

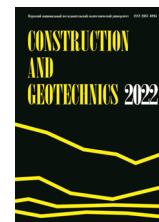


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 4, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.10

УДК 692.115

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА АРМИРОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ФУНДАМЕНТНЫХ ПОДУШКАХ ИЗ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Д.А. Татьянанников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 23 сентября 2022

Одобрена: 11 ноября 2022

Принята к публикации:

15 ноября 2022

Ключевые слова:

тканый геотекстиль, связные грунты, армированная фундаментная подушка, переменный шаг армирования, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследования характера работы армированных фундаментных подушек из связного грунта. В качестве материала подушки рассматривается уплотненный мягкопластичный суглинок, армирующим элементом принят тканый геотекстиль. Такое конструктивное решение фундаментной подушки, как правило, связано с невозможностью или высокой стоимостью применения классических инертных материалов для данных конструкций. Ранее проведенные исследования показали высокую эффективность рационального расположения армирующих горизонтальных геосинтетических элементов в подушках из песка.

Основной целью данного исследования являлась апробация известного подхода по применению переменного шага армирования для фундаментных подушек из связных грунтов. Поставленная цель достигалась путем численного эксперимента (решения тестовых задач) в программном комплексе Plaxis 2D при различных типах армирования, рассматривались четыре типа армирования.

Основными результатами исследований являются полученные схемы вертикальных напряжений, а также значения максимальной нагрузки, которую способно выдержать основание без разрушения. По результатам исследований была скорректирована формула для определения положения армирующих слоев при переменном шаге армирования в подушках из связных грунтов. Также было установлено, что при расположении слоев шагом 200 мм и менее армирующий эффект в связных грунтах практически не возникает. Подтверждено, что переменный шаг армирования позволяет достигать максимального «включения в работу» геосинтетических материалов по сравнению с другими рассмотренными в рамках данного исследования типами армирования. Кроме того, доказано, что в рассматриваемом исследовании переменный шаг армирования в подушках из связных грунтов является наиболее эффективным с точки зрения воспринимаемой нагрузки и применяемого количества армирующих слоев.

© ПНИПУ

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

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

APPLICATION OF VARIABLE PITCH OF REINFORCEMENT OF GEOSYNTHETIC MATERIALS IN FOUNDATION PADS FROM CONTINUOUS SOILS

D.A. Tatiannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 23 September 2022
Approved: 11 November 2022
Accepted for publication:
15 November 2022

Keywords:

woven geotextile, cohesive soils,
reinforced foundation pad, variable
reinforcement spacing, numerical
modeling.

ABSTRACT

The results of the study of the nature of the work of reinforced foundation pads from cohesive soil. Compacted soft-plastic loam is considered as the pad material, woven geotextile is used as a reinforcing element. Such a constructive solution of the foundation pad, as a rule, is associated with the impossibility or high cost of using classical inert materials for these structures. Previous studies have shown the high efficiency of the rational arrangement of reinforcing horizontal geosynthetic elements in sand pads.

The main purpose of this study was to test the well-known approach to the use of variable reinforcement spacing for foundation pads made of cohesive soils. The goal was achieved by a numerical experiment (solving test problems) in the Plaxis 2D software package with various types of reinforcement, 4 types of reinforcement were considered.

The main results of the research are the obtained schemes of vertical stresses, as well as the values of the maximum load that the base can withstand without destruction. Based on the results of the research, the formula for determining the position of the reinforcing layers with a variable reinforcement step in pads of cohesive soils was corrected. It was also found that when the layers are arranged in steps of 200 mm or less, the reinforcing effect in cohesive soils practically does not occur. It is confirmed that the variable reinforcement spacing allows achieving the maximum «inclusion in the work» of geosynthetics in comparison with other types of reinforcement considered in the framework of this study. In addition, it has been proven that in the study under consideration, the variable reinforcement spacing in cohesive soil pads is the most effective in terms of perceived load and the number of reinforcing layers applied.

