

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.15

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.8

Одометр для испытаний торфа и заторфованных грунтов

Галина Юрьевна Ивахнова, Алексей Анатольевич Коршунов,

Александр Леонидович Невзоров

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова**(САФУ имени М.В. Ломоносова); г. Архангельск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При компрессионных испытаниях торфа и заторфованных грунтов, продолжительность которых может достигать нескольких месяцев, на контакте между боковой поверхностью образца и металлическим кольцом возникают силы трения, оказывающие существенное влияние на результаты измерений. Разработан одометр, позволяющий повысить достоверность результатов лабораторных испытаний за счет определения характеристик сжимаемости с учетом указанного фактора.

Материалы и методы. Прибор выполнен с применением аддитивной технологии на 3D-принтере, из металла изготовлено только кольцо для образца. Диаметр образца 8,6 см, исходная высота 3 или 5 см. После стабилизации деформаций в основании прибора освобождается полость и на поршень прикладывается монотонно возрастающая нагрузка до момента «срыва» по контакту боковой поверхности с кольцом. При этом с помощью болтов предварительно предотвращается разуплотнение образца. Исследованный торф имел следующие свойства: плотность 0,98–1,02 г/см³, влажность 861–930 %, коэффициент пористости 11,8–14,2, степень разложения 40–45 %. Испытания проводились при нагрузке на образец 50 и 100 кПа.

Результаты. Испытания показали, что на преодоление сил трения уходило до 15–20 % от приложенной к образцу нагрузки. Этот фактор следует учитывать при расчете характеристик сжимаемости, корректируя значение напряжений в образце.

Выводы. Преимуществом представленного одометра является определение характеристик сжимаемости, включая коэффициент консолидации, с учетом погрешности измерений, возникающей из-за сил трения на контакте образца с кольцом. Изготовление геотехнических приборов на 3D-принтере дает возможность существенно сократить затраты времени и средств, облегчает доработку конструкции в ходе испытаний, а также упрощает изготовление запасных деталей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: одометр, консолидация, пристенное трение, торф, характеристики сжимаемости, 3D-принтер

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20026 (URL: <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ивахнова Г.Ю., Коршунов А.А., Невзоров А.Л. Одометр для испытаний торфа и заторфованных грунтов // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.8

Автор, ответственный за переписку: Галина Юрьевна Ивахнова, g.zinovjeva@narfu.ru.

Oedometer for laboratory test of peat and peaty soil

Galina Yu. Ivakhnova, Alexey A. Korshunov, Alexander L. Nevzorov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU); Arkhangelsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Friction forces have a significant impact on results of the long-time compression tests of peat and peaty soils. Forces occur at the contact between the lateral surface of the sample and the metal ring during compression tests. The authors have developed an oedometer that allows to increase the reliability of laboratory test results by determining the compressibility characteristics taking friction impact into account.

Materials and methods. The oedometer was made by plastic additive manufacturing except for bronze ring. The diameter of the sample is 8.6 cm and the initial height of the sample is 3 or 5 cm. After stabilization of deformations void in the base of the oedometer is released and a monotonically increasing load was applied to the upper part of the sample until the “break-down” at the contact between the lateral surface of the peat sample and the ring. At the same time loosening of the sample was prevented by keeping samples with bolts. The studied peat had the following properties: density 0.98–1.02 g/cm³, water content 861–930 %, void ratio 11.8–14.2, decomposition degree 40–45 %. The tests were carried out at vertical stresses equal to 50 and 100 kPa respectively.

Results. Tests showed that up to 15–20 % of the load applied to the sample is required to overcome friction forces. This phenomenon should be taken into account in determining compressibility characteristics by adjusting the current load on the sample.

Conclusions. The advantage of the oedometer is the determination of compressibility characteristics including compression index taking into account the measurement error occurring from the friction forces at the contact of the sample with the ring. The manufacture of geotechnical devices by 3D printing is non-cost and time-consuming. This also makes it easier to modify the design during testing and simplifies the manufacture of spare parts.

KEYWORDS: oedometer, consolidation, sidewall friction, peat, compressibility, deformation characteristics, 3D printing

Acknowledgements. The study was funded by the Russian Science Foundation under the project № 22-19-20026 (URL: <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>).

