

ОТДЕЛЬНОСТОЯЩИЙ ФУНДАМЕНТ СО СТУПЕНЧАТОЙ ПОДОШВОЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В. С. Сафарян

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

FREESTANDING FOUNDATION WITH STEPPED BASE. RESULTS OF A FULL-SCALE EXPERIMENT

Vage S. Safaryan

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Несмотря на значительное число существующих решений, вопрос оптимизации геометрии отдельностоящих фундаментов мелкого заложения остается актуальным и недостаточно изученным. Объектом настоящего исследования являются фундаменты со ступенчатой подошвой, для подтверждения эффективности которых были проведены три различных эксперимента: цифровое моделирование, лабораторные испытания, натурный эксперимент. В первую очередь основания сравнивались по показателю абсолютной осадки, в каждом из экспериментов фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал себя более эффективным по сравнению с аналогом с плоской подошвой (приблизительно на 30 %). В ходе проведения натурного эксперимента при итоговом давлении под подошвой фундамента 18 т/м² осадка фундамента с плоской подошвой составила 70.67 мм, в то время как фундамент со ступенчатой подошвой сел на 49.32 мм. Натурный эксперимент подтвердил результаты предыдущих опытов, фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку существенно меньше, чем аналог с плоской подошвой. В будущих исследованиях планируется

Abstract. Despite the large number of existing solutions, the issue of optimizing the structure of freestanding shallow foundations is still relevant because of poorly studying. The object of the study is foundations with stepped base. To confirm the efficiency of these foundations, we conducted three different experiments: digital modelling, laboratory tests and full-scale experiment. First, the foundations were compared in terms of absolute settlement. In each of the experiments, the foundation with a stepped base was more efficient than its flat-base analogue (by about 30 %). During the full-scale experiment, at a final pressure under the foundation base of 18 t/m², the foundation with flat base settled by 70.67 mm, while the foundation with stepped base settled by 49.32 mm. The experiment confirmed the results of the previous experiments: the foundation with a stepped base showed a substantially smaller settlement than the flat base analogue. In future studies, we plan to investigate the operation of strip foundations with stepped base in more detail, to determine the internal forces appearing in the body of the foundations, and to define the need of reinforcement for foundations with stepped base.

более подробно изучить работу ленточных фундаментов со ступенчатой подошвой, определить внутренние усилия, появляющиеся в теле фундаментов, а также необходимость в армировании фундаментов со ступенчатой подошвой.

Ключевые слова: фундамент мелкого заложения, столбчатый фундамент, отдельностоящий фундамент, ленточный фундамент, эффективный фундамент, ступенчатая подошва, неплоская подошва, механика грунтов, осадки фундаментов

Key words: shallow foundation, columnar foundation, freestanding foundation, strip foundation, efficient foundation, stepped base, non-flat base, soil mechanics, settlement of foundation

Для цитирования: Сафарян, В. С. Отдельностоящий фундамент со ступенчатой подошвой: результаты натурного эксперимента / В. С. Сафарян. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-17-25. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 17–25.

For citation: Safaryan, V. S. (2023). Freestanding foundation with stepped base. Results of a full-scale experiment. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 17-25. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-17-25.

Введение

Важной частью любого здания или сооружения является фундамент. Стоимость устройства несущих конструкций нулевого цикла при неглубоком заложении может составлять до 10 % стоимости строительства.

Самыми распространенными фундаментами мелкого заложения являются ленточные и столбчатые. Эти фундаменты являются безальтернативными для одноэтажных промышленных или сельскохозяйственных зданий, они также широко используются в частной застройке и при строительстве малоэтажных зданий жилого, общественного и административного назначения [1–3].

Исследования вариантов конфигураций фундаментов неглубокого заложения направлены на изучение зависимости геометрии подошвы и напряженно-деформированного состояния грунтового основания, несущей способности фундамента. Использование более эффективных конструкций или технологий устройства таких фундаментов может принести существенный экономический эффект для отрасли, выражаемый в снижении трудоемкости и материалоемкости при строительстве нулевого цикла.

Исследователи предлагают различные методы оптимизации устройства фундаментов неглубокого заложения [4]. Например, Н. М. Бородачевым решена задача по уменьшению концентрации реактивных давлений [5]. Ученым предложено интегральное уравнение, при частном решении которого одной из наиболее оптимальных форм подошвы является окружность с некоторым радиусом, величина которого зависит от геологических условий.