© PNRPU

Введение

Как известно, применение грунтовых подушек при устройстве фундаментов мелкого заложения в ряде случаев является экономически выгодным решением [1–4]. В основном грунтовые подушки выполняют из инертных материалов: песок, песчано-гравийная смесь (ПГС), щебень и др. Однако известны примеры, когда в качестве заполнителя применяют безопасные отходы производств, строительный мусор или связные грунты [5]. Использование связных грунтов в фундаментных подушках целесообразно при строительстве в отдаленных районах, где доставка строительных материалов несет крайне большие транспортные расходы. К подобным примерам можно отнести объекты нефтегазового комплекса, которые достаточно часто находятся на расстоянии, превышающем 250 км от областных центров. В этом случае проектные организации, стараясь сократить издержки, предусматривают уплотненные подушки из местного грунта, который, как правило, представлен суглинками, глинами от мягкопластичной до полутвердой консистенций. Однако использование подобного материала накладывает определенные сложности как в самом строительстве, так и в дальнейшей эксплуатации сооружений.

Существенно улучшить конструкции грунтовых (фундаментных) подушек позволяет внедрение армирующих геосинтетических материалов [1–4, 6]. В данном исследовании автором предлагается опробовать применение переменного шага армирования горизонтальных геосинтетических материалов в подушках из связных грунтов. Подробно суть метода переменного шага армирования представлена в источниках [1, 6]. При переменном

шаге армирования расстояние между армирующими элементами определяется согласно формуле $\Delta h = (n - 1) \cdot 100 + 200$, где n – номер армирующего слоя. Вне зависимости от расчетного положения последнего армирующего элемента [1] его необходимо размещать по подошве фундаментной подушки. Данный слой совместно с задачей армирования выполняет функцию разделения слоев [7].

Основная часть

Для проверки эффективности переменного шага армирования в фундаментных подушках из связных грунтов были сформулированы тестовые задачи, которые заключались в серии численных экспериментов сильнодеформируемого грунта основания, улучшенного армированной подушкой из связного грунта [1, 8]. Нагрузка на фундаментную подушку передавалась через модель ленточного фундамента шириной 1 м.

Численный эксперимент проведен в программном комплексе Plaxis 2D с использованием грунтовой модели Мора – Кулона. С целью оценки результатов полученных исследований с предыдущими работами [6, 8] грунтовые условия были приняты на основании материалов с исследованием переменного шага армирования в песчаных подушках [1], данные представлены в табл. 1. Ленточный фундамент принят железобетонный и моделировался как грунт с моделью материала *liner elastic*

Характеристики материала подушки приняты по результатам испытаний на объектах по контролю строительства земляных сооружений нефтяных месторождений на территории Пермского края.

Таблица 1

Физико-механические параметры грунтов

Table 1

Physical and mechanical parameters of soils

ИГЭ	Наименование грунта	Мощность, м	γ , кН/м ³	ϕ , град	c , кПа	E , МПа	ν
1	Суглинок тугопластичный	0,8	19,9	21	29	13,5	0,35
2	Суглинок мягкопластичный	7,2	19,1	16	14	8,7	0,35
3	Суглинок тугопластичный	0,8	20,0	24	40	25	0,35
4	Аргиллит сильновыветрелый, трещиноватый	10,3	21,0	12,7	52	30	0,35
–	Материал подушки – суглинок мягкопластичный	–	19,1	10	37	10,5	0,35

В качестве критерия оценки эффективности различных типов армирования фундаментных подушек принято значение максимальной нагрузки, которую способна выдержать конструкция искусственного основания без разрушения [6].

Численный эксперимент выполнялся в условиях плоской деформации. Размеры подушки были приняты на основании предыдущих исследований [8] и составили, м: $h_n = 1,2$ (высота подушки), $b_n = 2,5$ (ширина подошвы подушки), $l = 2,5$ (ширина армирующего материала) [5]. Расчетная схема неармированной подушки из связного грунта для численного моделирования в программном комплексе Plaxis 2D приведена на рис. 1.

