

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131.439

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1530-1540

Влияние коэффициента неравномерности расширения образца глинистого грунта на механические характеристики

Армен Завенович Тер-Мартirosян, Георгий Олегович Анжело,
Любовь Юрьевна Ермошина, Илья Алексеевич Боков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов, слагающих грунтовый массив, является ключевым в процессе расчета и проектирования сооружений всех типов. Высокая точность при выявлении механических характеристик играет огромную роль на каждом этапе разработки проекта. Установки трехосного сжатия служат одними из самых популярных и широко используемых приборов при проведении лабораторных исследований, поскольку данный вид испытаний позволяет наиболее точно воспроизвести напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива и определить его механические характеристики.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены на образцах глинистого грунта (супесь, суглинок, глина) в приборе трехосного сжатия в консолидированно-дренированном режиме с целью исследования влияния коэффициента неравномерности расширения образца грунта на его механические свойства.

Результаты. Анализируя данные экспериментальных исследований, было получено, что коэффициент неравномерности расширения образца b оказывает значительное влияние на полученные значения механических характеристик глинистого грунта, а именно: значения угла внутреннего трения в среднем увеличились на 5%; значения удельного сцепления в среднем увеличились на 4,4%. Однако следует отметить, что, несмотря на увеличение прочностных характеристик испытанных образцов грунта, исключение из процесса обработки коэффициента b привело к снижению значений секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} в среднем на 4,5%.

Выводы. Полученные завышенные значения прочностных характеристик φ , c и заниженные значения деформационных характеристик E_{50} не являются критичными, но для повышения точности расчетов, выполняемых на основе результатов, получаемых в итоге камеральной обработки протоколов лабораторных испытаний, требуется учитывать коэффициент неравномерности расширения b образца.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лабораторные испытания, трехосное сжатие, глинистый грунт, прочностные характеристики, деформационные характеристики, коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А. Влияние коэффициента неравномерности расширения образца глинистого грунта на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1530–1540. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1530-1540

Автор, ответственный за переписку: Илья Алексеевич Боков, ilililia@yandex.ru.

Influence of the coefficient of non-uniformity of expansion of clay soil specimen on mechanical characteristics

Armen Z. Ter-Martirosyan, Georgiy O. Anzhelo, Lyubov Yu. Ermoshina, Ilia A. Bokov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Determination of strength and deformation characteristics of soils composing the soil mass is the key process of calculation and design of structures of all types. High accuracy in determining mechanical characteristics plays a huge role at every stage of project development. Triaxial compression units are one of the most popular and widely used devices for laboratory research, as this type of testing allows you to reproduce the stress-strain state of the soil mass and determine its mechanical characteristics most accurately.

Materials and methods. Experimental studies were performed on clay soil specimens (sandy loam, loam, clay) in a triaxial compression device in a consolidated-drained mode in order to study the effect of the coefficient of non-uniformity of expansion of the soil specimen on its mechanical properties.

Results. Analyzing the data of experimental studies, it was found that the coefficient of non-uniformity of expansion of specimen b has a significant effect on the obtained values of the mechanical characteristics of clay soil, namely: the values

of the angle of internal friction in the medium increased by 5 %; the values of specific adhesion increased by 4.4 % on average. However, it should be noted that despite the increase in the strength characteristics of the tested soil specimens, the exclusion of the coefficient b from the treatment process led to a decrease in the values of the secant deformation modulus at 50 % strength E_{50} by an average of 4.5 %.

Conclusions. The obtained overestimated values of strength characteristics φ , c and underestimated values of deformation characteristics E_{50} are not critical, however, to increase the accuracy of calculations performed based on the results obtained as a result of in-house processing of laboratory test specimens, the coefficient of uneven expansion b of the specimen should be taken into account.

KEYWORDS: laboratory tests, triaxial compression, clay soil, strength characteristics, deformation characteristics, coefficient of non-uniformity of expansion of the soil specimen under triaxial compression

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A. Influence of the coefficient of non-uniformity of expansion of clay soil specimen on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1530-1540. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1530-1540 (rus.).

Corresponding author: Iliia A. Bokov, ilililia@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов, слагающих грунтовый массив, является ключевым в процессе расчета и проектирования сооружений всех типов. Высокая точность при выявлении механических характеристик играет огромную роль на каждом этапе разработки проекта.

В настоящее время на рынке существует множество лабораторного оборудования, которое позволяет устанавливать данные параметры. В частности, для определения прочностных свойств грунтов используются установки одноплоскостного среза, а для деформационных свойств — установки компрессионного сжатия. Также существуют установки трехосного сжатия, которые позволяют определять оба типа характеристик. Использование установок трехосного сжатия дает возможность наиболее точно воспроизвести напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива и установить его механические характеристики. Данный тип испытаний широко применяется в различных сферах, от строительства до аграрного сектора.

Крупномасштабные установки трехосного сжатия позволяют выявить корреляционные зависимости механических характеристик от геометрических размеров образца [1], а также влияние степени окатанности частиц и неоднородности грунтового образца на прочностные и деформационные характеристики [2].

