

На правах рукописи



Аль-Накди Ибтехаль Абдулмонем Али

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КРУГЛОГО ЖЕСТКОГО ШТАМПА
С ГОРИЗОНТАЛЬНО АРМИРОВАННЫМ ГРУНТОВЫМ
ОСНОВАНИЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Специальности: 2.1.9. Строительная механика,
2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»).

Научный руководитель

Антонов Василий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Чернов Юрий Тихонович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра строительной и теоретической механики, профессор

Мирсаянов Илизар Талгатович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии, заведующий кафедрой

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится 16 декабря 2022 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, ауд. 101 бизнес-инкубатора.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте: <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Макеев Алексей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертация посвящена развитию и уточнению методов расчета армированных оснований путем внедрения в исследуемую область решений теорий упругости, пластичности и механики грунтов.

Несмотря на широкое применение армирования для усиления основания и использование разнообразных материалов в качестве армирующих элементов, вопрос дальнейших исследований в этой области остается актуальным. Причины заключаются в недостаточной изученности следующих вопросов: 1) совместной работы армирующих элементов и грунта; 2) зависимости прочности и устойчивости основания от способа армирования и применяемого вида армирующего материала; 3) поведения и изменения во времени прочностных и деформационных характеристик основания под воздействием длительных статических и циклических нагрузок; 4) отсутствия норм проектирования.

В связи с отсутствием методов расчета, полностью отражающих выше-названные условия, необходимы решения инженерных задач, основанных на современных расчетных моделях строительной механики и геомеханики. Наиболее пригодными для этой цели являются линейные или нелинейные версии метода конечных элементов (МКЭ).

В связи со всем вышеизложенным дальнейшее продолжение исследований армированных оснований является актуальным в настоящее время.

Степень разработанности темы исследования. Экспериментальными исследованиями и численным моделированием взаимодействия фундаментов с армированным основанием при циклических нагрузках занимался ряд крупных ученых, таких как: Clement, И. И. Алюшев, И. Т. Мирсаяпов, Tafreshi, М. В. Рубцова, В. И. Клевико, Agarwal Jyoti, Ravi S. Jakka, Д. Г. Золотозубов, А. Б. Пономарев, N. A. Hataf, А. Н. Boushehrian, А. Ghahramani, Sahu, Raghvendra, R. Gunturi, И. В. Королева, А. З. Тер-Мартirosян, В. Ф. Бай, О. В. Козунова и др.

Проведен анализ работ, посвященных влиянию армирования на несущую способность основания, скорость развития деформаций и демпфирование циклических нагрузок: Ю. Т. Чернова, В. М. Антонова, В. И. Клевико, А. Б. Пономарева, А. Н. Краева, Д. А. Татьянникова, Е. В. Федоренко, И. Т. Мирсаяпова, Д. Р. Сафина, А. О. Попова, В. Р. Мустакимова, А. В. Машенко, А. С. Гришина, В. В. Леденева, А. Н. Богомолова, Jyoti Agarwal, Prasad, Е. А. Исаковой, М. В. Рубцовой, А. В. Мельникова, О. В. Хряниной, С. И. Сахарова, Vantamuri, N. Shweta, В. Г. Офрихтера, В. В. Воронцова, Т. П. Кашариной, Л. М. Тимофеевой, Н. N. Ramesh, В. С. Пономарева, А. В. Безматерных, Clement, И. И. Алюшева, Tafreshi, V. K. Puri, Д. Г. Золотозубова, N. A. Hataf, Sahu, Raghvendra, Е. П. Скворцова. Разработкой и развитием методов расчета и проектирования армированного грунта основания занимались: Q. Chen, Л. А. Строкова, Л. М. Тимофеева, G. S. Pardo, and E. Sáez, А. В. Al-Dawoodi, F. H. Rahil, and M. Q. Waheed, D. C. Drucker, W. Prager.

Цель диссертационной работы:

- исследование параметров, влияющих на скорость развития деформаций и несущую способность горизонтально армированного основания при циклическом нагружении;
- разработка научно-обоснованного метода расчета армированного основания при его циклическом нагружении штампом с использованием решений прикладных задач строительной механики и геомеханики на математической основе МКЭ.

Задачи исследований:

- выбор и обоснование расчетной упругопластической модели армированного основания, критериев предельных состояний для последующей разработки методики расчета;
- определение оптимальных параметров армирования основания при различных схемах передачи нагрузок на штамп;
- разработка и обоснование (путем сравнения с результатами экспериментов и предшествующих исследований) методики упругопластического конечно-элементного расчета;
- сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений несущей способности и деформативности армированных оснований при циклическом нагружении.

Объект исследований – горизонтально армированная песчаная подушка.

Предмет исследований – напряженно-деформированное состояние армированной подушки при передаче на нее циклических нагрузок.