Еще одно решение по устройству фундаментов мелкого заложения с неплоской формой опирания на грунт предложено Я. А. Пронозиным, он рекомендует использовать подошвы фундамента в виде оболочки [6, 7]. По сравнению со стандартными решениями фундаменты-оболочки обладают большим набором преимуществ (таких как уменьшение глубины сжимаемой толщи, увеличение несущей способности, уменьшение осадки и др.). Такие фундаменты были реализованы при строительстве ряда многоэтажных объектов в Тюменской области. Однако их использование в малоэтажном строительстве нецелесообразно, так как технология изготовления криволинейной поверхности фундаментов достаточно сложная, что может привести к завышению стоимости

фундаментов зданий, основания которых не воспринимают большие нагрузки.

Конфигурации эффективных фундаментов неглубокого заложения с плоской подошвой были рассмотрены также А. В. Глушковым [8]. В его исследованиях особо подчеркнута роль «арочного эффекта», при котором крестообразное или лучевое строение плоской подошвы включает в работу дополнительный объем грунта за пределами проекции фундамента. Это позволяет существенно снизить материалоемкость без потери несущей способности фундамента.

Криволинейную подошву фундаментов неглубокого заложения также изучают и за рубежом. Так, в [9] авторы исследуют несущую способность фундаментов мелкого заложения со ступенчатой подошвой на склонах, сложенных прочными грунтами, а в [10] изучают поведение неглубоких сферических оболочек.

Однако, несмотря на значительное число предлагаемых методов оптимизации и готовых решений, упрощение технологии изготовления, уменьшение материалоемкости и трудоемкости при устройстве фундаментов мелкого заложения, не воспринимающих большие нагрузки и устраиваемых в слабых дисперсных грунтах, является актуальной задачей.

В этой статье предлагается более эффективная конструкция для фундаментов мелкого заложения с неплоской подошвой – ступенями вниз (рис. 1). Основанием для данного решения могут служить следующие тезисы [11–14]:

- ступенчатая подошва может быть вписана в оптимальную [4] форму подошвы, что приведет к более равномерному распределению напряжений в основании;
- консольные участки тела фундамента (ступени) находятся сверху, при передаче нагрузки на грунтовое основание часть напряжений создает дополнительное обжимающее усилие, тем самым повышая трение по боковой поверхности (рис. 2). В то же время фундамент с классической геометрией расширяется книзу, и помимо полезной нагрузки нижние ступени воспринимают вес вышележащего грунта;
- у фундамента со ступенчатой подошвой больше угловых точек, из которых идет развитие зон пластических деформаций грунта, благодаря чему значение второго критического давления при прочих равных у данных фундаментов выше;
- площадь соприкосновения фундамента предлагаемой конструкции и грунтов существенно больше по сравнению с фундаментами с плоской подошвой, что также может привести к увеличению ее несущей способности.

Важным преимуществом измененных фундаментов является уменьшение объемов земляных работ при их устройстве. В связных грунтах с соответствующим показателем текучести данные фундаменты могут устраиваться безопалубочным способом в собственном котловане, что существенно уменьшает трудоемкость по

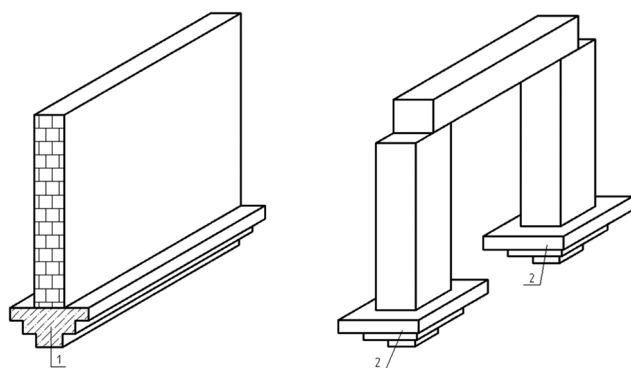


Рис. 1. Фундаменты со ступенчатой подошвой:

1) ленточный, 2) столбчатый

Fig. 1. Foundations with stepped base:

1) strip foundations, 2) columnar foundations

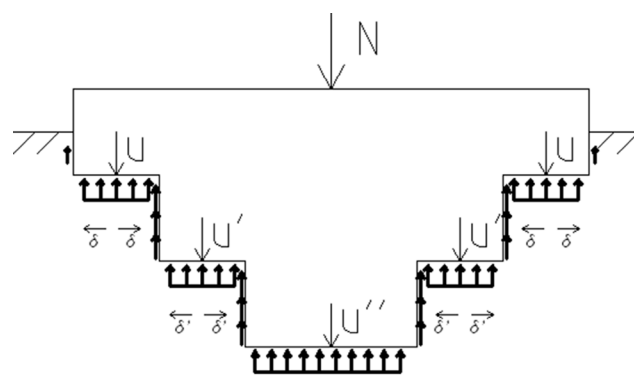


Рис. 2. Возникновение трения по боковой

поверхности в ступенчатой подошве

Fig. 2. Occurrence of lateral surface friction

in a stepped base

их устройству. В несвязных же грунтах эффект уменьшения объемов земляных работ достигается за счет клинообразной формы фундамента (рис. 3).



Рис. 3. Визуализация котлованов с одинаковыми параметрами (углом откосов, материалоемкостью и технологическими отступами от краев конструкций)

для фундаментов ступенями вверх и вниз
Fig. 3. Visualisation of foundation pit with the same parameters (angle of dip, consumption of materials and technological offsets from the edges of structures) for foundations with up and down steps

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются фундаменты со ступенчатой подошвой. В программном комплексе Plaxis 3D было проведено цифровое сравнительное моделирование фундаментов с плоской и ступенчатой подошвой. Использовались две модели грунта: Мора – Кулона и линейно-упругая. Основным критерием сравнения была величина осадки фундамента. По результатам моделирования фундаменты со ступенчатой подошвой в зависимости от геологических условий, способа моделирования грунта и собственной геометрии продемонстрировали меньшую

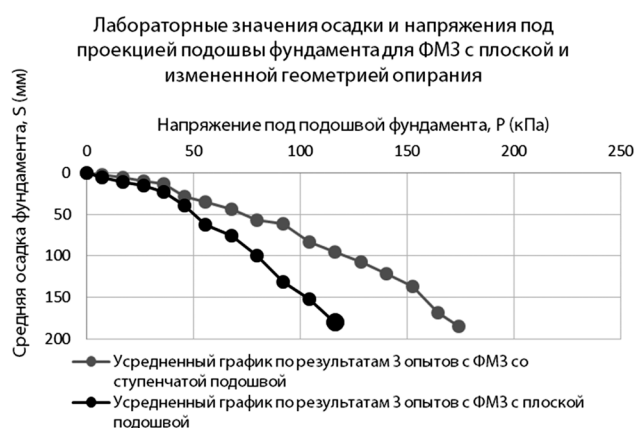


Рис. 4. Результаты лабораторного эксперимента
Fig. 4. Results of the laboratory experiment

осадку (от 6 до 28 %) по сравнению с фундаментами с плоской подошвой.

Руководствуясь данными цифрового моделирования фундаментов [15], была поставлена задача подтвердить эффективность конструкции фундаментов мелкого заложения со ступенчатой подошвой в ходе лабораторных испытаний.

На базе экспериментальной лаборатории Тюменского индустриального университета были проведены сравнительные испытания моделей фундаментов с плоской и ступенчатой подошвой при работе в условиях слабых водонасыщенных глинистых грунтов, результаты опытов представлены на графике (рис. 4).



Рис. 5. Геология участка
Fig. 5. Geology of the site

Эксперимент наглядно показал, что фундаменты со ступенчатой подошвой в аналогичных грунтовых условиях демонстрируют осадку приблизительно на 30 % меньше, чем фундаменты с плоской подошвой. Также было установлено, что по сравнению с аналогом с неизменной подошвой фундамент с измененной подошвой более устойчив к случайным эксцентриситетам и внецентренному нагружению [16–17].