Установки трехосного сжатия стандартного размера используются для испытаний глинистых и песчаных грунтов. В случае с глинистыми грунтами испытания методом трехосного сжатия позволили исследователям установить широкий спектр зависимостей механических характеристик от физических характеристик глинистого грунта (плотность, влажность, текучесть, пластичность, гранулометрический состав) [3–5], а также от глубины залегания образца [6]. В случае с песчаным грунтом зависимость механических характеристик от физических выражалась на основе исследования

следующих показателей: дробимость частиц [7, 8], гранулометрический состав [9], влажность [10, 11].

В соответствии с современными тенденциями строительства в сфере возведения дорожных насыпей и гидротехнических сооружений все чаще становится необходимо определять прочностные характеристики усиленного грунта. Испытания грунта методом трехосного сжатия в ряде работ были выполнены на образцах песчаного грунта, армированного георешеткой [12] и отходами переработки хлопчатобумажных тканей [13]. Также актуальным методом усиления оснований в случае как глинистых, так и песчаных грунтов служит цементация. При этом трехосные испытания проводятся для определения механических характеристик грунтоцементного массива, представляющего собой систему «песок – цемент» [14], «глина – цемент» [15]. В рамках научной деятельности исследователями рассматривалась методика по укреплению глинистого грунта тонкими армирующими волокнами [16]. Для определения механических характеристик глинистых образцов трехосные испытания осуществлялись по консолидированно-дренированной схеме в крупномасштабной установке трехосного сжатия.

Установки трехосного сжатия дают возможность решать уникальные задачи, которые зачастую встают перед учеными. В публикациях [17, 18] исследовано влияние температуры и порового давления в грунтовом образце на его механические характеристики. Для составления экспериментальных зависимостей механических характеристик грунтового образца от порового давления и температуры была проведена серия трехосных испытаний по консолидированно-недренированной схеме.

В гидротехническом строительстве при возведении хвостохранилищ для последующего численного моделирования НДС системы «основание – сооружение» требуется определение механических характеристик отходов, складываемых в хвостохранилищах. Для этого в труде [19] выполнены трехосные испытания с целью установления механических

характеристик хвостов в зависимости от их химического состава.

Исходя из особенностей методик проведения испытаний, в процессе анализа результатов испытаний необходимо вносить поправки на упругие деформации силиконовой оболочки, а также учитывать коэффициент неравномерности расширения грунтового образца. Поправки оказывают влияние на значение вертикальных и горизонтальных напряжений, что в свою очередь будет воздействовать на получаемые прочностные и деформационные характеристики. Учет этих параметров в существующих нормативных документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия», необязателен.

В материалах научных исследований [1–19] в процессе обработки трехосных испытаний коэффициент неравномерности расширения также не получает должного внимания. Поэтому цель данной научной работы — уточнить влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца в численном (процентном) эквиваленте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе представлены результаты определения механических характеристик глинистого грунта в соответствии с двумя методами обработки результатов экспериментальных исследований.

Согласно первому методу в процессе обработки лабораторных испытаний был учтен коэффициент неравномерности расширения грунтового образца *b*. Этот метод основывается на рекомендациях Приложения Е ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия».

Второй метод базируется на исключении из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента *b* с последующим получением механических характеристик для каждого инженерно-геологического изыскания (ИГЭ).

Основные параметры испытаний, при которых проведены лабораторные исследования образцов глинистого грунта, представлены в табл. 1.

Для проведения трехосных испытаний применялось сертифицированное и поверенное оборудование производства ООО НПП «Геотек». Об-

Табл. 1. Параметры испытаний

Table 1. Test parameters

Тип грунта Type of soil	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Величина всестороннего обжатия, кПа Value of all-round compression, kPa	Схема испытания Test scheme
ИГЭ-1 — супесь пластичная EGS-1 is a plastic sandy loam	1,81	100	КД CD
		200	
		300	
ИГЭ-2 — глина тяжелая, полутвердая EGS-2 — clay is heavy, semi-hard	1,77	120	
		320	
		520	
ИГЭ-3 — суглинок легкий EGS-3 is a light loam	2,01	130	
		230	
		330	



Рис. 1. Общий вид прибора трехосного сжатия с камерой типа А

Fig. 1. General view of a triaxial compression device with type A camera

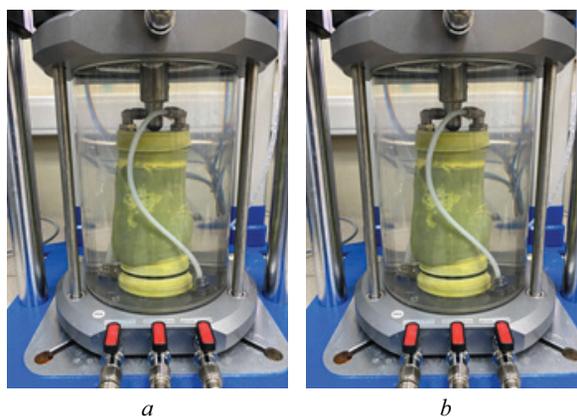


Рис. 2. Общий вид образца глинистого грунта в камере трехосного сжатия: *a* — до испытания; *b* — после испытания

