

DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.07

УДК 692.115

ПОЛУЧЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВОЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.А. Сазонова¹, Д.А. Татьянников¹, А.Б. Пономарев^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июня 2023
Одобрена: 01 июля 2023
Принята к публикации:
24 июля 2023

Ключевые слова:

насыпные грунты, песчаная подушка, контроль качества, компрессионный модуль деформации, коэффициент уплотнения, динамический модуль деформации, экспресс-методы.

АННОТАЦИЯ

В настоящем исследовании авторами рассматриваются песчаные подушки, а именно процесс производства работ и контроль качества. Основной проблемой применения коэффициента уплотнения в качестве критерия оценки качества песчаных подушек – это невозможность расчетной оценки будущих деформаций фундаментов, а также длительность проведения лабораторных исследований по его определению. Таким образом, разработка технологического решения по применению экспресс-методов контроля уплотнения грунтовых конструкций, которые базируются на эмпирических данных и позволяют снизить экономические затраты на строительство, является актуальной задачей.

Непосредственным объектом исследования является песчаная подушка под производственное сооружение. В процессе устройства песчаной подушки проводился послойный контроль степени уплотнения по коэффициенту уплотнения с определением максимальной плотности согласно методике ГОСТ 22733-2016, и модулю деформации грунта по отобранным образцам грунта для компрессионных испытаний. Для каждого слоя коэффициент уплотнения определялся в пяти точках, модуль деформации в трех точках. Дополнительно проводились испытания при помощи динамического плотномера.

Основным результатом исследования является построение градуировочной зависимости компрессионного модуля деформации от динамического модуля упругости грунта по результатам статистической обработки. По результатам проверки установлено, что экспериментальные данные равнозначны, полученная модель является адекватной. Разница значений между экспериментальными данными и градуировочной зависимостью не превышает 18 %, что является хорошей сходимостью для эмпирических методов. Полученная экспериментальная зависимость позволяет с достаточной степенью точности оперативно производить контроль качества выполнения песчаной подушки.

© ПНИПУ

© Сазонова Светлана Александровна – старший преподаватель, e-mail: feliks150@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6231-5214.

Татьянников Даниил Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: danco777@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9494-2546.

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: andreypab@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6521-9423.

Svetlana A. Sazonova – Senior Lecturer, e-mail: feliks150@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6231-5214.

Daniil A. Tatiannikov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: danco777@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9494-2546.

Andrey B. Ponomarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: andreypab@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6521-9423.

OBTAINING THE EMPIRICAL CALIBRATION DEPENDENCE FOR EXPRESS ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE PERFORMANCE OF GROUND STRUCTURES

S.A. Sazonova¹, D.A. Tatiannikov¹, A.B. Ponomaryov^{1,2}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 June 2023
Approved: 01 July 2023
Accepted for publication:
24 July 2023

Keywords:

bulk soils, sand pad, quality control, constrained modulus, compacting factor, dynamic modulus of elasticity, express methods.

ABSTRACT

In this study, the authors consider sand pads, namely the production process and quality control. The main problem of using the compacting factor as a criterion for assessing the quality of sand pads is the impossibility of calculating future deformations of foundations, as well as the duration of laboratory studies to determine it. Thus, the development of a technological solution for the use of express methods for controlling the compaction of soil structures, which are based on empirical data and can reduce the economic costs of construction, is an urgent task.

The direct object of the study is the sand pad under the production facility. In the process of installing a sand pad, layer-by-layer control of the degree of compaction was carried out according to the compacting factor with the determination of the maximum density according to the method of GOST 22733-2016, and the modulus of soil deformation according to selected soil samples for compression tests. For each layer, the compaction coefficient was determined at 5 points, the deformation modulus at 3 points. Additionally, tests were carried out using a dynamic density meter.