Экспериментальная часть и результаты

Следующим этапом исследований было проведение натурных испытаний фундаментов с неплоской подошвой. Площадка для испытаний выбиралась исходя из геологических условий. Поскольку прочные грунты не требуют дополнительных мероприятий по увеличению их несущей способности, нашей целью было испытать модели фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах. Испытания проводились на территории поселка Березняковского рядом с Тюменской кольцевой

автодорогой. Геологические условия участка соответствовали поставленной задаче (рис. 5)

Испытания грунтов фундаментами с разной геометрией подошвы проводились согласно ГОСТ 20276.1-2020¹. Заранее были изготовлены две модели фундаментов – с плоской и ступенчатой подошвой, их геометрические размеры были приближены к размерам реально используемых конструкций. Также важными условиями были простота изготовления и удобство проведения дальнейших расчетов (рис. 6).

Перед началом эксперимента для удаления толстого слоя насыпного грунта был выкопан котлован. Глубина погружения фундамента со ступенчатой подошвой относительно верха котлована составляла 600 мм, фундамент с плоской подошвой был погружен на 400 мм. Разница в глубине погружения обуславливалась тем, что изначально стояла цель сравнить фундаменты с одинаковой материалоемкостью в грунте. Планировалось погрузить плоский фундамент до отметки середины ступен-

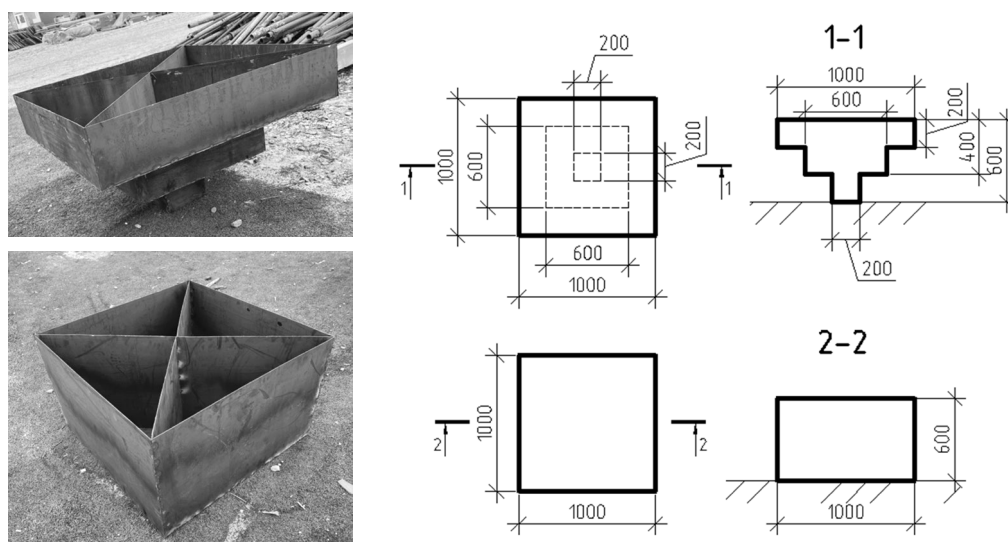


Рис. 6. Модели фундаментов

Fig. 6. Models of foundation

¹ ГОСТ 20276.1-2020. Грунты. Метод испытания штампом = Soils. Plate bearing test methods : межгосударственный стандарт : взамен ГОСТ 20276-2012 в части метода испытания штампом : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2020 г. № 480-ст в качестве национального стандарта РФ с 1 января 2021 г. / разработан НИИОСП им. Н. М. Герсеева, АО «НИЦ «Строительство» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174754> (дата обращения: 12.08.2023).

чатого – 0.3 м, но для удобства расчетов и дальнейшей математической обработки результатов глубина погружения была изменена и соответствовала отметке низа второй ступени. Таким образом, плоский фундамент в грунте занял пространство 0.4 м³, ступенчатый – 0.28 м³. Нагрузки прикладывались ступенчато с шагом 1 000 кг. Передача нагружения осуществлялась посредством специальных крестовин и гидравлических домкратов. Сравнивались показатели осадок фундаментов, данные снимали с помощью датчиков перемещения часового типа и специально смонтированных реперных систем со «столиками» (рис. 7).

Показания приборов снимали регулярно до достижения стабилизации грунтов. Условием стабилизации была принята осадка не более 0.1 мм за 2 часа. Новая ступень прикладывалась только после достижения стабилизации.