Fig. 2. General view of the clay specimen in the triaxial compression chamber: *a* — before the test; *b* — after the test

Табл. 2. Результаты испытаний по двум методикам

Table 2. Test results using two methods

ИГЭ EGS	σ_3 , МПа σ_3 , MPa	С учетом коэффициента b Taking into account the b coefficient		Без учета коэффициента b Without taking into account the b coefficient	
		σ_1 , МПа σ_1 , MPa	E_{50} , кПа E_{50} , kPa	σ_1 , МПа σ_1 , MPa	E_{50} , кПа E_{50} , kPa
ИГЭ-1 EGS-1	0,100	0,299	5,73	0,316	5,47
ИГЭ-2 EGS-2	0,320	0,603	15,92	0,630	15,28
ИГЭ-3 EGS-3	0,230	0,445	11,45	0,455	10,94

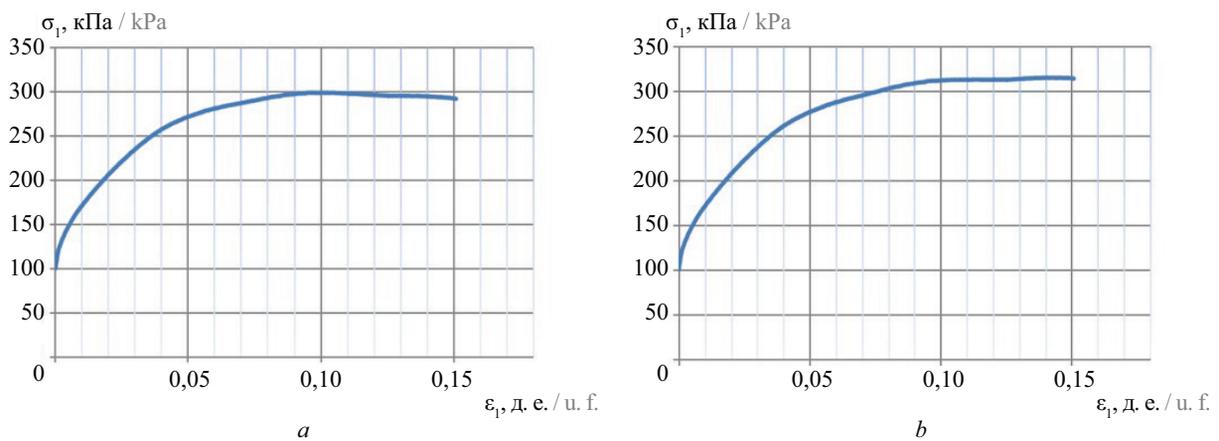


Рис. 3. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 3. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

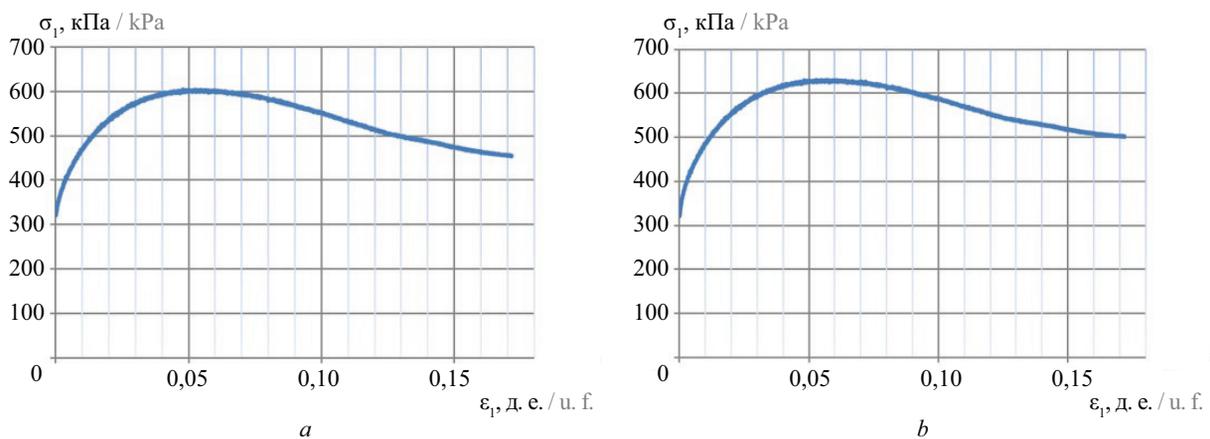


Рис. 4. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 4. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