Научная новизна:

1. По специальности 2.1.9:

- проведено расчетное моделирование взаимодействия круглого жесткого штампа с упругопластической средой, описываемой физическими соотношениями закона Гука (на допредельной стадии деформирования); условием текучести Мизеса–Шлейхера–Боткина путем использования решения смешанной задачи теорий упругости и пластичности на математической основе МКЭ;
- выполнена конечно-элементная формализация расчетных областей, назначены параметры упругопластической армированной области при действии статических повторно-переменных и циклических нагрузок;
- использована трехмерная конечно-элементная модель полилинейного изотропного упрочнения для разработки метода расчета армированного основания при его циклическом нагружении штампом.

2. По специальности 2.1.2:

- проведено экспериментальное исследование влияния горизонтального армирования основания фундаментов на несущую способность при действии циклических и статических повторно-переменных нагрузок;
- разработан метод повышения прочности и снижения деформативности оснований фундаментов машин с циклическими нагрузками путем устройства армированной грунтовой подушки;
- предложен алгоритм и разработана методика расчета несущей способности армированных оснований при циклическом нагружении.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в следующем:

- установлен механизм взаимодействия штампа с горизонтально армированным основанием при статическом и циклическом нагружении;
- проведен многофакторный анализ зависимости скорости развития деформаций и несущей способности армированного основания от плотности основания, размера армирующих элементов, глубины расположения арматуры, эксцентриситета приложения вертикальной нагрузки и смещения армирующего элемента, количества циклов нагружения, коэффициента асимметрии цикла и начальной стадии приложения циклической нагрузки;
- разработана методика расчета несущей способности армированных оснований, которая позволяет расширить область применения армированного грунта на фундаменты, подверженные циклическим и повторно-переменным нагрузкам.

Методология и методы исследований. Основаны на комплексном методе, включающем теоретические и экспериментальные исследования, анализе и обобщении полученных результатов с использованием математического моделирования в программном комплексе Plaxis 3D.

Степень достоверности обеспечена:

- использованием в работе методов исследования, основанных на применении современных представлений о механике деформирования грунтов;
- корректностью постановки задач и проведения экспериментов;
- сравнением полученных в работе результатов с данными других исследований;
- сопоставлением результатов численных и аналитических решений с экспериментальными данными.

На защиту выносятся:

1. По специальности 2.1.9:
 - результаты численного моделирования взаимодействия круглого жесткого штампа с горизонтально армированным основанием при передаче циклических нагрузок;
 - метод расчета армированного основания при его циклическом нагружении штампом на математической основе МКЭ.
2. По специальности 2.1.2:
 - метод повышения прочности и снижения деформативности оснований фундаментов машин с циклическими нагрузками путем устройства армированной грунтовой подушки;
 - результаты экспериментов по определению оптимальных параметров армирования основания при различной схеме передаче нагрузок на штамп.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 6 Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт» (г. Тамбов, 2019); на Национальной научно-технической конференции с иностранным

участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении» (г. Воронеж, 2019); на III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (г. Тамбов, 2021); на Второй Международной конференции по геотехническому проектированию (Ирак, 2021); на научно-практическом семинаре «Достижения строительной области и ЖКХ» (г. Тамбов, 2022).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 научных работ, из них работ, опубликованных в рецензируемых и приравненных к ним научных изданиях, индексируемых в международных базах данных – 4.

Личный вклад автора. Основные результаты по теме диссертации были получены лично автором и опубликованы в соавторстве с научным руководителем, который определил основные направления исследования в рамках выполнения базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ. Все численные исследования выполнены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 154 наименований. Работа изложена на 191 странице, содержит 84 рисунка, 58 таблиц и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен анализ экспериментальных и теоретических работ по теме диссертации.

Экспериментальными исследованиями и численным моделированием взаимодействия фундаментов с армированным основанием при статических и циклических нагрузках занимался ряд крупных ученых, таких как: Clement, И. И. Алюшев, И. Т. Мирсаяпов, Tafreshi, М. В. Рубцова, В. И. Клевко, Agarwal Jyoti, Ravi S. Jakka, Д. Г. Золотозубов, А. Б. Пономарев, N. A. Hataf, A. H. Boushehrian, A. Ghahramani, Sahu, Raghvendra, R. Gunturi, Л. М. Тимофеева, А. З. Тер-Мартirosян, В. Ф. Бай, О. В. Козунова и др.

Проведен анализ работ, посвященных влиянию армирования на демпфирование циклических нагрузок, на несущую способность основания и скорость развития деформаций. Основные выводы по анализу научно-технической литературы состоят в том, что применение армированного грунта позволяет существенно снизить деформативность и повысить прочность основания и при статических и при циклических нагрузках.

В то же время полученные до сих пор аналитические зависимости не охватывают всего спектра поведения фундаментов при циклическом нагружении. Недостаточно разработаны методы расчета армированных оснований в зависимости от различных параметров циклической нагрузки.