Эксперимент начался в августе и продлился 30 дней. Итоговая нагрузка для обоих фундаментов составила 18 000 кг. Модели вели себя во многом согласно ожиданиям. Итоговая осадка фундамента с плоской подошвой составила 70.67 мм, а фундамента со ступенчатой подошвой – 49.32 мм. Результаты эксперимента приведены на итоговом графике (рис. 8).



Рис. 7. Смонтированные установки для проведения эксперимента
Fig. 7. Mounted installations for the experiment

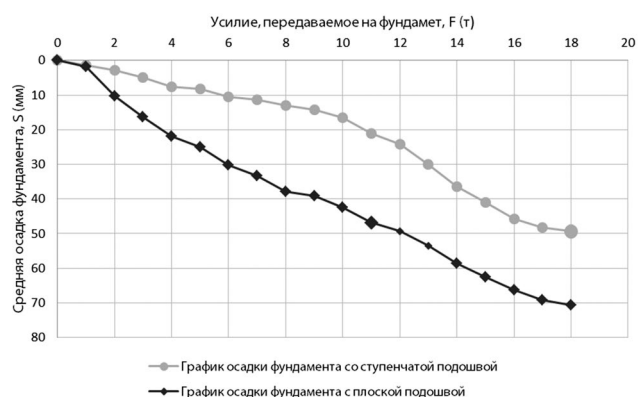


Рис. 8. Результаты натурного эксперимента
Fig. 8. Results of the full-scale experiment

Выводы

В ходе проведения эксперимента было достигнуто давление 18 т/м² под подошвой фундаментов (для ступенчатого фундамента – под проекцией подошвы). Такое давление характерно для реальных фундаментов мелкого заложения, устроенных в дисперсных грунтах, в связи с чем мы считаем, что проведенный эксперимент максимально приближен к реальным условиям работы конструкций.

Фундамент с плоской подошвой на последней ступени испытаний сел на величину – 70.67 мм; фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку – 49.32 мм. Так, при прочих равных условиях фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку на 30.2 % меньше стандартного фундамента. Натурный эксперимент подтвердил результаты лабораторных опытов и доказал существенно большую эффективность исследуемых фундаментов в слабых дисперсных грунтах по сравнению с распространенными стандартными конструкциями.

Фундаменты неглубокого заложения с модифицированной подошвой имеют большой прикладной потенциал. Их изучение и дальнейшее внедрение позволит принести существенную экономическую выгоду, выраженную в снижении трудоемкости и материалоемкости строительства, а также повысит надежность и долговечность вновь возводимых зданий.

Несмотря на то, что в ходе проведения экспериментов удалось получить результаты, подтверждающие эффективность работы фун-

даментов со ступенчатой подошвой, считаем необходимым в дальнейших исследованиях изучить также работу ленточных фундаментов со ступенчатой подошвой, влияние формы подошвы на распределение напряжений в грунтовом массиве, разработать методику расчета фундаментов со ступенчатой геометрией подошвы.

Благодарности

Автор выражает благодарность коллективу АО «Тюменьтел» и лично генеральному директору А. А. Овеяну за предоставление участка для эксперимента и всестороннюю поддержку при его проведении; коллективу ООО «Сибиком» и лично директору С. В. Котовичу за оказание помощи в организации и проведении натурных испытаний, а также заведующему кафедрой строительных конструкций Тюменского индустриального университета В. Ф. Баю за ценные советы и помощь в планировании исследования.

Также важными вопросами являются: определение внутренних усилий, возникающих в фундаментах со ступенчатой подошвой, определение необходимости армирования таких фундаментов, более глубокая оценка влияния формы подошвы на несущую способность фундаментов при внецентренном загрузении [18].

Acknowledgements

The author would like to express his gratitude to the staff of JSC "Tyumenitel" and personally to A. A. Oveyan, General Director, for providing the site for the experiment and comprehensive support during its implementation; to the staff of LLC "Sibicom" and personally to S. V. Kotovich, Director, for assistance in organising and conducting full-scale tests; and to V. F. Bai, Head of the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, for valuable advices and assistance in planning the study.