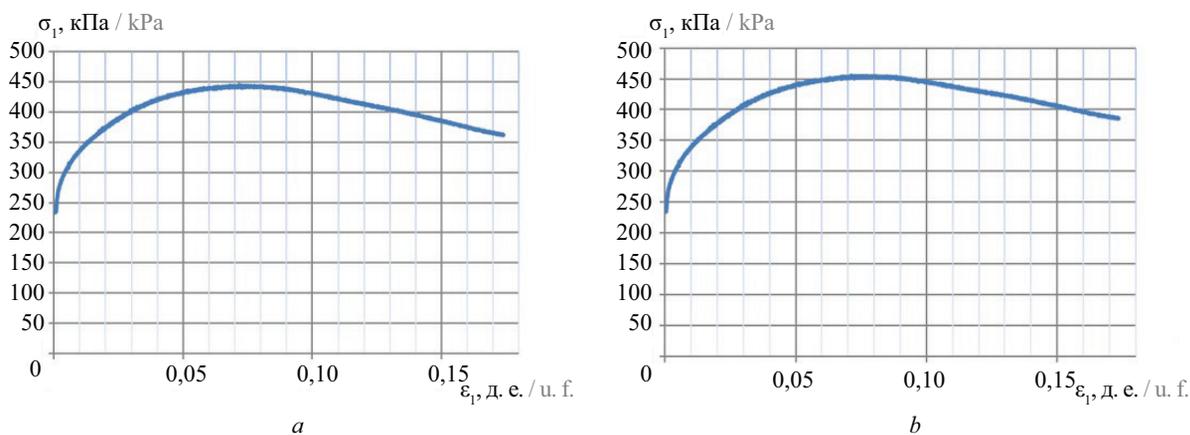


Рис. 5. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-3: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 5. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-3: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 3. Результаты испытаний по двум методикам

Table 3. Test results for EGS-1 using two methods

ИГЭ EGS	σ_3 , МПа σ_3 , МПа	С учетом коэффициента b Taking into account the b coefficient			Без учета коэффициента b Without taking into account the b coefficient		
		σ_1 , МПа σ_1 , МПа	ϕ , град. degree	C , кПа C , kPa	σ_1 , МПа σ_1 , МПа	ϕ , град. degree	C , кПа C , kPa
ИГЭ-1 EGS-1	0,100	0,299	23,9	13,9	0,316	25,3	14,6
	0,200	0,476			0,504		
	0,300	0,772			0,811		
ИГЭ-2 EGS-2	0,120	0,326	14,8	40,0	0,339	15,8	41,3
	0,320	0,603			0,630		
	0,520	1,000			1,039		
ИГЭ-3 EGS-3	0,130	0,284	15,9	19,3	0,289	16,3	20,1
	0,230	0,444			0,455		
	0,330	0,636			0,645		

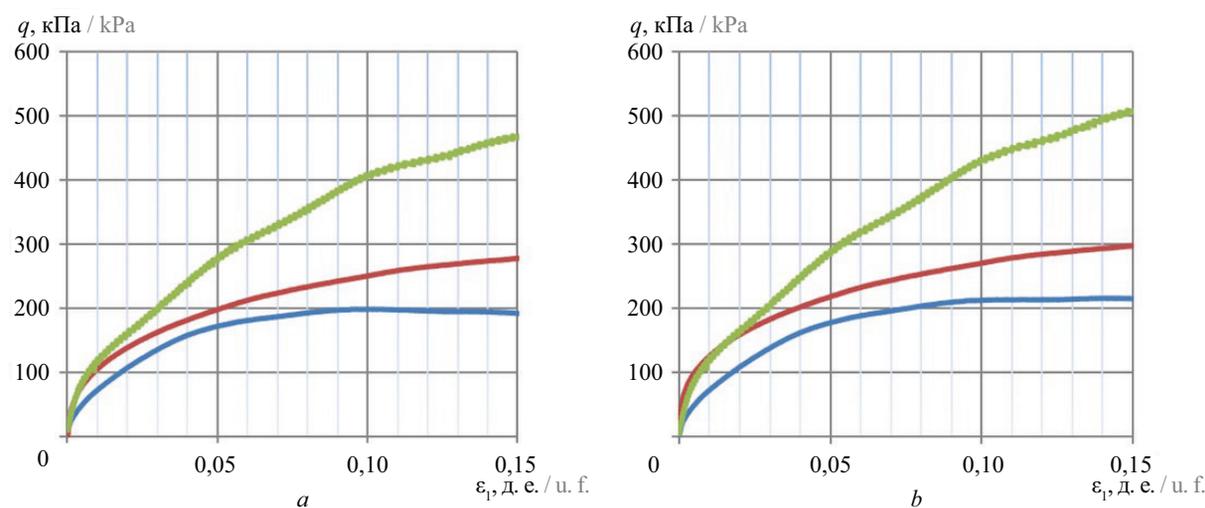


Рис. 6. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 6. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

ший вид прибора трехосного сжатия представлен на рис. 1.

Представлены результаты экспериментально-го исследования песчаного грунта с последующим установлением прочностных (удельное сцепление c , кПа, угол внутреннего трения φ , °) и деформационных (секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , МПа) характеристик в соответствии с методиками, описанными выше [20].

В ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия» приведена формула для определения коэффициента неравномерности расширения

образца грунта:

$$b = \frac{1 - \frac{A_c}{A_k}}{\frac{\Delta h_k}{h_c}}$$

где A_c — площадь поперечного сечения образца в конце этапа реконсолидации для НН-испытаний и этапа консолидации для КН- и КД-испытаний, см²; A_k — площадь поперечного сечения в средней части образца поле испытания, см²; Δh_k — полная деформация после испытания, см; h_c — высота образца в конце этапа реконсолидации для НН-испытаний и этапа консолидации для КН- и КД-испытаний, см.

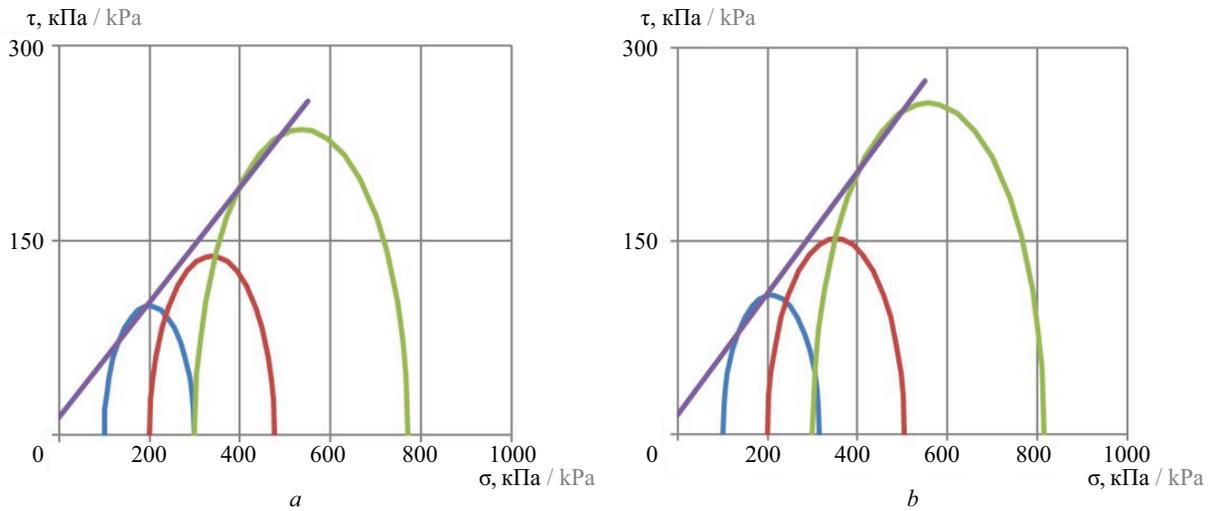


Рис. 7. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 7. Coulomb – Mohr diagram for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

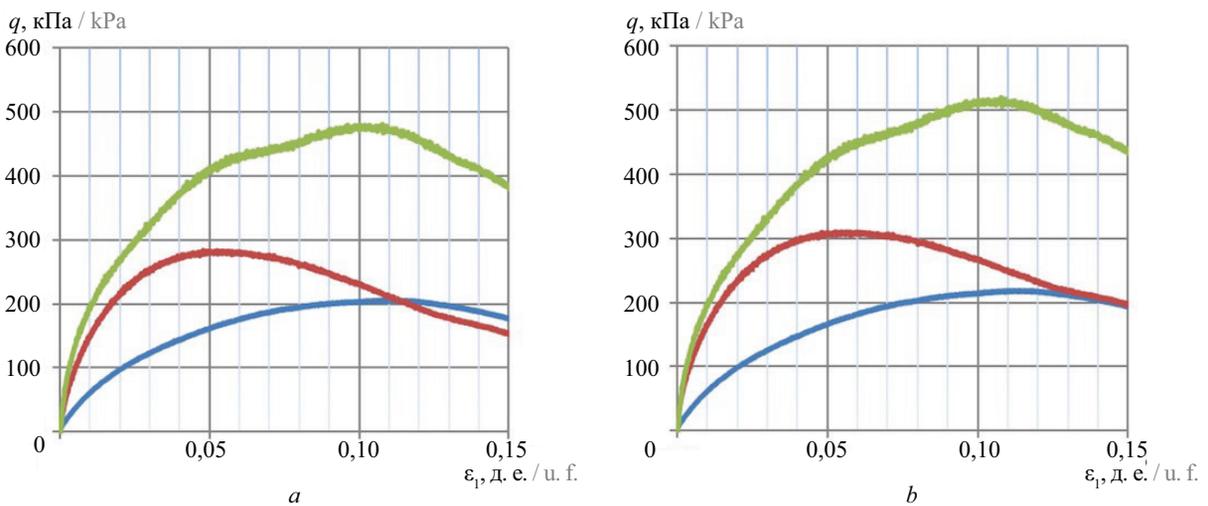


Рис. 8. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 8. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