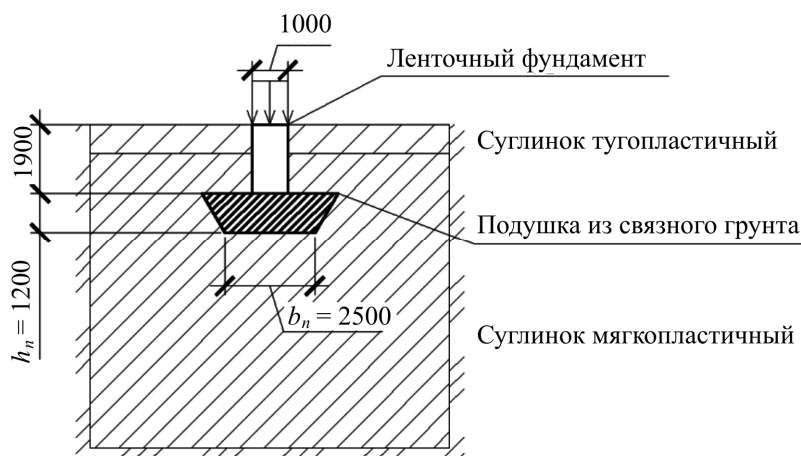


Рис. 1. Расчетная схема подушки из связного грунта:
 h_n – высота подушки; b_n – ширина подошвы подушки
 Fig. 1. Calculation scheme of a pad of cohesive soil:
 h_n is the pad height; b_n – width of the sole of the pad

В качестве армирующего материала в данном исследовании рассматривался тканый геотекстиль [1, 6, 9] – материал, наиболее часто применяющийся для армирования в условиях нашей страны. Кроме того, экспериментально доказано, что применение геотекстильных материалов в связных грунтах более эффективно в сравнении с георешетками, которые более хорошо себя зарекомендовали в песчаных и крупнообломочных грунтах. Характеристики тканого геотекстиля приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические параметры грунтов

Table 2

Mechanical characteristics of woven geotextile

Максимальное значение линейной жесткости, кН/м	Пределы относительной деформации, %	Кратковременная прочность на разрыв, кН/м
350 / 282	3–6 / 10–16	47,4 / 46,6

Примечание: в числителе указаны значения вдоль, в знаменателе – поперек материала.

В рамках данного исследования было принято четыре типа армирования фундаментных подушек: с постоянным шагом, м: $\Delta h = 0,2$, $\Delta h = 0,3$, $\Delta h = 0,4$ [8], а также переменный шаг $\Delta h = (n - 1) \cdot 100 + 200$. Для моделирования контактной работы грунта с геосинтетическим материалом были введены интерфейсные элементы, коэффициент трения геосинтетика по грунту был принят на основании [7, 10] равным $0,5 \text{tg} \varphi = 0,29$, так как отсутствуют данные по испытанию на сдвиг.

Результаты

При выполнении первоначальных расчетов было установлено, что при расположении первого армирующего слоя на расстоянии 200 мм и менее от подошвы фундамента происходит снижение нагрузки на грунт основания. Предположительно данный эффект возника-

ет из-за «проскальзывания» материала по грунту. Поэтому была скорректирована формула по определению переменного шага армирования, и она составила $\Delta h = (n - 1) \cdot 100 + 300$ с обязательным размещением последнего слоя по подошве фундаментной подушки.

По результатам численного моделирования программный комплекс Plaxis позволяет получить схемы распределения напряжений и деформаций в моделируемом искусственном основании из грунтового массива с армированной подушкой. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования в виде схем распределения напряжений [6, 11–14], σ_z , kH/m^2 .