Библиографический список

1. Алексеев, С. И. Механика грунтов. Основания и фундаменты / С. И. Алексеев. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2019. – 180 с. – ISBN 978-5-4323-0339-4.
2. Беспалова, М. В. Механика грунтов в задачах и примерах / М. В. Беспалова ; Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2021. – 63 с. – ISBN 978-985-6550-98-3.
3. Механика грунтов, основания и фундаменты / сост. П. А. Кравченко, В. Н. Парамонов, О. С. Кувалдина. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. – 36 с.
4. Бай В. Ф. Повышение эффективности фундаментов мелкого заложения / В. Ф. Бай, В. С. Сафарян. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-65-72. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 1 (99). – С. 65–72.
5. Бородачев, Н. М. Об управлении распределением реактивных давлений под подошвой фундамента / Н. М. Бородачев. – Текст : непосредственный // Сопротивление материалов и теория сооружений : республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Вып. 18. – Киев: Будівельник, 1972. – С. 8–11.
6. Пронозин, Я. А. Взаимодействие ленточно-оболочечных фундаментов с сильносжимаемым грунтовым основанием : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пронозин Яков Александрович, 2016. – 368 с. – Текст : непосредственный.
7. Патент № 2393297 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/01. фундамент : № 2009116522/03 : заявл. 29.04.2009 : опубл. 27.06.2010 / Я. А. Пронозин, О. С. Порошин, Р. В. Мельников ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет».
8. Глушков, А. В. Влияние формы и размеров подошвы фундаментов на напряженно-деформированное состояние основания : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Глушков Алексей Вячеславович. – Тюмень, 2016. – 22 с.

9. Maeda, Yo. Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes / Yo. Maeda, H. Ochiai. – Текст : непосредственный // Memory of the Faculty of Engineering, Kyushu University. – 1992. – Vol. 52. – No. 2. – P. 201–232. – URL: <https://www7.civil.kyushu-u.ac.jp/geotech/cd/data/106.pdf>.
10. Hong, T. Axisymmetric shells and plates on tensionless elastic foundations / T. Hong, J. G. Teng, Y. F. Luo. – DOI 10.1016/s0020-7683(98)00228-5. – Текст : электронный // International Journal of Solids and Structures. – 1999. – Vol. 36. – No. 34. – P. 5277–5300. – URL: <https://ru.zlib-articles.se/book/4163288/ce92e0> (date of the application: 15.08.2023).
11. Das, B. M. Principles of geotechnical engineering / B. M. Das, Kh. Sobhan. – Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States : Cengage Learning. – 2012. – 756 p. – Текст : непосредственный. – URL: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583609876-principles-of-geotechnical-engineering-8th-das.pdf>.
12. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плит для ленточных фундаментов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / М. С. Грицук. – Брест, 1998. – 283 с. – Текст : непосредственный.
13. Архипов, Д. Н. Взаимодействие грунтового основания и сборных ленточных фундаментов с геометрически изменяемой формой подошвы : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Архипов Дмитрий Николаевич. – Волгоград, 2006. – 24 с. – Текст : непосредственный.
14. Кятлов, Н. Х. Проектирование оснований и фундаментов / Н. Х. Кятлов, Р. Н. Кятлов. – Москва : Издательство «Юрайт», 2023. – 327 с. – Текст : непосредственный.
15. Мартюшева, А. И. Моделирование деформаций основания под штампами с различной формой подошвы / А. И. Мартюшева. – Текст : непосредственный // Нефть и газ Западной Сибири : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 02–03 ноября 2017 года. – Том 1. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 154–157.
16. Тетиор, А. П. Об устойчивости основания под фундаментами с криволинейной формой подошвы / А. П. Тетиор. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 5. – С. 14.
17. Рыбин, В. С. Определение оптимальной формы и размеров подошвы внецентренно нагруженных фундаментов мелкого заложения / В. С. Рыбин, Л. В. Рыбина. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 1. – С. 6–9.
18. Игнатюк, В. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования работы фундаментных плит с криволинейной поверхностью опирания : специальность 01.02.03 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Игнатюк Виктор Юлианович. – Москва, 1981. – 177 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Alekseev, S. I. (2019). *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty*. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov Publ., 180 p. (In Russian).
2. Bepalova, M. V. (2021). *Mekhanika gruntov v zadachakh i primerakh*. Gomel, Belarusian State University of Transport Publ., 63 p. (In Russian).
3. Kravchenko, P. A., Paramonov, V. N., & Kuvaldina, O. S. (2017). *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty*. Saint-Petersburg : Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 36 p. (In Russian).
4. Baj, V. F., & Safaryan, V. S. (2022). Improving the efficiency of shallow foundations. *Architecture, Construction, Transport*, (1), pp. 65–72. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-65-72.
5. Borodachev, N. M. (1972). *Ob upravlenii raspredeleniem reaktivnykh davleniy pod podoshvoy fundamenta. Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzheniy: respublikanskiy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnicheskiiy sbornik*. Kyiv, Budivelnik Publ., (18), pp. 8–11. (In Russian).
6. Pronozin, Ya. A. (2016). *Vzaimodeystvie lentочно-obolocheknykh fundamentov s sil'noszhimaemym gruntovym osnovaniem*. Diss. dokt. tekhn. Nauk. Moscow, 368 p. (In Russian).
7. Pronozin, Ja. A., Poroshin, O. S., & Mel'nikov, R. V. Foundation. Patent na izobretenie 2393297 C1 RU, MPK E02D 27/01. No 2009116522/03. Applied: 29.04.2009. Published: 27.06.2010. (In Russian).
8. Glushkov, A. V. (2016). *Vliyanie formy i razmerov podoshvy fundamentov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie osnovaniya*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Tyumen, 22 p. (In Russian).