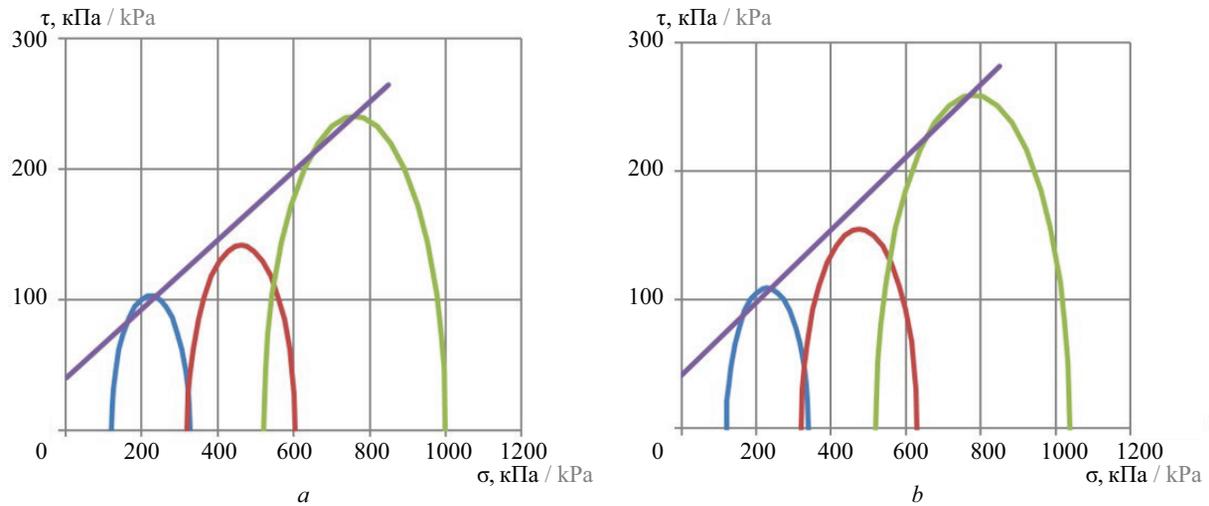


Рис. 9. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-2: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*

Fig. 9. Coulomb – Mohr diagram for EGS-2: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

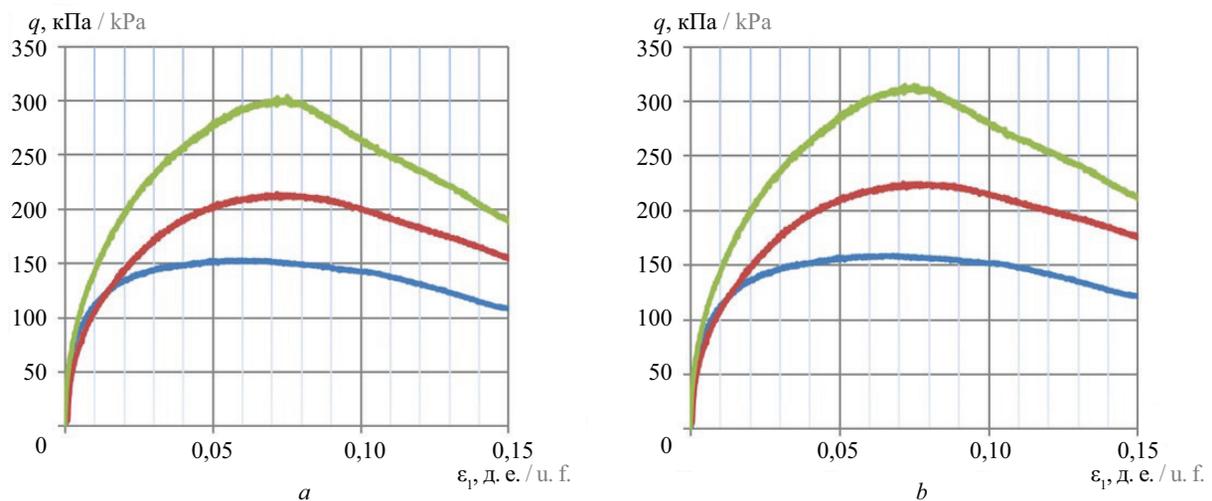


Рис. 10. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-3: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*

Fig. 10. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-1: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

На рис. 2 изображен образец глинистого грунта до и после испытания в камере трехосного сжатия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных трехосных испытаний построены графики зависимости относительных вертикальных деформаций от вертикальных напряжений ($\sigma_1 - \epsilon_1$) (рис. 3–5) с последующим определением прочностных характеристик (рис. 6–11). В табл. 2, 3 представлены результаты обработки трехосных испытаний в соответствии с двумя представленными методиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя данные экспериментальных исследований, определено, что коэффициент неравномерности расширения образца *b* оказывает значительное влияние на полученные значения механических характеристик глинистого грунта, а именно: значения угла внутреннего трения в среднем увеличились на 5%; значения удельного сцепления в среднем увеличились на 4,4%. Однако необходимо отметить, что, несмотря на увеличение прочностных характеристик испытанных образцов грунта, исключение из процесса обработки коэффициента *b* привело к снижению значений секущего модуля дефор-