The main result of the study is the construction of a calibration dependence of the constrained modulus on the dynamic modulus of elasticity of the soil based on the results of statistical processing. Based on the test results, it was found that the experimental data are equally accurate, the resulting model is adequate. The difference between the experimental data and the calibration dependence does not exceed 18 %, which is a good convergence for empirical methods. The obtained experimental dependence allows, with a sufficient degree of accuracy, to quickly control the quality of the sand pad.

© PNRPU

Введение

При создании любых грунтовых конструкций (таких как насыпи, подушки, основания под фундаменты и полы) необходимо обоснование технологии производства, а при выполнении работ обязательно выполнять контроль качества [1, 2]. Основным критерием качества выполнения любой грунтовой конструкции является принятая степень уплотнения [3], которую, согласно действующим нормативным документам, можно оценить при помощи коэффициента уплотнения либо модуля деформации. Если оценка по критерию коэффициента уплотнения относится именно к вопросу качества выполнения грунтового сооружения, то при помощи модуля деформации можно контролировать не только степень уплотнения, но и оценить деформации оснований от будущих эксплуатационных нагрузок.

Наиболее принципиальным вопросом является оценка возможных деформаций грунтовых конструкций подушек и насыпей, которые работают под нагрузкой. Подготовка основания под полы, обратная засыпка пазух фундаментов относится именно к технологическим особенностям возведения тех или иных конструкций, хотя в практике строительства есть примеры негативного влияния недостаточного уплотнения грунта обратной засыпки [4]. Стоит отметить, что недостаточное уплотнение грунтовых подушек и насыпей может привести к изменению расчетной схемы вышерасположенных конструкций зданий и сооружений [5].

В настоящем исследовании авторами рассматриваются непосредственно песчаные подушки. Сама технология выполнения данных конструкций заключается в послойной укладке инертных материалов (ПГС, песка, щебня) и их послойном уплотнении. Также при соответствующем обосновании в качестве материалов заполнителей возможно применение местных грунтов (экологически пригодных отходов производств, глинистых грунтов) [6, 7].

Основная проблема применения коэффициента уплотнения в качестве критерия оценки качества песчаных подушек – это невозможность расчетной оценки будущих деформаций фундаментов, а также длительность проведения лабораторных исследований по его определению.

Первый недостаток можно решить путем введения в качестве критерия оценки модуля деформации. Но определение модуля деформации, как и коэффициента уплотнения, требует наличия лабораторной базы и занимает достаточно большой промежуток времени.

При послойном выполнении песчаных подушек необходим контроль качества каждого слоя, после выполнения которого необходимо как минимум в течение суток ждать результата определения коэффициента уплотнения либо модуля деформации. В условиях реального строительства, особенно когда земляные работы выполняются в зимний период времени, это является весьма трудоемким процессом. После выполнения каждого слоя требуется выдерживать технологическую паузу, во время которой необходимо не допускать промораживание основания.

Полностью избежать вышеперечисленных недостатков возможно за счет применения различных экспресс-методов контроля качества выполнения грунтовых конструкций, которые достигаются применением статических и динамических пенетрометров, ударного и статического штампа, вибрационного метода [8, 9].

В ранее проведенных исследованиях [10, 11] авторами подробно описаны преимущества и недостатки различных экспресс-методов для контроля качества грунтовых конструкций. Предыдущие исследования, а также исследования других авторов [12, 13] позволяют сделать вывод о наибольшей применимости в реальных условиях метода динамических плотномеров (динамических штампов) [14, 15], который основан на измерении амплитуды полной осадки грунта под круглым штампом, при воздействии на него ударной нагрузки [16, 17].

В предыдущих исследованиях [11] при проведении контроля качества песчаных конструкций различными методами был зафиксирован достаточно большой разброс экспериментальных данных. Авторами отмечено, что при малых значениях коэффициента уплотнения (менее 0,92) наблюдалась неудовлетворительная сходимость результатов [18], а при промораживании основания динамический плотномер давал явно завышенные показания. Однако зависимость динамического модуля упругости от коэффициента уплотнения довольно ярко выражена, поскольку упругие деформации напрямую связаны с изменением пористости грунта при малых величинах нагружения.

