в зависимости от траектории нагружения испытание проводится до сдвигового разрушения песчаного образца с дилатацией при большом вертикальном статическом

σ_1 и/или динамическом σ_d давлении в совокупности с недостаточным боковым обжимающим давлением σ_3 [25], при этом не измеряется коэффициент вязкости в запредельном состоянии, которое в некоторых случаях работы грунтовых оснований имеет место быть, а предложенная конструкция вискозиметра позволяет проводить такие измерения, поэтому данная работа имеет научную новизну. Актуальность исследования вязкости песчаных грунтов при действии вибрации с использованием предложенной конструкции прибора лучшим образом демонстрируется большим количеством отказов сооружений, вызванных виброползучестью песчаных грунтов и выраженных в возникновении значительных осадок оснований, повреждений строительных конструкций и вплоть до полного обрушения целых зданий [11].

Для обеспечения безопасности строительства и реконструкции объектов, включая окружающую застройку, необходимо проведение полного спектра геотехнических изысканий и исследований с учетом современного уровня развития науки и техники [6]. Отдельным разделом геотехники выделяется прогнозирование осадки и несущей способности грунтовых оснований в области источников динамических воздействий [16, 19]. Как известно, песчаные грунты при действии вибраций уплотняются, снижается их прочность, и они склонны к проявлению вязкопластических сдвиговых деформаций [20].

В настоящий момент разработан большой объем методик и материально-технической базы для полевого и лабораторного определения динамических свойств грунтов, позволяющих определить различный состав параметров и применимых для различных условий нагружения грунта в зависимости от значения амплитуды сдвиговой деформации. Наиболее распространенными и стандартизированными являются динамическое зондирование, динамическое трехосное сжатие, динамический крутильный сдвиг и динамические испытания на резонансных колонках [2, 3, 5, 14, 17].

Ранее автором отмечена необходимость установления зависимостей влияния механических параметров грунта и его напряженного состояния на интенсивность виброползучести в песчаном грунте при действии вибрации с возникновением больших сдвиговых деформаций при решении задач геотехники [20], для чего планируется провести экспериментально-теоретическое исследование песчаных образцов в запредельном состоянии, когда происходит пластическое течение с возникновением больших перемещений. При наблюдении процесса ползучести для чистоты эксперимента требуется исключить изменение сопротивления на всем протяжении перемещения, обусловленное уплотнением или разрыхлением структуры образца, исключить из учета деформаций влияние

уплотнения грунта и проскальзывание на контакте образца грунта с конструкцией прибора, обусловленное простым трением скольжения. Существующие распространенные конструкции приборов имеют сложную конструкцию и высокоточную контрольно-измерительную аппаратуру, однако не полностью удовлетворяют вышеописанным критериям. Например, при проведении динамического трехосного сжатия деформирование грунта происходит не только за счет сдвиговых деформаций, которым свойственно проявление вязкости [17], но и за счет объемных деформаций, которые несколько искажают контролируемый результат, по ходу нагружения образца происходит изменение его структуры, и каждое последующее перемещение в цикле отличается от предыдущего [18]. Динамические испытания на резонансных колонках имеют несколько иную цель исследований и технически ограничены особенностями конструкции приборов [3, 4]. Испытания на динамический крутильный сдвиг также не позволяют проводить большие сдвиговые деформации в запредельном состоянии без трения скольжения на площадках сдвигов [14]. Для проведения экспериментальных исследований с учетом вышеуказанных условий предложена конструкция грунтового динамического шарикового вискозиметра, предназначенного для измерения вязкости песчаных грунтов при динамических воздействиях путем перемещения шарика в исследуемом образце.

В области механики грунтов впервые определение вязкости песчаного грунта под действием вибрации с помощью шарикового вискозиметра проведено выдающимся отечественным ученым Д. Д. Барканом [1]. Прибор состоит из рабочей емкости с испытываемым песчаным грунтом, расположенной на виброплатформе, сообщающей вертикальные колебания с различной интенсивностью. На поверхности песчаного образца размещается металлический шарик, на который передается различное вертикальное усилие от веса через стальной стержень [21, с. 62].