9. Maeda, Yo., & Ochiai, H. (1992). Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes. Memory of the Faculty of Engineering, 52(2), pp. 201-232. (In English). Available at: <https://www7.civil.kyushu-u.ac.jp/geotech/cd/data/106.pdf>.
10. Hong, T., Teng, J. G., & Luo, Y. F. (1999). Axisymmetric shells and plates on tensionless elastic foundations. International Journal of Solids and Structures, 36(34), pp. 5277-5300. (In English). Available at: <https://ru.zlib-articles.se/book/4163288/ce92e0>. DOI 10.1016/s0020-7683(98)00228-5 (accessed 15.08.2023).
11. Das, B. M., & Sobhan, Kh. (2012). Principles of geotechnical engineering. Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States, Publ. Cengage Learning, 756 p. (In English). Available at: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583609876-principles-of-geotechnical-engineering-8th-das.pdf>.
12. Gritsuk, M. S. (1998). Ratsional'nye konstruksii plit dlya lentochnykh fundamentov. Diss. dokt. tekhn. nauk. Brest, 283 p. (In Russian).
13. Arkhipov, D. N. (2006). Vzaimodeystvie gruntovogo osnovaniya i sbornykh lentochnykh fundamentov s geometricheski izmenyaemoy formoy podoshvy. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Volgograd, 24 p. (In Russian).
14. Kyatov, N. Kh., & Kyatov, R. N. (2023). Proektirovanie osnovaniy i fundamentov. Moscow, «Yurayt» Publ, 327 p. (In Russian).
15. Martuyusheva, A. I. (2017). Modelirovanie deformatsiy osnovaniya pod shtampami s razlichnoy formoy podoshvy. Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, November, 02-03. Tyumen, Industrial University of Tyumen, pp. 154-157. (In Russian).
16. Tetior, A. P. (1969). Ob ustoychivosti osnovaniya pod fundamentami s krivolineynoy formoy podoshvy. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura, (5), P. 14. (In Russian).
17. Rybin, V. S., & Rybina, L. V. (2012). Opredelenie optimal'noy formy i razmerov podoshvy vnetsentrenno nagruzhennykh fundamentov melkogo zalozheniya. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, (1), pp. 6-9. (In Russian).
18. Ignatyuk, V. Yu. (1981). Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya raboty fundamentnykh plit s krivolineynoy poverkhnost'yu opiraniya. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 177 p. (In Russian).

Сведения об авторе

Сафарян Варе Суренович, аспирант кафедры строительного производства, ассистент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет; главный инженер проекта, ООО «Строитель», e-mail: safaryanv@yandex.ru

Information about the author

Vage S. Safaryan, Postgraduate at the Department of Construction Production, Assistant at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen; Chief Project Engineer, LLC "Stroitel", e-mail: safaryanv@yandex.ru

*Получена 15 октября 2023 г., одобрена 10 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 15 October 2023, Approved 10 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*