Таким образом, разработка технологического решения по применению экспресс-методов контроля уплотнения грунтовых конструкций, которые базируются на эмпирических данных и позволяют снизить экономические затраты на строительство, является актуальной задачей.

Методы исследований и постановка задач

Непосредственным объектом исследования является песчаная подушка под производственное сооружение. Фундамент сооружения представляет собой фундаментную плиту с габаритными размерами 33,75 × 20,6, высотой 3 м. Часть фундамента выполнена на подго-

товленном основании в виде песчаной подушки высотой 1,4 м (рис. 1), другая часть фундамента опирается на известняк средней прочности. Для недопущения развития возможных неравномерных деформаций/кренов проектным решением являлось обеспечение однородности свойств песчаной подушки с достижением требуемого модуля деформации в 18–25 МПа и коэффициента уплотнения 0,95.

В данном грунтовом сооружении принципиальным являлось определение модуля деформации в виду того, что для оценки проектных осадок сооружения необходим именно этот механический параметр, так как коэффициент уплотнения не применяется в расчетах.

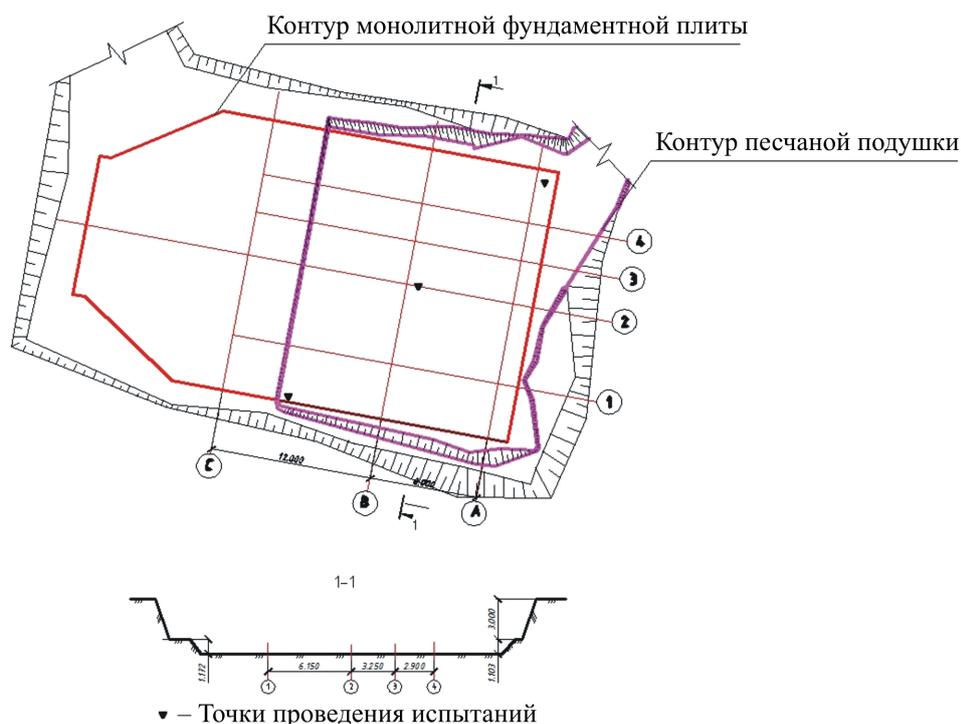


Рис. 1. Схема песчаной подушки и части основания на известняке
Fig. 1. Scheme of the sand cushion and parts of the base on limestone

Песчаная подушка выполнялась из песка мелкого однородного, плотного, маловлажного. Уплотнение песчаной подушки производилось слоями мощностью 0,15–0,3 м. Всего выполнено семь слоев уплотнения.

В процессе устройства песчаной подушки проводился послойный контроль степени уплотнения по коэффициенту уплотнения с определением максимальной плотности согласно методике ГОСТ 22733-2016 и модулю деформации грунта по отобранным образцам грунта для компрессионных испытаний. Для каждого слоя коэффициент уплотнения определялся в пяти точках, модуль деформации в трех точках.