Вышеописанная конструкция прибора и схема испытания несколько отлична от требований, приведенных выше, в части постоянства сопротивления на всем пути перемещения шарика. Как указывает сам Д. Д. Баркан, скорость погружения шарика уменьшается с глубиной, и на определенной глубине происходит остановка в зависимости от статической нагрузки, действующей на шарик, и интенсивности вибраций [21, с. 63]. Данное явление объясняется тем, что с глубиной возрастает обжимающее статическое давление, и это приводит к увеличению вязкости. Этот факт был отмечен О. А. Савиновым в отношении виброуплотнения песчаного грунта и отражен в его схеме испытаний с использованием пружинного устройства [12]. Как указывает О. А. Савинов, «зерна песка обжаты статическим

давлением и находятся в стесненных условиях, при которых возможны лишь их небольшие смещения без изменения взаимного расположения в грунтовом массиве» [11, с. 65]. Кроме того, в схеме испытаний Д. Д. Баркана статическая нагрузка, действующая на шарик, и направление вибраций действуют вертикально вдоль одной прямой, что несколько искажает результат эксперимента, т. к. шарик жестко связан с грузом, способствуя эффективной передаче вибраций непосредственно на груз и возникновению дополнительных инерционных сил.

Исследование реологических свойств дисперсных материалов важно также и в других областях знаний и хозяйственной деятельности. Известно устройство (шариковый вискозиметр) для определения вязкости сыпучих материалов, получившее патент № RU 2 267 770 С1 [8]. Так как сопротивление сдвиговым усилиям сыпучих материалов в значительной степени зависит от статического обжимающего напряжения [4, 5, 10, 11, 21] (в т.ч. песчаных грунтов при действии циклической нагрузки, как это отметили А. З. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев, V. Jagodnik, Ž. Arbanas, T. Tamošiūnas, K. Wang и др. [13, с. 15; 22–25; 68–69; 74]), недостатком данного прибора является отсутствие контроля среднего напряжения в исследуемом материале, что не ограничивает в выявлении всесторонних зависимостей измеряемой величины с контролируемыми параметрами. Кроме того, описание данного устройство лишено указаний на особенности вычисления коэффициента вязкости, следующих из поправок Ладенбурга касательно влияния величины радиуса и длины сосуда относительно размера шарика при определении вязкости по закону Стокса [7], что негативно влияет на точность измерения. Наиболее близким аналогом к предложенной конструкции прибора по конструктивным особенностям является устройство для определения реологических свойств дисперсных материалов, в отношении которого оформлено авторское свидетельство SU 1 481 643 А1 [9]. Недостатком данного устройства, как и предыдущего, является отсутствие контроля обжимающего давления (уровня средних статических напряжений) в исследуемой среде. Вместе с тем, в отличие от предыдущего аналога в данном приборе при вычислении коэффициента вязкости введена «константа устройства К», которая может учитывать поправки Ладенбурга.

Задачей предложенной конструкции грунтового динамического шарикового вискозиметра является повышение точности измерения вязкости песчаного грунта при динамическом воздействии, обеспечение возможности измерения вязкости при больших величинах виброускорения без нарушения сплошности исследуемого сыпучего материал, обеспечение возможности измерения коэффициента вязкости с заданием различных величин средних напряжений путем

приложения статического бокового обжимающего давления в исследуемом грунте, а также прямое измерение фактической частоты вибрации и виброускорения за счет наличия акселерометра, обжимающей пружинной группы и корректного вычисления коэффициента вязкости по закону Стокса касательно влияния величины радиуса и длины сосуда относительно размера шарика с учетом поправок Ладенбурга [7]. Предложенная конструкция прибора представлена ниже на рисунках 1 и 2.