FOR CITATION: Ivakhnova G.Yu., Korshunov A.A., Nevzorov A.L. Oedometer for laboratory test of peat and peaty soil. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.8

Corresponding author: Galina Yu. Ivakhnova, g.zinovjeva@narfu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе компрессионных испытаний торфа и заторфованных грунтов, продолжительность которых может достигать нескольких месяцев, на контакте между боковой поверхностью образца и металлическим кольцом возникают силы трения, оказывающие существенное влияние на результаты экспериментов [1]. Заметим, что зависимость трения от продолжительности испытаний выявлена и у глинистых грунтов [2]. Для снижения погрешности измерений ограничивают высоту образца, исходя из условия обеспечения отношения диаметра к высоте от 2,5–2,8 до 4 и даже до 6 [3–6]. Однако из-за неоднородности указанных грунтов и, в частности, наличия в них крупных растительных остатков ограничение высоты ведет к снижению достоверности определения характеристик сжимаемости, а увеличение их диаметра — к росту затрат на проходку скважин.

Частично снизить эффект трения позволяет нанесение на поверхность кольца всевозможных покрытий, часто многослойных [7]. Р.К. Kolay, проведя эксперименты со стандартными одометрами и одометрами с тефлоновым покрытием, получил коэффициенты для корректировки результатов испытаний в первых из них [8]. Способ обработки данных испытаний «высоких» образцов с учетом влияния трения был предложен J. Lovisa с соавт. [9].

Широкое распространение получили одометры с так называемыми «плавающими» кольцами, не имеющими жесткого соединения с другими деталями прибора и позволяющими снизить эффект трения [10, 11]. Для измерения силы трения «плавающее» кольцо может подвешиваться к динамометру [12]. При этом следует иметь в виду, что силы трения распределяются по высоте кольца неравномерно, что ведет к неравномерному деформированию по высоте образца [13]. Этот эффект оценивался путем изучения микроструктуры различных частей образца с помощью сканирующего электронного микроскопа после завершения компрессионных испытаний или определением отличий в водопроницаемости [14, 15].

Известны одометры с непрямым измерением сил трения между образцом и обоймой, в которых вели-

чину трения оценивают по разнице усилий, приложенных к штампу и передающихся на размещенный под образцом перфорированный вкладыш. Чаще всего вкладыш под образцом представляет собой подвижный штамп, опирающийся на силоизмерительный датчик [6, 16–19]. В приборе В.И. Крутова и других вкладыш выполнен в виде мембраны с тензорезисторами [20].

Авторами разработан одометр, позволяющий повысить достоверность результатов компрессионных испытаний торфов и заторфованных грунтов за счет определения характеристик сжимаемости с учетом трения на боковой поверхности образца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прибор содержит корпус 1 с перфорированным вкладышем 2 и кольцевой прорезью 3, рабочее кольцо 4, опорную пластину 5, крышку 6, служащую для передачи нагрузки на штамп от загрузочного приспособления, полый перфорированный штамп 7 и зажимной хомут 8 (рис. 1). Болты 9 предотвращают разуплотнение образца при снятии нагрузки со штампа. Прибор помещается в загрузочную раму, частью которой является датчик перемещения 10. Конструкция прибора защищена патентом на изобретение [21].

Прибор изготовлен с применением аддитивных технологий путем послойного наплавления пластиковой нити на 3D-принтере Flashforge Adventurer 4 (рис. 2). Принтер обеспечивает возможность изготовления деталей с размерами 200 × 200 × 250 мм со средней скоростью от 10 до 100 мм/с, при этом точность печати деталей составляет до ±0,1 мм. В качестве конструкционного материала изделия использовался полиэтилентерефталат-гликоль. Для обеспечения жесткости элементов прибора плотность заполнения пластиком задавалась 60–75 % в зависимости от назначения детали, а наружные стенки деталей толщиной не менее 1,5 мм выполнялись сплошными. После завершения 3D-печати детали прибора дополнительно шлифовали.

Кольцо 4 высотой 3 или 5 см и диаметром 8,6 см изготовлено из бронзы, болты 9 — из стали.