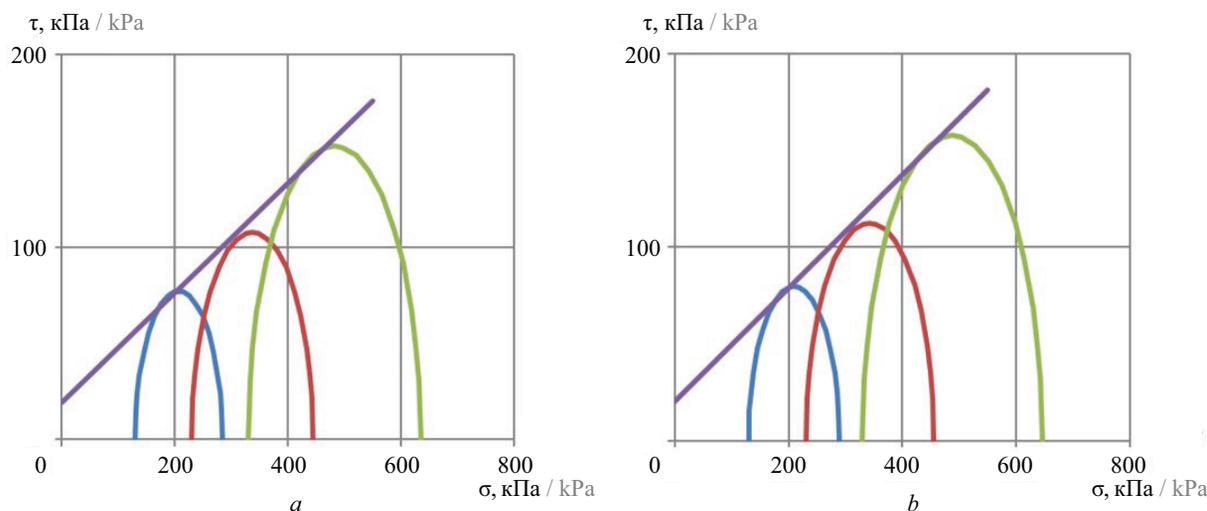


Рис. 11. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-3: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*

Fig. 11. Coulomb – Mohr diagrams for EGS-3: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

мации при 50%-ной прочности E_{50} в среднем на 4,5 %.

Полученные завышенные значения прочностных характеристик ϕ , c и заниженные значения деформационных характеристик E_{50} не являются критичными, однако для повышения точности расчетов, выполняемых на основе результатов, получаемых в результате камеральной обработки протоколов лабораторных испытаний, следует учитывать коэффи-

циент неравномерности расширения b образца.

В целях дальнейшего исследования корреляционных зависимостей по определению коэффициента b планируется проведение дополнительных экспериментальных исследований на образцах песчаного и глинистого грунта при различной степени влажности, плотности и других физико-механических характеристиках, оказывающих влияние на полученные результаты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. 2017. С. 937–941. EDN XSNIQV.
2. Ишмаев О.А., Филимонова Н.В. Результаты трехосных испытаний песков гравелистых в комплексе «АСИС» с диаметром образцов 100 мм // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 2 (66). С. 89–95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY.
3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay // Journal of Central South University. 2022. Vol. 29. Issue 2. Pp. 572–581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5
4. Королева И.В., Сагдатова М.Р. Экспериментальные исследования поведения серых глин в условиях трехосного сжатия при разной влажности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 228–235. EDN EUGJOR.
5. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil // Chilean Journal of Agricultural Research. 2021. Vol. 81. Issue 3. Pp. 357–367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357
6. Lan L., Zhang Q., Zhu W., Ye G., Shi Y., Zhu H. Geotechnical characterization of deep Shanghai clays // Engineering Geology. 2022. Vol. 307. P. 106794. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106794
7. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Issue 2. Pp. 321–334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010
8. Wils L., Van Impe P.O., Haegeman W. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions // Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015. Pp. 3449–3454.
9. Hazout L., Cherif Taiba A., Mahmoudi Y., Belkhatir M. Deformation characteristics of natural river

sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts // *Marine Georesources and Geotechnology*. 2022. Vol. 41. Issue 10. Pp. 1156–1174. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2122090

10. *Nandanwar M.R., Chen Y.* Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D // Paper presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014. 2014. Vol. 6. Pp. 4097–4106.