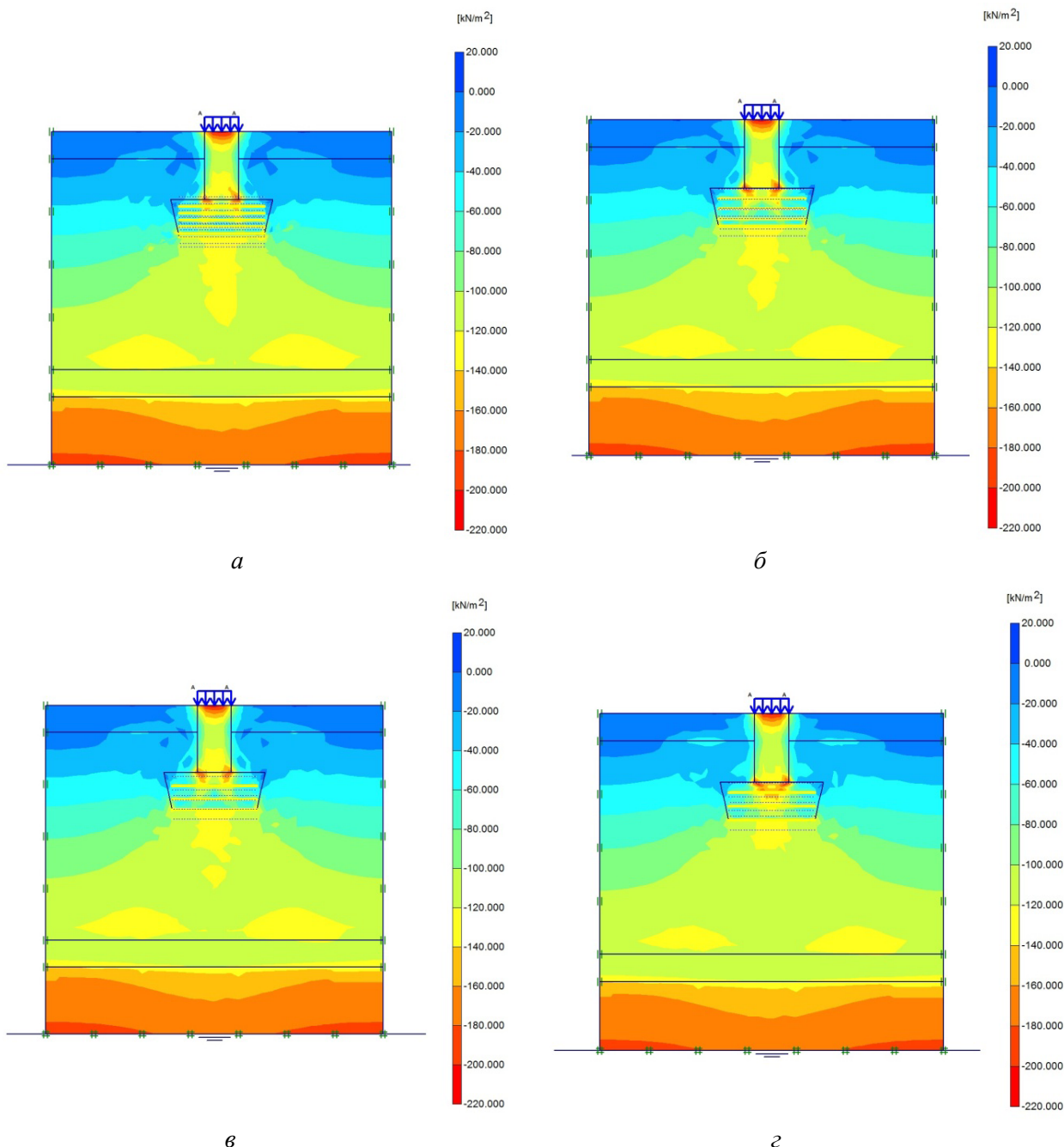


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений основания с фундаментной подушкой, армированной тканым геотекстилем с различными шагами, мм:

a – 200; *б* – 300; *в* – 400; *г* – переменный шаг (300/400/500)

Fig. 2. The distribution of vertical stresses of the base, with a foundation pad reinforced with woven geotextile with different pitches, mm: *a* – 200; *б* – 300; *в* – 400; *г* – variable pitch (300/400/500)