Работает одометр следующим образом. Поместив образец грунта в кольцо 4, собирают прибор (рис. 3, а). Болты 9 свободно проходят через отвер-

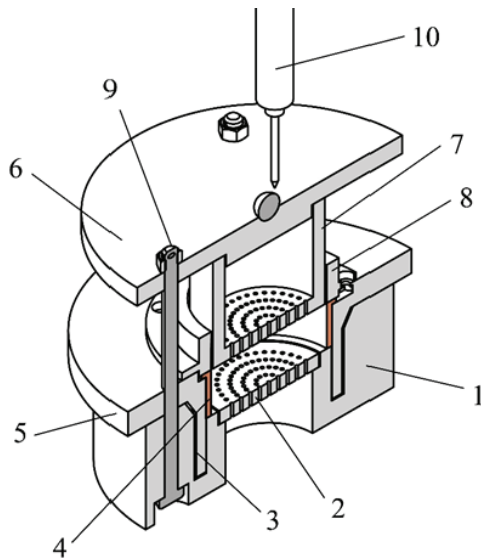


Рис. 1. Конструкция компрессионного прибора: 1 — корпус; 2 — пористый вкладыш; 3 — кольцевая прорезь; 4 — рабочее кольцо; 5 — опорная пластина; 6 — крышка; 7 — полый штамп; 8 — зажимной хомут; 9 — болты; 10 — датчик перемещения

Fig. 1. Oedometer design: 1 — base; 2 — perforated disc; 3 — ring slot; 4 — bronze ring; 5 — supporting plate; 6 — cap; 7 — hollow loading plate; 8 — clamping bracket; 9 — bolts; 10 — displacement sensor

ствия в опорной пластине 5 и крышке 6. Гайки не затягивают во избежание сжатия образца. Прибор размещают в нагрузочной раме и через шток и центрирующий шарик в крышке 6 передают нагрузку на штамп 7 и, измеряя осадку, проводят испытания. Избыточная поровая влага через пористый вкладыш 2



Рис. 2. Детали прибора, изготовленные на 3D-принтере
Fig. 2. Parts manufactured by 3D printing

в корпусе 1 стекает вниз в полость под ним и через перфорацию в днище штампа попадает в полость над ним.

В экспериментах использовались полностью автоматизированные комплексы фирмы GEOTEC Corporation, представляющие собой нагрузочные рамы, оснащенные механизмами нагружения, датчиками перемещений и нагрузки, устройствами микропроцессорного управления испытанием и сбором данных (рис. 4). Датчики перемещений выполняют измерения в диапазоне от 0 до 76 мм с точностью $\pm 0,001$ мм. Максимальное усилие на датчики силы составляет 11 кН, точность измерений до $\pm 0,025$ кН. Специализированное программное обеспечение обрабатывает результаты измерений и формирует паспорт испытаний.

Дождавшись стабилизации осадки, приступают ко второй части испытаний. Предварительно пре-

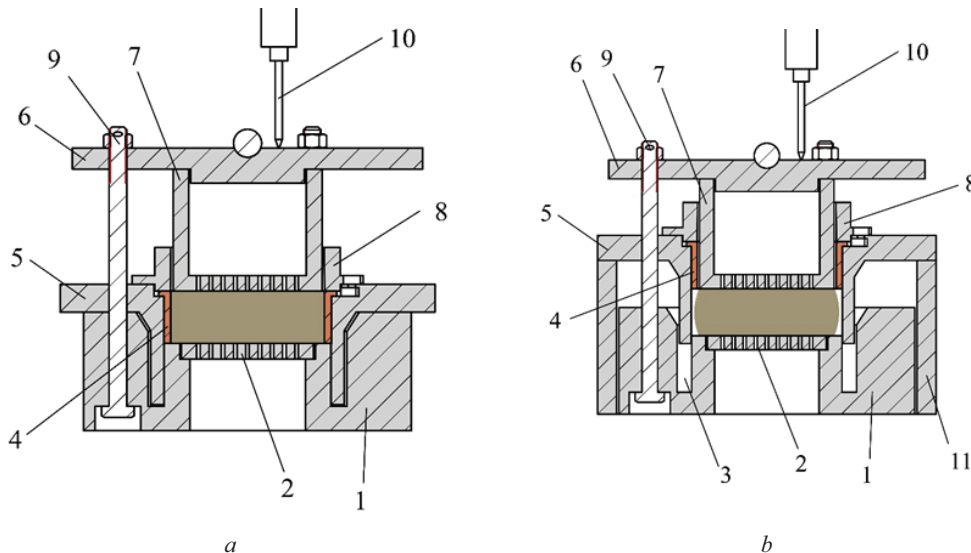


Рис. 3. Этапы проведения испытаний: *a* — стандартные компрессионные испытания; *b* — определение сил трения; обозначения деталей 1–10 совпадают с обозначениями на рис. 1; 11 — опорное кольцо