Необходимость проведения дальнейших исследований обусловлена отсутствием математических моделей, которые могли бы прогнозировать изменение несущей способности и деформирования армированного основания фундамента при воздействии циклических нагрузок.

Во **второй главе** приведены физико-механические и прочностные характеристики песчаного основания и армирующих элементов, используемых при проведении экспериментов. В качестве основания использовался песок мелкий однородный.

Физико-механические, прочностные и деформационные характеристики грунта определялись по ГОСТ 22733–2016, ГОСТ 12248.1–2020, ГОСТ 12248.4–2020.

В качестве армирующих элементов использовались металлические сетки различных типоразмеров, выполненные из арматурной проволоки класса 4Вр–1400 по ГОСТ 7348–81 и винилпластовые пластины ВН (поливинилхлоридные листы) толщиной 4 мм по ГОСТ 9639–71.

В **третьей главе** изложены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров армирования грунта.

Проведено сравнение результатов экспериментов и численного моделирования, полученных с помощью программных комплексов PLAXIS 3D V20 и MIDAS GTS, и с использованием модели полилинейного изотропного упрочнения PLAS (Miso) в программе ANSYS APDL 18.1.

Эксперименты проводились в пространственных металлических лотках с жесткими боковыми стенками с размерами ($h \times b \times l$) 55×55×70 см и 100×85×180 см. Лотки были оснащены рычажной системой (рис. 1). Нагрузка создавалась с помощью грузов, укладываемых на подвеску рычага с передаточным числом 1:5 и 1:10 соответственно. В качестве модели фундамента использовался жесткий металлический штамп диаметром $D = 120$ мм; толщиной $t_{st} = 10$ мм с гладкой контактной поверхностью.

Каждый слой уплотняли одинаковым количеством ударов трамбовки по одному следу с учетом перекрытия слоев. Величину плотности грунта контролировали методом режущего кольца и протарированным плотномером.

При циклической передаче воздействий нагрузку доводили до требуемой ступени, с которой начиналось циклирование, и передавали требуемое количество циклов. После этого продолжали приложение нагрузки до разрушения.

Для измерения усилий и перемещений использовали аттестованные динамометры сжатия и индикаторы часового типа ИЧ–10. Приборы крепили к независимой от лотков реперной раме (см. рис. 1).

В первой серии экспериментов оценивали влияние плотности основания на значения модуля деформации. Установлено, что при повышении плотности песка, ρ (1,49; 1,53; 1,59; 1,62; 1,66 г/см³), несущая способность основания увеличивалась при статической и циклической нагрузках.

Значения модуля деформации при изменении плотности с 1,49 до 1,66 г/см³, по штамповым испытаниям и по результатам моделирования с использованием программного комплекса «Plaxis 3D» увеличились практически в 10 раз.

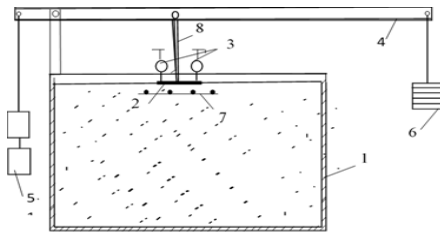


Рис. 1. Схема опытной установки:

1 – металлический лоток; 2 – штамп; 3 – индикаторы; 4 – рычаг; 5 – противовес; 6 – грузы; 7 – армирующий элемент; 8 – нож

Во второй серии исследовали влияние размера и шероховатости армирующего элемента на развитие деформаций в основании штампа при циклическом приложении нагрузок ($n = 20$ – количество циклов; $F_i/F_u = 0,6$, где F_i – ступень, с которой начиналось приложение циклирующей нагрузки; $F_c/F_u = 0,6$, где F_c – величина циклирующей нагрузки; $r = 0$, r – коэффициент асимметрии цикла; $h_s/D = 0,2$ – относительное заглубление армирующего элемента, D – диаметр штампа).

Суммарная величина вертикальных перемещений при циклической нагрузке больше, чем при статической. Это происходит за счет накопления остаточных деформаций при повторных приложениях воздействий. Несущая способность основания увеличилась в (1,7 – 4,3) раза, а вертикальные перемещения за период цикла уменьшились в (1,4 – 2,1) раза за счет армирования. Максимальное значение несущей способности наблюдалось для сетки с размерами $2D \times 2D$, удельной несущей способности (на единицу объема арматуры) – для сетки с размерами $D \times D$. Увеличение размера сетки более $2D \times 2D$ неэффективно (рис. 2).