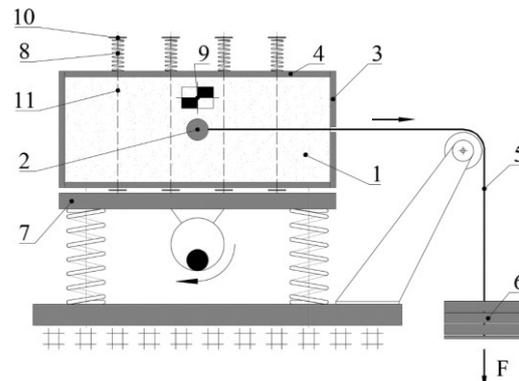


Рис. 1. Схема устройства динамического вискозиметра шарикового типа: 1 – образец грунта; 2 – стальной шарик; 3 – рабочая камера; 4 – крышка; 5 – тонкий гладкий стальной трос; 6 – груз; 7 – виброплатформа; 8 – группа пружин; 9 – акселерометр; 10 – крепежные элементы; 11 – тяжи

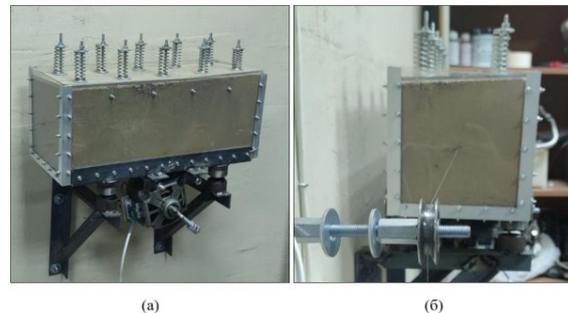


Рис. 2. Фотографии собранного грунтового динамического шарикового вискозиметра: (а) – общий вид прибора, (б) – вид прибора сбоку

Технический результат достигается тем, что в рабочей камере, закрепленной на виброплатформе, размещена исследуемая среда (песчаный грунт), через которую пропускается шарик под действием силы F , передаваемой от груза посредством нити. Виброплатформа оборудована приводом, обеспечивающим возможность контроля частоты колебаний во время проведения испытания. В отличие от аналогов предлагаемая конструкция устройства предусматривает наличие подвижной жесткой крышки, которая передает на исследуемую дисперсную среду статическое обжимающее напряжение, создаваемого группой пружин и контролируемого посредством регулирования их длины, а также предусматривает возможность прямого измерения интенсивности динамического воздействия посредством акселерометра, а не

косвенное принятие их значений по заданным параметрам вибрации.

Геометрические размеры рабочей камеры и пропускаемого шарика однозначно определены, исходя из основных принципов механики жидкости и твердых дисперсных сред. Размер перемещаемого шарика должен быть многократно больше размера частиц дисперсного материала для применения аппарата механики сплошной среды [17], поэтому для испытания крупных песчаных грунтов следует применять шарика диаметром не менее 20 мм. Далее, полученный размер шарика диктует минимальные размеры камеры, при которых закон Стокса будет применим с учетом поправок Ладенбурга [7], а также будут актуально представленные среды в качестве сплошной и изотропной: для снижения влияния различных краевых эффектов поперечные размеры камеры (ширина и высота) приняты в соотношении не менее 1:10 к размеру шарика (t .е. 200 мм), а продольный размер камеры (длина) – не менее 1:25 (t .е. 500 мм).

Измерение коэффициента вязкости на предложенном вискозиметре подразумевает проведение следующей последовательности действий: подготовка к проведению исследования, непосредственно исследование с прямым измерением величины и обработка результатов эксперимента с вычислением величины коэффициента вязкости.

На стадии подготовки в снятую рабочую камеру послойно загружается исследуемая дисперсная среда (песчаный грунт) с контролем горизонтальности расположения нити. После загрузки исследуемой среды на рабочую камеру устанавливается крышка с пружинной группой, создающей обжимающее давление. Далее рабочая камера закрепляется на виброплатформе, нить перебрасывается через неподвижный блок, и к ней присоединяется груз.