Fig. 3. Stages of testing: *a* — standard compression tests; *b* — determination of friction forces; the legend is corresponded to description on Fig. 1; 11 — support ring

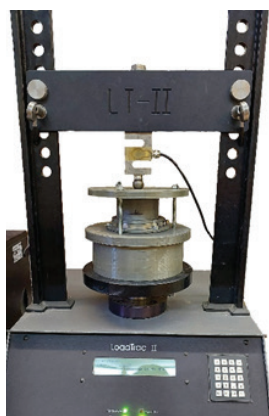


Рис. 4. Прибор в нагрузочной раме

Fig. 4. The oedometer is under pressure

дотвратив разуплотнение образца вращением гаек на болтах 9 до контакта с крышкой 6, приподнимают прибор на высоту, равную высоте образца, и заводят под опорную пластину 5 опорное кольцо 11.

Постепенно увеличивая нагрузку на штамп 7, добиваются его перемещения вниз опорной пластины 5 вместе с образцом и корпусом 1 относительно неподвижного рабочего кольца 4. Суммируя вес названных частей прибора, вес образца и значение приложенной нагрузки, находят усилие, необходимое для преодоления сил трения образца по поверхности рабочего кольца.

После касания корпусом 1 станины образец оказывается в полости 3 под кольцом (рис. 3, б). Внутренний диаметр этой полости задают больше внутреннего диаметра кольца 4. Соотношение указанных диаметров в зависимости от программы испытаний изменяют путем замены детали 5. Если продолжить испытания образца при прежней нагрузке, то по их результатам путем численного моделирования испытаний можно получить коэффициент Пуассона исследуемого грунта.

Исследования выполняли на образцах торфа со степенью разложения 40–45 %, отобранных на не-

освоенном болоте в окрестностях г. Архангельска. Торф имел следующие исходные свойства: плотность 0,98–1,02 г/см³, влажность 861–930 %, коэффициент пористости 11,8–14,2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как отмечалось выше, компрессионные испытания проводили при нагрузке на образцы 50 и 100 кПа. По завершении компрессии приступили к определению сил трения на боковой поверхности образцов.

Характерные графики зависимости скорости перемещения образцов от давления под штампом представлены на рис. 5. На графиках выделяются два участка: линейный, отражающий деформирование практически с постоянной скоростью, и нелинейный с прогрессирующим нарастанием скорости перемещения. За искомую величину приложенного усилия принимали произведение давления, соответствующего моменту отклонения графика от линейной зависимости, на площадь штампа. Предельное сопротивление сдвигу находили делением суммы найденного усилия с весом указанных выше деталей прибора на площадь боковой поверхности образца в момент испытаний.

Результаты испытаний 12 образцов с исходной высотой 50 мм показали, что при компрессионном сжатии под нагрузкой 50 кПа предельное сопротивление сдвигу на боковой поверхности образцов торфа в среднем составило 6,7 кПа, а при нагрузке 100 кПа — 16,0 кПа. На преодоление сил трения уходило до 15–20 % от приложенной к образцу нагрузки. Этот фактор следует учитывать при расчете характеристик сжимаемости, корректируя значение давления под поршнем.

Прибор дает возможность определять эту силу дифференцированно по высоте образца, т.е. по мере смещения образца относительно рабочего кольца. В случае, если нагрузка прикладывается ступенями, величину трения, которая устанавливается лишь при максимальной вертикальной нагрузке, сле-



Рис. 5. Кривые сдвига при «срыве» по боковой поверхности

Fig. 5. Stress/shear rate curve to failure on sample

дует снижать на каждой ступени пропорционально нагрузке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Преимуществом представленного одометра является определение характеристик сжимаемости, включая коэффициент консолидации, с учетом по-

грешности измерений, возникающей из-за сил трения на контакте образца с кольцом.