Анализ схем вертикальных напряжений, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующие промежуточные выводы: наибольшая концентрация напряжений возникает на краевых (угловых) точках фундамента, на схемах рис. 4, а–в можно отметить, что разрушение основания (отклик программы soil body collapse) произошло до формирования уплотненного ядра разрушения, что свидетельствует о низкой «адгезии» геосинтетических материалов со связным грунтом фундаментной подушки. Однако при переменном шаге армирования (см. рис. 2, г) отчетливо видно формирование уплотненного ядра разрушения в теле фундаментной подушки [1, 6, 15], что свидетельствует о достижении основанием предельной критической нагрузки и максимальной «адгезии» между геосинтетическими материалами и связным грунтом.

Для наиболее полного сравнения установленных параметров работы фундаментных подушек при различных типах армирования был введен параметр удельной несущей способности [16]. Удельная несущая способность отражает не только техническую эффективность армирования (величину нагрузки, которую способно воспринять искусственное основание без разрушения), но и экономическую составляющую в виде количества слоев армирования. Удельная несущая способность определяется как отношение максимальной нагрузки N (кН/м) к площади геосинтетических материалов. Полученные значения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица с показателями эффективности различных типов армирования фундаментных подушек

Table 3

Summary table with performance indicators of various types of foundation pad reinforcement

№ п/п	Тип армирования подушки	Количество слоев / площадь слоев ($A_{арм}$), м ²	Максимальная нагрузка N , кН/м	Удельная несущая способность ($N / A_{арм}$)
1	Без армирования	–	210	–
2	Шаг армирования 200 мм	5 / 12,5	250	20
3	Шаг армирования 300 мм	4 / 10	330	33
4	Шаг армирования 400 мм	3 / 7,5	300	40
5	Переменный шаг в 300/400/500 мм	3 / 7,5	340	45,3

Анализ результатов

Полученные значения удельной несущей способности позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективной конструкцией армированных фундаментных подушек из связных грунтов является конструкция с переменным шагом армирования, так как максимальное значение в 45,3 было получено именно при переменном шаге армирования. Кроме того, было установлено, что при шаге армирования 200 мм и меньше за счет низкого коэффициента трения между геосинтетиком и связным грунтом наблюдается «проскальзывание материала» [17, 18], армирующие слои не успевают включиться в совместную работу как единый геомассив [19, 20].

Максимальная нагрузка (340 кН/м), которую способно выдержать грунтовое основание, получена при использовании переменного шага армирования, количество слоев соста-

вило три, наиболее близкое значение максимальной нагрузки (330 кН/м) получено при шаге армирования 300 мм. Таким образом, рациональное расположение меньшего количества армирующих слоев позволяет достигать наилучших результатов с точки зрения максимальной нагрузки, которую способно выдержать грунтовое основание без разрушения.

Выводы

1. Введение армирующих геосинтетических материалов в фундаментные подушки из связного грунта оказывает положительный эффект, увеличивается максимальная нагрузка, которую способно выдержать основание без разрушения.

2. Постепенное увеличение количества армирующих слоев до четырех приводит к росту максимальной нагрузки на основании до 330 кН/м. В то же время увеличение слоев армирования до пяти приводит к обратному эффекту, происходит снижение удельной несущей способности, так как геосинтетический материал не успевает включиться в работу со связным грунтом.

3. При переменном шаге армирования по схемам напряжений зафиксировано формирование уплотненного ядра разрушения в теле фундаментной подушки, что свидетельствует о достижении основанием предельной критической нагрузки и максимальном включении в работу армирующих геосинтетических материалов в связном грунте.

4. Наиболее эффективной конструкцией подушки является подушка, армированная с переменным шагом, однако для связных грунтов была скорректирована формула для определения шага армирования, она имеет следующий вид: $\Delta h = (n - 1) \cdot 100 + 300$, где n это количество слоев армирующих элементов.