На стадии непосредственно исследования включается виброплатформа, начинается отсчет времени t , и фиксируется положение шарика для определения пути s , по которому перемещается шарик. Для более корректного определения коэффициента вязкости перемещение шарика должно завершиться не ближе 100 мм до передней торцевой грани рабочей камеры для снижения влияния близкого расположения стенки камеры. При измерении шарик следует переместить на расстояние не менее 200 мм с целью получения устойчивого значения скорости. По результатам исследования измеряется значение времени t , за которое шарик перемещается на расстояние s .

Вычисление коэффициента вязкости после эксперимента проводится по результатам измерения на предлагаемой конструкции прибора значения времени t , за которое шарик

перемещается на расстояние s , по формуле Стокса с введением поправок Ладенбурга [7] (1).

$$\mu = \frac{F}{6\pi \cdot r \cdot \frac{s}{t} \cdot \left(1 + 2,1 \cdot \frac{r}{R_0}\right) \cdot \left(1 + 1,33 \cdot \frac{r}{h}\right)}, \quad (1)$$

где F – сила, под действием которой шарик приводится в движение; r – радиус шарика, м; R_0 – гидравлический радиус сечения рабочей камеры, м; h – длина рабочей камеры, м; s – расстояние, м, на которое перемещен шарик за время t ; t – время, с, за которое шарик перемещен на расстояние s .

Выводы

Предложенное техническое решение грунтового динамического шарикового вискозиметра позволяет проводить исследование проявления вязкости песчаного грунта при действии вибрации в запредельном состоянии с пластическим течением за счет следующих решений:

- шарик имеет достаточный свободный ход для фиксации устойчивого значения скорости перемещения, при этом на пути перемещения шарика исследуемая среда является условно однородной как по физико-механическим показателям, так и по напряженному состоянию, что обеспечивается именно горизонтальным перемещением шарика, при котором обжимающее давление не изменяется;

- наличие группы пружин обеспечивает сохранение сплошности исследуемой среды при высоких значениях виброускорений и контроль величины обжимающего давления, что весьма важно при сдвиговых деформациях в сыпучих средах [17];

- для передачи усилия на шарик предусмотрена гибкая тонкая нить, которая в совокупности с горизонтальным протаскиваем шарика при вертикальных колебаниях рабочей камеры и исследуемого образца обеспечивает условное постоянство статической протаскивающей нагрузки;

- геометрические параметры прибора (размер шарика и размеры рабочей камеры) обеспечивают минимизацию искажения результатов измерений с учетом фундаментальных принципов механики грунтов и поправок Ладенбурга к формуле Стокса [7].

В обозримом поле научных публикаций отсутствуют результаты исследований влияния обжимающего статического давления и уровня касательных напряжений на величину коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации, поэтому в дальнейшем на предложенной конструкции динамического грунтового вискозиметра представляется возможным провести серию экспериментов с различными значениями протягивающего усилия и обжимающего давления с сохранением остальных параметров напряженно-деформированного состояния и формированием обоснованных выводов касательно влияния данных факторов.