Дополнительно проводились испытания при помощи динамического плотномера, принцип работы которого основан на падении груза массой 10 кг с высоты 70 см на нагрузочную плиту диаметром 30 см. Для каждого слоя динамический модуль упругости определялся в точках определения модуля деформации, в каждом слое по три точки.

Песчаная подушка выполнялась в зимний период времени. Для ряда слоев песчаной подушки не были выполнены требования по проектному коэффициенту уплотнения, данные слои были дополнительно уплотнены с повторными испытаниями на степень уплотнения. Работы по устройству песчаной подушки заняли один месяц. Каждый слой выпол-

нялся в течение одной рабочей смены. При выполнении работ было принято решение по дополнительному уплотнению слоев, которые не прошли проверку по коэффициенту уплотнения (3 слоя).

По результатам выполненных экспериментальных работ был накоплен массив данных послойных значений коэффициента уплотнения (k_{com}), модуля деформации (E_k) и динамического модуля упругости (E_d). Экспериментальные данные сведены в таблице.

Экспериментальные данные характеристик послойного уплотнения песчаной подушки

Experimental data on the characteristics of layer-by-layer compaction of a sand pad

№ п/п	E_d , МПа	E_k , МПа	k_{com}
1	57,77	22,23	0,95
2	36,72	28,9	0,926
3	28,33	24,47	0,982
4	27,65	26,7	0,96
5	29,16	33,4	0,956
6	30,79	22,23	0,926
7	30,49	26,7	0,968
8	29,65	26,7	0,958
9	33,01	28,9	0,96
Средние значения	33,73	26,69	0,954

При анализе полученных экспериментальных данных можно сделать следующие промежуточные выводы: при малых коэффициентах уплотнения до 0,95 модуль деформации остается постоянным, значения динамического модуля упругости превышают значения модуля деформации от 10 до 15 %.

Следует отметить, что определение коэффициента уплотнения и модуля деформации занимало от 1 до 1,5 дней (включая время транспортирования образцов до лаборатории), в то время как значение динамического модуля упругости можно получить непосредственно на строительной площадке. Однако в действующих нормативных документах отсутствуют требования об использовании в качестве критерия качества уплотнения грунтовых подушек динамического модуля упругости.

Результаты исследований

Существующие исследования по построению уравнения регрессии между коэффициентом уплотнения и динамическим модулем упругости базируются на накоплении большого массива экспериментальных данных [19], при этом в качестве факторов эксперимента необходимо дополнительно учитывать тип грунта, его физические параметры, количество проходок строительной техники и др.

В настоящем исследовании предлагается зависимость между модулем деформации и динамическим модулем упругости рассматривать по аналогии зависимости для неразрушающего контроля прочности бетона, когда эталоном является прямой неразрушающий метод (модуль деформации), а косвенный метод – динамический модуль упругости.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных была получена градуировочная зависимость в виде E_k , МПа, в виде:

$$E_k = -0,166E_d + 32,263.$$

Для наиболее наглядного представления результатов построены экспериментальные графики зависимости «модуль деформации – динамический модуль упругости», представленные на рис. 2.