Изготовление геотехнических приборов на 3D-принтере позволяет существенно сократить затраты времени и средств, облегчает доработку конструкции в ходе испытаний, а также упрощает изготовление запасных деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ивахнова Г.Ю., Невзоров А.Л. Особенности интерпретации результатов компрессионных испытаний торфа // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 1 (26). С. 26–32. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-26-32
2. Suits L.D., Sheahan T.C., Sirikaya O., Togrol E. Measurement of side friction between specimen and consolidation ring with newly designed oedometer cell // Geotechnical Testing Journal. 2006. Vol. 29. Issue 1. DOI: 10.1520/GTJ12513
3. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. МНТКС, 2011. С. 126.
4. ASTM D2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11
5. BS 1377 — part 5 1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes — Compressibility, permeability and durability tests.
6. Rosine T.N., Sabbagh T.T. The impact of the diameter to height ratio on the compressibility parameters of saturated fine-grained soils // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. Vol. 4. Issue 6.
7. Wang L., Zhu J., Yuan J., Lu Y. Development and application of an oedometer with negligible side-wall friction for rockfill materials // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2022. Vol. 44. Issue 4.
8. Kolay P. Remediation of the side friction in conventional oedometer tests by using large diameter consolidation ring // International Journal of Geotechnical Engineering. 2008. Vol. 2. Issue 2. Pp. 161–167. DOI: 10.3328/IJGE.2008.02.02.161-167
9. Lovisa J., Sivakugan N. Tall Oedometer Testing: Method to Account for Wall Friction // International Journal of Geomechanics. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000359
10. Патент RU № 2798607. Одометр для компрессионных испытаний грунта. Заявка № 2022117566. Приоритет изобретения 27.06.2022. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 23.06.2023.
11. Патент RU № 54597. Компрессионно-фильтративный прибор. Заявка № 2005138873/22. Приоритет изобретения 13.12.2005. Дата государственной
- регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 10.07.2006.
12. Патент CN 203479609 U. Floating ring type consolidation container for consolidation test. МПК G 01N 3/02. Оpubл. 12.03.2014.
13. Kang X., Xia Z., Chen R. Measurement and Correlations of K_0 and V_s Anisotropy of Granular Soils // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 173. Issue 6. Pp. 546–561. DOI: 10.1680/jgeen.19.00162
14. Yao W., Li X., Wu Y., Xue Q., Hao Z., Shi J. et al. Effect of height-to-diameter ratio on the compression test results of remodeled loess and its mechanism // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 176. DOI: 10.3390/buildings-13010176
15. Karimpour-Fard M., Zarbakhsh S., Soufi G.R., Ahadi A., Naveen B.P. Design, fabrication and calibration of a tall pneumatic oedometer apparatus // Measurement. 2020. Vol. 163. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107985
16. Lodahl M.R., Sørensen K.K., Mortensen N., Trankjær H. Oedometer tests with measurement of internal friction between oedometer ring and clay specimen // Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting. 2016. Pp. 289–298.
17. Watabe Y., Udaka K., Kobayashi M., Tabata T., Emura T. Effects of friction and thickness on long-term consolidation behavior of Osaka bay clays // Soils and foundations. 2008. Vol. 48. Issue 4. Pp. 547–561.
18. O'Kelly B.C. Development of a large consolidation apparatus for testing peat and other highly organic soils // Suoseura — Finnish Peatland Society. 2009. Vol. 60. Issue 1–2. Pp. 23–36.
19. Ahmed M., Beier N.A., Kaminsky H. A comprehensive review of large strain consolidation testing for application in oil sands mine tailings // Mining. 2023. Vol. 3. Issue 1. Pp. 121–150. DOI: 10.3390/mining-3010008
20. Авторское свидетельство СССР № 973702. Прибор для компрессионных испытаний грунта. МПК E02D 1/00. Оpubл. 15.11.82. Бюл. № 42.
21. Патент RU № 2718800. Прибор для компрессионных испытаний грунта. Заявка № 2020104307. Приоритет изобретения 31.01.2020. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 14.04.2020.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Галина Юрьевна Ивахнова — аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов; Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ им. М.В. Ломоносова); 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 1044892; Scopus: 57219992412, g.zinovjeva@narfu.ru;

Алексей Анатольевич Коршунов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра инженерной геологии, оснований и фундаментов; Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ имени М.В. Ломоносова); 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; SPIN-код: 1582-6552, Scopus: 56203452100, ResearcherID: ABB-7422-2020, ORCID: 0000-0001-5082-811; a.a.korshunov@yandex.ru;