11. *Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H.* Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. Vol. 38. Issue 18. Pp. 1923–1952. DOI: 10.1002/nag.2285

12. *Benessalah I., Sadek M., Villard P., Arab A.* Undrained triaxial compression tests on three-dimensional reinforced sand: Effect of the geocell height // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Issue 5. Pp. 1694–1705. DOI: 10.1080/19648189.2020.1728581

13. *Pinho-Lopes M.* Sand reinforced with recycled cotton textiles from waste blue-jeans: Stress–Strain response // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022. Vol. 8. Issue 5. DOI: 10.1007/s40891-022-00404-z

14. *Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Atmatzidis D.K.* Stress-strain-strength and hydraulic performance of microfine cement grouted sands // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34. Issue 10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004433

15. *Yin Z., Zhang Q., Zhang X., Zhang J., Li X.* Shear strength of grouted clay: Comparison of triaxial tests to direct shear tests // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. Vol. 81. Issue 7. DOI: 10.1007/s10064-022-02739-3

16. *Ekinici A., Vaz Ferreira P.M., Rezaeian M.* The mechanical behaviour of compacted lambeeth-group clays with and without fibre reinforcement // *Geotextiles and Geomembranes*. 2022. Vol. 50. Issue 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.08.003

17. *Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y.* Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the south china sea // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

18. *Yan R., Yan M., Yu H., Yang D.* Influence of temperature and pore pressure on geomechanical behavior of methane hydrate-bearing sand // *International Journal of Geomechanics*. 2022. Vol. 22. Issue 11. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002580

19. *Zhang C., Pan Z., Yin H., Ma C., Ma L., Li X.* Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-15063-3

20. *Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А., Манукян А.В.* Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 10. С. 1574–1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586

Поступила в редакцию 26 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 7 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 8 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Заверович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, проректор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Георгий Олегович Анжело — кандидат технических наук, доцент, руководитель Научно-образовательного центра «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 852458, Scopus: 57201551199, ResearcherID: AAC-4538-2022, ORCID: 0000-0002-0011-7095; nocgeo@mail.ru;

Любовь Юрьевна Ермошина — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Илья Алексеевич Боков — студент, лаборант, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iliililia@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mirny A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Determination of the mechanical characteristics of coarse-clastic soils by direct tests in a three-axis device. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of international scientific conference*. 2017; 937-941. EDN XSNIQV. (rus.).
2. Ishmaev O.A., Filimonova N.V. Results of three-axis tests of gravel sands in the complex “ASIS pro” with a sample diameter of 100 mm. *News of the Ural State Mining University*. 2022; 2(66):89-95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY. (rus.).
3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay. *Journal of Central South University*. 2022; 29(2):572-581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5
4. Koroleva I.V., Sagdatova M.R. Experimental studies of gray clay behavior under conditions of triaxial compression at different moisture. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):228-235. EDN EUGJOR.
5. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2021; 81(3):357-367. DOI: 10.4067/S0718583920210003-00357
6. Lan L., Zhang Q., Zhu W., Ye G., Shi Y., Zhu H. Geotechnical characterization of deep Shanghai clays. *Engineering Geology*. 2022; 307:106794. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106794
7. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13(2):321-334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010
8. Wils L., Van Impe P.O., Haegeman W. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions. Proceedings of the XVI ECSMGE. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 3449-3454.
9. Hazout L., Cherif Taiba A., Mahmoudi Y., Belkhatir M. Deformation characteristics of natural river sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts. *Marine Georesources and Geotechnology*. 2022; 41(10):1156-1174. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2122090
10. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D. *Paper presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014*. 2014; 6:4097-4106.
11. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014; 38(18):1923-1952. DOI: 10.1002/nag.2285
12. Benessalah I., Sadek M., Villard P., Arab A. Undrained triaxial compression tests on three-dimensional reinforced sand: Effect of the geocell height. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022; 26(5):1694-1705. DOI: 10.1080/19648189.2020.1728581
13. Pinho-Lopes M. Sand reinforced with recycled cotton textiles from waste blue-jeans: Stress–Strain response. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022; 8(5). DOI: 10.1007/s40891-022-00404-z
14. Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Atmatzidis D.K. Stress-strain-strength and hydraulic performance of microfine cement grouted sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; 34(10). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004433
15. Yin Z., Zhang Q., Zhang X., Zhang J., Li X. Shear strength of grouted clay: Comparison of triaxial tests to direct shear tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022; 81(7). DOI: 10.1007/s10064-022-02739-3
16. Ekinci A., Vaz Ferreira P.M., Rezaeian M. The mechanical behaviour of compacted lambeth-group clays with and without fibre reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022; 50(1):1-19. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2021.08.003
17. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the south China sea. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015
18. Yan R., Yan M., Yu H., Yang D. Influence of temperature and pore pressure on geomechanical behavior of methane hydrate-bearing sand. *International Journal of Geomechanics*. 2022; 22(11). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002580
19. Zhang C., Pan Z., Yin H., Ma C., Ma L., Li X. Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-15063-3
20. Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A., Manukyan A.V. Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(10):1574-1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586 (rus.).

Received March 26, 2024.

Adopted in revised form on June 7, 2024.

Approved for publication on June 8, 2024.

BiONOTES: Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Georgy O. Angelo — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 852458, Scopus: 57201551199, ResearcherID: AAC-4538-2022, ORCID: 0000-0002-0011-7095; nocgeo@mail.ru;

Lyubov Yu. Ermoshina — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Iliia A. Bokov — student, laboratory assistant, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iliililia@yandex.ru.

Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.