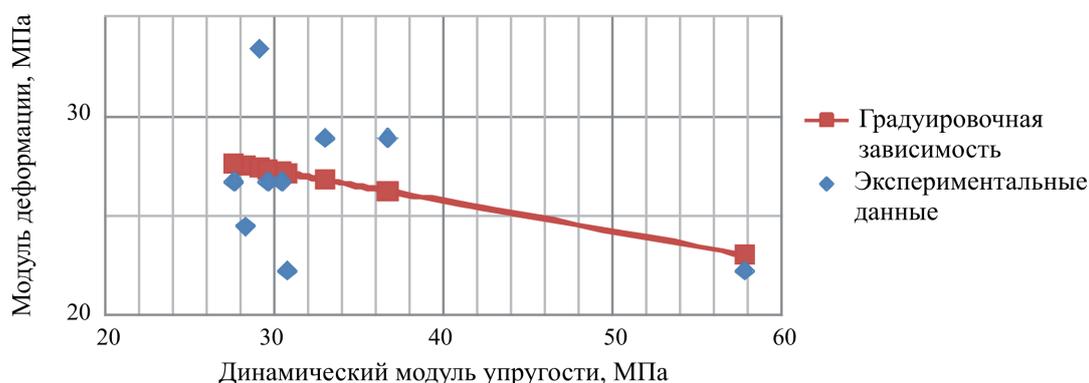


Рис. 2. Графики зависимости «модуль деформации – динамический модуль упругости» по экспериментальным данным и градуировочной зависимости
Fig. 2. Graphs of the dependence "modulus of deformation – dynamic modulus of elasticity" according to experimental data and calibration dependence

Была проведена статистическая оценка полученной градуировочной зависимости. Выполнена проверка воспроизводимости опыта по критерию Кохрена, а также проверена адекватность модели по критерию Фишера [14].

Теоретическое значение критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числе степеней свободы $k_1 = 2$, количестве точек плана $N = 9$ составило:

$$G_{\text{КохТеор}} \{0,05; 2; 9\} = 0,47.$$

Опытное значение критерия Кохрена:

$$G_{\text{КохОпыт}} = 0,43,$$

$$G_{\text{КохТеор}} > G_{\text{КохОпыт}}.$$

Теоретическое значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числе степеней свободы большей дисперсии $k_1 = 7$, числе степеней свободы меньшей дисперсии $k_2 = 18$ составило

$$F_{\text{Теор}} \{0,05; 7,18\} = 2,63.$$

Опытное значение критерия Фишера:

$$F_{\text{Опыт}} = 1,29,$$

$$F_{\text{Теор}} > F_{\text{Опыт}}.$$

Анализ результатов

По результатам проверки установлено, что экспериментальные данные равнозначны, полученная модель является адекватной [20].

Разница значений между экспериментальными данными и градуировочной зависимостью не превышает 18 %, что является хорошей сходимостью для эмпирических методов.

Полученная экспериментальная зависимость позволяет с достаточной степенью точности оперативно производить контроль качества выполнения песчаной подушки. Следует отметить, что полученная градуировочная зависимость является применимой только для песчаной подушки в рассматриваемой инженерной задаче для конкретного грунта подушки, толщины уплотняемого слоя, количества проходок строительной техники.

Заключение

1. Оценку качества уплотнения грунтовых сооружений, работающих под нагрузкой, рекомендуется проводить при помощи модуля деформации, так как коэффициент уплотнения не позволяет оценить возможные деформации будущего сооружения.

2. При строительстве грунтовых сооружений для уменьшения сроков производства земляных работ рекомендуется перед их началом построить экспериментальную градуировочную зависимость между модулем деформации экспресс-методом (динамическим модулем упругости).

3. В представленном исследовании авторами установлена экспериментальная градуировочная зависимость между модулем деформации и динамическим модулем упругости. Разница значений между экспериментальными данными и градуировочной зависимостью не превышает 18 %.

4. Производство работ по устройству песчаной подушки толщиной 1,4 м в зимний период заняло один месяц. Применение экспресс-методов для контроля степени уплотнения позволяет ускорить производство работ. В дальнейших исследованиях будет проведена экономическая оценка эффективности предлагаемой градуировочной зависимости.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.*

Библиографический список

1. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.
2. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction / J. Yao, M. Yue, H. Ma, C. Yang // *Sensors*. – 2023. – № 23 (4). – Article № 2183.
3. Chiselling and wheeling on sandy loam long-term no-tillage soil: Compressibility and load bearing capacity / D. Peres Da Rosa, J.M. Reichert, E.M. Lima, V. Trevisan Da Rosa // *Soil Research*. – 2021. – № 59 (5). – P. 488–500.
4. Некачественно выполненные обратные засыпки на просадочных грунтах как причина повышенного риска деформаций конструкций / А.Ю. Прокопов, А.А. Михайлов, Е.Ю. Евлахова // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 9 (60). – С. 66.
5. Оптимизация песчаной подушки / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, С.В. Глухова, А.П. Пугина // *Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 32–35. DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-4-32-35.
6. Correlation analysis of quality testing indexes of coarse grained soil subgrade of high-speed railway / Q. Wang, L. Chen, H. Lin, S. He, D. Chen // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – № 340 (5). – Article № 052025.