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

***Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад авторов.** Вклад 100 %.*

Библиографический список

1. Татьянаников Д.А. Совершенствование конструкции песчаной подушки, армированной горизонтальными геосинтетическими элементами, и ее расчет на слабом основании: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – 141 с.

2. Бай В.Ф., Лузин А.Ю. Многоярусная система песчаных подушек с замкнутым армированием в качестве фундаментов для малоэтажных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 71–77. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.08

3. Ширанов А.М., Невзоров А.Л. Физическое моделирование армированной песчаной подушки в основании фундамента // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08

4. Скворцов Д.С., Краев А.Н., Краев А.Н. Обоснование параметров армированной по контуру теплоизоляционной подушки в условиях распространения сезоннопромерзающих пучинистых грунтов [Электронный ресурс] // Вестник Евразийской науки. – 2021. – № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/22SAVN321.pdf> (дата обращения: 10.08.2022).

5. Методы подготовки и устройства искусственных оснований: учебн. пособие / Р.А. Мангушев [и др.]. – СПб.: АСВ, 2012. – 280 с.
6. Ponomarev A.B., Tat'yannikov D.A. Analysis of the performance of sand cushions reinforced with horizontal geosynthetic elements // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 371–377. DOI: 10.1007/s11204-020-09617-8
7. Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements EBGEO. – Ernst & Sohn, 2011.
8. Татьянанников Д.А., Пономарев А.Б. Численное моделирование работы конструкций армированных фундаментных подушек // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 11. – С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.21-31
9. Клевеко В.И. Оценка величины осадки фундамента на глинистых основаниях, армированных горизонтальными прослойками // *Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности*. – 2012. – № 1. – С. 89–98.
10. Tatiannikov D.A., Kleveko V.I. Investigation of the interaction of geosynthetics with ground on the example of shear test and pull-out test // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development – Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. – 2015. – Vol. 6. – P. 3389–3394.
11. Kleveko V.I. Model and Field experimental studies of reinforced clay bases // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Т. 1928. – P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012032
12. Мирсяпов И.Т., Шарафутдинов Р.А. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания армированного вертикальными и горизонтальными элементами // *Известия КГАСУ*. – 2017. – № 1 (39). – С. 153–158.
13. Готман Н.З., Пантелеев Ю.И. Проектирование противокаровой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов и системы сигнализации // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.01
14. Tatiannikov D.A., Ponomaryov A.B. Application of variable pitch reinforcement with horizontal geosynthetic elements in pads made from cohesive soils // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1928. – P. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012051
15. Цытович Н.А. *Механика грунтов*. – М.: Гостстройиздат, 1963. – 636 с.
16. Kleveko V.I. Application of a base reinforced with a horizontal geosynthetic layer for the foundation of a steel tank // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1928. – P. 012040. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012040
17. Тимофеева Л.М. *Армирование грунтов (теория и практика применения)*. – Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1991. – 478 с.
18. Тимофеева Л.М. Расчет оснований с армированными грунтовыми подушками по предельным состояниям // *Основания и фундаменты в геологических условиях Урала: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т*. – Пермь, 1991. – С. 24–31.
19. Тер-Мартиросян З.Г. *Механика грунтов*. – М.: АСВ, 2005. – 488 с.
20. Тер-Мартиросян З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие свай большой длины с окружающим многослойным и подстилающими грунтами // *Вестник МГСУ*. – 2021. – № 2. – С. 168–175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175