Список литературы

1. Баркан Д. Д. Экспериментальные исследования вибровязкости грунта / Д. Д. Баркан // ЖТФ. – 1948. – Т. 8, вып. 5. – С. 701–706.
2. Болдырев Г. Г., Идрисов И. Х. Методы определения динамических свойств грунтов / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов. – М. : ООО «Прондо», 2018. – 488 с.
3. Вознесенский Е. А. Динамические испытания грунтов. Состояние вопроса и стандартизация / Е. А. Вознесенский // Инженерные изыскания. – 2013. – № 5. – С. 20–27.
4. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / К. Ишихара ; пер. с англ. под ред. А. Б. Фадеева, М. Б. Лисюка. – СПб. : НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. – 384 с.
5. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения / Н. Д. Красников. – Л. : Стройиздат, 1970. – С. 240.
6. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов: современные приборы и оборудование при проведении экспериментальных исследований и геотехнического мониторинга / Н. В. Купчикова, А. С. Таркин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 4 (38). – С. 47–55.
7. Определение вязкости жидкости методом Стокса: методические указания / сост. : С. С. Никулин, А. С. Чех. – Тамбов : ТГТУ, 2011. – 12 с.
8. Патент № RU 2 267 770 С1. Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Устройство для определения вязкости дисперсных материалов : № 2004113678/28 : заявл. 05.05.2004 : опубл. 10.01.2006 / И. Я. Федоренко, А. А. Гнездилов, С. А. Сорокин, К. А. Пехтерев, Д. Н. Пирожков, В. И. Лобанов ; заявитель ФГОУ ВПО АГАУ. – 5 с.
9. Патент № SU 1 481 643 A1. Союз Советских Социалистических Республик, МПК G01N 11/10. Устройство для определения реологических свойств дисперсных материалов : № 4169390/23-25 : заявл. 29.12.86 : опубл. 23.05.89 / В. В. Примаченко; заявитель Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров. – 3 с.
10. Пятацкий В. М. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование / В. М. Пятацкий, Б. К. Александров, О. А. Савинов. – М. : Стройиздат, 1993. – 415 с.
11. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – М. : Стройиздат, 1964. – 346 с.
12. Савинов О. А. Об экспериментальном исследовании свойств насыпных грунтов как оснований фундаментов под машины / О. А. Савинов // Трубы ЛО НИИ по основания и фундаментам. – 1949. – Вып. 1.
13. Соболев Е. С. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов оснований зданий и сооружений : дисс. ... канд. техн. наук / Е. С. Соболев. – М. : НИУ МГСУ, 2014. – 150 с.
14. Строкова Л. А. Динамика грунтов : уч. пос. / Л. А. Строкова. – Томск : Томский политехнический университет, 2018. – 190 с.
15. Тер-Мартirosян А. З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенными основаниями при учете нелинейных и реологических свойств грунтов : дисс. ... д-р техн. наук / А. З. Тер-Мартirosян. – М. : НИУ МГСУ, 2016. – 324 с.
16. Тер-Мартirosян А. З. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии / А. З. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, вып. 5 (104). – С. 537–544. – DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.537-544.
17. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью : учебное пособие / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян. – Москва : АСВ, 2020. – 946 с.
18. Тер-Мартirosян З. Г. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев // Инженерные изыскания, – 2014, – № 5–6. – С. 24–28.
19. Чернов Ю. Т. Проектирование зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям / Ю. Т. Чернов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 4. – С. 73–77.
20. Шебуняев А. Н. Обзор результатов исследований влияния колебаний на физико-механические свойства песчаных грунтов / А. Н. Шебуняев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С.15–22. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-15-22.
21. Barkan D. D. Dynamics of Bases and Foundations / D. D. Barkan ; translated from the Russian by L. Drashevskaya, and translation edition edited by G. S. Tschebotarioff, – New York : McGraw-Hill Book Co, 1962. – 434 p.
22. Jagodnik V. Cyclic Behaviour of Uniform Sand in Drained and Undrained Conditions at Low Confining Stress in Small-Scale Landslide Model / V. Jagodnik, Ž. Arbanas // Sustainability. – 2022. – № 14 (19). – Pp. 12797. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912797>.
23. Tamošiūnas T. Predictive Stress Modeling of Resilient Modulus in Sandy Subgrade Soils / T. Tamošiūnas, Š. Skuodis // Infrastructures. – 2023. – № 8 (29). – DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020029>.
24. Wang K. Critical Dynamic Stress and Cumulative Plastic Deformation of Calcareous Sand Filler Based on Shake-down Theory / K. Wang, Z. Chen, Z. Wang, Q. Chen, D. Ma // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023, – № 11. – Pp. 195. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11010195>.
25. Wang Z., Zhang L. Experimental Study on Dynamic Parameters of Calcareous Sand Subgrade under Long-Term Cyclic Loading / Z. Wang, L. Zhang // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – № 10, – Pp.1806. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121806>.

© З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев, И. Е. Демин

Ссылка для цитирования:

Тер-Мартirosян З. Г., Шебуняев А. Н., Демин И. Е. Грунтовой динамический шариковый вискозиметр // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 1 (43). С. 5–9.