Александр Леонидович Невзоров — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов; Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ им. М.В. Ломоносова); 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ivakhnova G.Yu., Nevzorov A.L. Specificities of the interpretation of the oedometer tests data for a peat. *Construction and architecture*. 2020; 8:1(26):26-32. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-26-32 (rus.).
2. Suits L.D., Sheahan T.C., Sirikaya O., Torgrol E. Measurement of side friction between specimen and consolidation ring with newly designed oedometer cell. *Geotechnical Testing Journal*. 2006; 29:1. DOI: 10.1520/GTJ12513
3. GOST 12248–2010. Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformability characteristics. MNTKS, 2011; 126. (rus.).
4. ASTM D2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11
5. BS 1377 — part 5 1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes — Compressibility, permeability and durability tests.
6. Rosine T.N., Sabbagh T.T. The impact of the diameter to height ratio on the compressibility parameters of saturated fine-grained soils. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015; 4(6).
7. Wang L., Zhu J., Yuan J., Lu Y. Development and application of an oedometer with negligible side-wall friction for rockfill materials. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2022; 44(4).
8. Kolay P. Remediation of the side friction in conventional oedometer tests by using large diameter consolidometer ring. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2008; 2(2):161-167. DOI: 10.3328/IJGE.2008.02.02.161-167
9. Lovisa J., Sivakugan N. Tall Oedometer Testing: Method to Account for Wall Friction. *International Journal of Geomechanics*. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000359
10. Patent RU No. 2798607. *Oedometer for soil compression tests*. Application No. 2022117566. Priority of the invention 27.06.2022. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation 23.06.2023. (rus.).
11. Patent RU No. 54597. *Oedometer for compression and filtration*. Application No. 2005138873/22. Priority of the invention 13.12.2005. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation 10.07.2006. (rus.).
12. Patent CN 203479609 U. *Floating ring type consolidation container for consolidation test*. МПК G 01N 3/02. Publ. 12.03.2014.
13. Kang X., Xia Z., Chen R. Measurement and Correlations of K_0 and V_s Anisotropy of Granular Soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2020; 173(6):546-561. DOI: 10.1680/jgeen.19.00162
14. Yao W., Li X., Wu Y., Xue Q., Hao Z., Shi J. et al. Effect of height-to-diameter ratio on the compression test results of remodeled loess and its mechanism. *Buildings*. 2023; 13(1):176. DOI: 10.3390/buildings13010176
15. Karimpour-Fard M., Zarbakhsh S., Soufi G.R., Ahadi A., Naveen B.P. Design, fabrication and calibration of a tall pneumatic oedometer apparatus. *Measurement*. 2020; 163. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107985
16. Lodahl M.R., Sørensen K.K., Mortensen N., Trankjær H. Oedometer tests with measurement of internal friction between oedometer ring and clay specimen. *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting*. 2016; 289-298.

17. Watabe Y., Udaka K., Kobayashi M., Tabata T., Emura T. Effects of friction and thickness on long-term consolidation behavior of Osaka bay clays. *Soils and foundations*. 2008; 48(4):547-561.
18. O'Kelly B.C. Development of a large consolidation meter apparatus for testing peat and other highly organic soils. *Suoseura — Finnish Peatland Society*. 2009; 60(1-2):23-36.
19. Ahmed M., Beier N.A., Kaminsky H. A comprehensive review of large strain consolidation testing for application in oil sands mine tailings. *Mining*. 2023; 3(1):121-150. DOI: 10.3390/mining3010008
20. USSR Copyright Certificate No. 973702. Oedometer for soil compression tests. IP. E02D 1/00. Publ. 15.11.82. Byul. No. 42 (rus.).
21. Patent RU No. 2718800. *Oedometer for soil compression tests*. Application No. 2020104307. Priority of the invention 31.01.2020. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation 14.04.2020. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Galina Yu. Ivakhnova** — postgraduate student of the Department of Geotechnics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 1044892, Scopus: 57219992412; g.zinovjeva@narfu.ru;

Alexey A. Korshunov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Department of Engineering Geology, Foundations and Foundations; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; SPIN-code: 1582-6552, Scopus: 56203452100, ResearcherID: ABB-7422-2020, ORCID: 0000-0001-5082-811; a.a.korshunov@yandex.ru;

Alexander L. Nevzorov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Geology, Foundations and Foundations; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru.

Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.