7. Татьянников Д.А. Применение переменного шага армирования геосинтетических материалов в фундаментных подушках из связных грунтов // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 126–135. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.10
8. Пономарев А.Б., Сазонова С.А., Румянцев С.Д. О современных методах экспресс-контроля характеристик насыпных грунтов // *Геотехника*. – 2017. – № 3. – С. 4–8.
9. Илюхин А.В., Борисов С.В., Лазукин Я.В. Основные методы контроля степени уплотнения грунтов // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2023. – № 1 (35).
10. Ponomaryov A.B., Sazonova S.A. The use of express method for determining the modulus of deformation of fill soil // *Challenges and innovations in geotechnics: Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, Astana, 05–07.08.2016*. – Astana: Taylor & Francis Group, 2016. – P. 283–286.
11. Сазонова С.А., Румянцев С.Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13
12. Sulewska M.J. The application of the modern method of embankment compaction control // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2004. – Vol. X, suppl. 1. – P. 45–50.
13. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2004. – № 10. – P. 45–50.
14. Комаров Д.А., Клевко В.И. Определение деформационных характеристик армогрунтового основания экспрессметодом с помощью динамического плотномера // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01
15. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control // *Soils and Foundations*. – 2021. – № 61. – P. 989–1002.
16. Александрова Н.П., Троценко Н.А. Применение измерителя жесткости грунта GeoGauge для оценки качества уплотнения при операционном контроле // *Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. – 2014. – № 3. – С. 40–47.
17. Сазонова С.А., Пономарев А.Б., Опарина А.А. Применение экспресс-метода для определения характеристик насыпных грунтов // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск, 29–31.05.2018*. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 458–462.
18. Александрова Н.П., Семенова К.Ю., Стригун К.Ю. Совершенствование методов экспресс оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна строительства автомобильных дорог // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. – 2015. – № 4. – С. 46–57.
19. К статистической обработке результатов сдвиговых испытаний грунтов / А.М. Караулов, К.В. Королев, Л.А. Бартоломей, Е.П. Брагарь // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 8–17. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.01
20. Мельников Р.В., Брагарь Е.П. Оценка точности результатов расчета МКЭ при использовании плоскостей симметрии в геотехнических задачах // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 28–39. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.03