References

1. Tat'yannikov D.A. Sovershenstvovaniye konstruktsii peschanoy podushki, armirovannoy gorizontaln'nyimi geosinteticheskimi elementami, i yeye raschet na slabom osnovanii [Improvement of the design of a sand cushion reinforced with horizontal geosynthetics and its calculation on a weak foundation]. Ph. D. thesis. Moscow, 2019, 141 p.
2. Bai V.F., Luzin A.Iu. Multi layered system of sandy pillows with locked reinforcement for low-rise construction foundation. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 71–77. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.08.
3. Shiranov A.M., Nevzorov A.L. Fizicheskoe modelirovanie armirovannoi peschanoi podushki v osnovanii fundamenta [Physical modeling of a reinforced sand base of the foundation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08.
4. Skvortsov D.S., Kraev A.N., Kraev A.N. Obosnovanie parametrov armirovannoi po konturu teploizolatsionnoi podushki v usloviakh rasprostraneniia sezonopromerzaiushchikh pochinytykh gruntov [Justification of parameters of the contour reinforced thermal insulation pillow in conditions of seasonally freezing frozen soils]. *Vestnik Evraziiskoi nauki*, 2021, no. 3, available at: <https://esj.today/PDF/22SAVN321.pdf> (accessed 10 August 2022).
5. Mangushev R.A. [et al.]. Metody podgotovki i ustroystva iskusstvennykh osnovanii [Methods of preparation and installation of artificial foundations]. Saint Petersburg, ASV, 2012, 280 p.
6. Ponomarev A.B., Tatyannikov D.A. Analysis of the performance of sand cushions reinforced with horizontal geosynthetic elements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 371–377. DOI: 10.1007/s11204-020-09617-8.
7. Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements EBGEO. Ernst & Sohn, 2011.
8. Tatiannikov D.A., Ponomarev A.B. Chislennoe modelirovanie raboty konstruktsii armirovannykh fundamentnykh podushek [Numerical modeling of reinforced foundation pillow structures]. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 11, pp. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.21-31.
9. Kleveko V.I. Otsenka velichiny osadki fundamenta na glinistykh osnovaniyakh, armirovannykh gorizontaln'nyimi prosloikami [Assessment of foundation settlement on clay foundations reinforced with horizontal interlayers]. *Vestnik PNIPU. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2012, no. 1, pp. 89–98.
10. Tatiannikov D.A., Kleveko V.I. Investigation of the interaction of geosynthetics with ground on the example of shear test and pull-out test. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development – Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 2015, vol. 6, pp. 3389-3394.
11. Kleveko V.I. Model and Field experimental studies of reinforced clay bases. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, pp. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012032.
12. Mirsaiapov I.T., Sharafutdinov R.A. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie gruntovogo osnovaniia armirovannogo vertikal'nymi i gorizontaln'nyimi elementami [Stress-strain state of the foundation reinforced by vertical and horizontal elements]. *Izvestiia KGASU*, 2017, no. 1 (39), pp. 153–158.
13. Gotman N.Z., Panteleev Iu.I. Proektirovanie protivokarstovoi zashchity avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniem geosinteticheskikh materialov i sistemy signalizatsii [The karst protection of

highways using geosynthetic materials and alarm systems design]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.01.

14. Tatiannikov D.A. Ponomaryov A.B. Application of variable pitch reinforcement with horizontal geosynthetic elements in pads made from cohesive soils. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, pp. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012051.

15. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Goststroizdat, 1963, 636 p.

16. Kleveko V.I. Application of a base reinforced with a horizontal geosynthetic layer for the foundation of a steel tank. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, pp. 012040. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012040.

17. Timofeeva L.M. *Armirovanie gruntov (teoriia i praktika primeneniia)* [Soil reinforcement (theory and practice)]. Perm, Permskii politekhnicheskii institut, 1991, 478 p.

18. Timofeeva L.M. *Raschet osnovanii s armirovannymi gruntovymi podushkami po pre-del'nym sostoianiiam* [Calculation of foundations with reinforced ground cushions according to the limit states]. *Osnovaniia i fundamenty v geologicheskikh usloviakh Urala: mezhvuz. sb. nauch. trudov*. Perm, Permskii politekhnicheskii institut, 1991, pp. 24–31.

19. Ter-Martirosian Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, ASV, 2005, 488 p.

20. Ter-Martirosian Z.G., Akuletskii A.S. *Vzaimodeistvie svai bol'shoi dliny s okruzhaiushchimi mnogoslainym i podstilaiushchimi gruntami* [Interaction of long piles with the surrounding layered and underlying soils]. *Vestnik MGSU*, 2021, no. 2, pp. 168–175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175.