References

1. Krutov V.I. Osnovaniya i fundamenti na nasypnykh gruntakh [Bases and foundations on bulk soils]. Moscow, Strojizdat, 1988, 223 p.
2. Yao J., Yue M., Ma H., Yang C. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction. *Sensors*, 2023, no 23 (4), article no 2183.
3. Peres Da Rosa D., Reichert J.M., Lima E.M., Trevisan Da Rosa V. Chiselling and wheeling on sandy loam long-term no-tillage soil: Compressibility and load bearing capacity. *Soil Research*, 2021, no 59 (5), pp. 488-500.
4. Prokopov A.Yu., Mikhaylov A.A., Yevlakhova Ye.Yu. Nekachestvenno vypolnennyye obratnyye zasypki na prosadochnykh gruntakh kak prichina povyshennogo riska deformatsiy konstruksiy [Poorly executed backfills on subsiding soils as a cause of increased risk of structural deformations]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2019, no 9 (60). p. 66.
5. Glukhov V.S., Khryanina O.V., Glukhova S.V., Pugina A.P. Optimizatsiya peschanoy podushki [Sand cushion optimization]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2019. T. 7, no 4. pp. 32-35. DOI 10.29039/2308-0191-2019-7-4-32-35
6. Wang, Q., Chen, L., Lin, H., He, S., Chen, D. Correlation analysis of quality testing indexes of coarse grained soil subgrade of high-speed railway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, no 340 (5), article no 052025.
7. Tat'jannikov D.A. Primenenie peremennogo shaga armirovaniya geosinteticheskikh materialov v fundamentnykh podushkakh iz svyaznykh gruntov [The use of a variable step of reinforcing geosynthetic materials in foundation pads from cohesive soils]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 126-135. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.10.
8. Ponomarev A.B., Sazonova S.A., Rummyantsev S.D. O sovremennykh metodakh ekspress-kontrolya kharakteristika nasypnykh gruntov [On modern methods of express control of the characteristics of bulk soils]. *Geotekhnika*, 2017, no 3, pp. 4-8.
9. Iljuhin A.V., Borisov S.V., Lazukin Ja.V. Osnovnye metody kontrolja stepeni uplotneniya gruntov [The main methods for controlling the degree of soil compaction]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 1 (35).
10. Ponomarev, A.B., Sazonova S.A. The use of express method for determining the modulus of deformation of fill soil. *Problemy i innovatsii v geotekhnike: Materialy 8-y Aziatskoy konferentsii molodykh inzhenerov-geotekhnikov*, Astana, 05–07 August 2016, 2016, pp. 283-286.
11. Sazonova, S.A., Rummyantsev S.D. Primeneniye ekspress-metodov dlya opredeleniya kharakteristik nasypnykh gruntov [The use of express methods for determining the characteristics of bulk soils]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, no 3. pp. 113-120. DOI 10.15593/2224-9826/2017.3.13.
12. Sulevskaya M.YU. The application of the modern method of embankment compaction control. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, vol. X, dop. 1. pp. 45–50.
13. Mariya Dzh.S. The application of the modern method of embankment compaction control. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, no. 10, pp. 45–50.
14. Komarov D.A., Kleveko V.I. Opredeleniye deformatsionnykh kharakteristik armogruntovogo osnovaniya ekspress metodom s pomoshch'yu dinamicheskogo plotnomera [Determination of the deformation characteristics of the reinforced soil base by the express method using a dynamic density meter]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2019, vol. 10, no. 4. pp. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.01.

15. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *Soils and Foundations*, 2021, no. 61, pp. 989–1002.

16. Aleksandrova N.P., Trocenko N.A. Primenenie izmeritelja zhestkosti grunta GeoGauge dlja ocenki kachestva uplotnenija pri operacionnom kontrole. *Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 2014, no. 3, pp. 40-47.

17. Sazonova S.A., Ponomarev A.B., Oparina A.A. Primeneniye ekspress-metoda dlja opredeleniya kharakteristik nasypnykh gruntov [Application of the express method for determining the characteristics of bulk soils]. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroyenii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Novoherkassk*, 29–31 May 2018. Novoherkassk, ООО «Lik», 2018, pp. 458-462.

18. Aleksandrova N.P., Semenova K.Ju., Strigun K.Ju. Sovershenstvovanie metodov jekspress ocenki kachestva uplotnenija gruntov zemljanogo polotna stroitel'stva avtomobil'nyh dorog [Application of the GeoGauge soil stiffness tester to assess the quality of compaction during operational control]. *Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 2015, no. 4. pp. 46-57.

19. A.M. Karaulov, K.V. Korolev, L.A. Bartolomej, E.P. Bragar'. K statisticheskoj obrabotke rezul'tatov sdvigovyh ispytaniy gruntov [On the Statistical Processing of the Results of Shear Tests of Soils]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 8-17. DOI 10.15593/2224-9826/2020.3.01

20. Mel'nikov R.V., Bragar' E.P. Ocenka tochnosti rezul'tatov rascheta MKJe pri ispol'zovanii ploskostej simmetrii v geotekhnicheskikh zadachah [Estimation of the accuracy of the FEM calculation results when using symmetry planes in geotechnical problems]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 2, pp. 28–39. DOI: 10.15593/ 2224-9826/2020.2.03