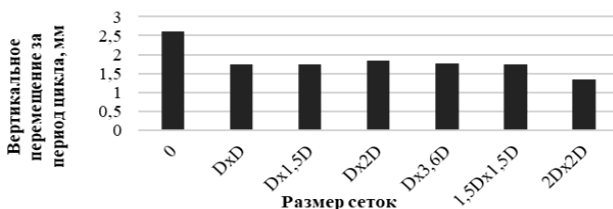


Рис. 2. Вертикальные перемещения за период цикла для неармированного и армированного основания

При армировании винипластовыми пластинами ВН наиболее эффективным размером армирующего элемента является размер $1,5D \times 1,5D$, независимо от степени шероховатости и режима приложения нагрузок. Шероховатость армирующего элемента дает значительный эффект при небольших размерах (до $1,5D \times 1,5D$). Значения вертикальных перемещений за период цикла Δs

больше для основания армированного винипластовой пластиной за счет пониженного значения модуля упругости винипластовой пластины по сравнению с металлической сеткой.

В третьей серии экспериментов проводилась оценка влияния количества слоев армирования на развитие вертикальных перемещений в основании штампа.

Рассматривали статическое и циклическое приложение нагрузок. При циклической передаче воздействий нагрузку доводили до $F_i/F_u = 0,6$ и передавали 20 циклов.

По результатам проведенных экспериментов заметна эффективность двухслойного армирования. По сравнению с неармированным основанием значения предельной нагрузки выше практически в 4 раза и при статической и при циклической нагрузках. По сравнению с однослойным армированием, значения разрушающей нагрузки для двухслойного армирования в 1,8–2,8 раза выше для статической схемы передачи нагрузок, а для циклической в 1,9–3,4 раза в зависимости от расстояния до арматуры. Оптимальное расположение армирующего элемента при однослойном армировании, $h_s = 0,1 \dots 0,2D$ и при статическом, и при циклическом приложении нагрузок. При двухслойном армировании максимальный эффект наблюдался при расположении верхнего яруса армирования на том же расстоянии, $h_{s1} = 0,1 \dots 0,3D$, т.е. в зоне развития максимальных сдвиговых напряжений. В этом случае верхняя сетка играла роль фиктивного штампа, поэтому оптимальное расположение второго слоя арматуры $h_{s2} = 0,4 \dots 0,6D$ (рис. 3).

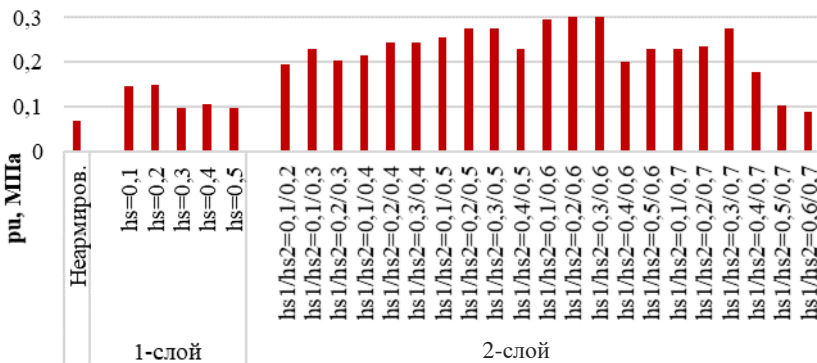


Рис. 3. Значения давления, соответствующие разрушающей нагрузке

В четвертой серии проводилась оценка влияния смещения армирующего элемента на несущую способность основания при внецентренном приложении нагрузок. В этой серии экспериментов к штампу $D = 2r_{st} = 120$ мм прикладывались статическая и циклическая центральная и внецентренная нагрузки с эксцентриситетом $e/r_{st} = 0,15$ и $e/r_{st} = 0,3$.

Основание штампа армировали сеткой с размерами: $L_s \approx D$, $B_s \approx D$; заглубление сетки: $h_s = 0,1D$ и $h_s = 0,2D$; эксцентриситет сетки относительно центра штампа принимали: $e_0/r_{st} = 0,15$ и $e_0/r_{st} = 0,3$, эксцентриситет силы: $e/r_{st} = 0,15$ и $e/r_{st} = 0,3$ (рис. 4).

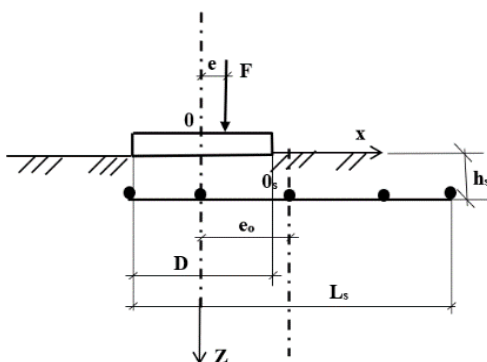


Рис. 4. Схема армирования:

e – эксцентриситет силы, e_0 – эксцентриситет сетки

Предельное давление на основание наблюдалось при смещении армирующего элемента в сторону действия нагрузки и максимальное значение наблюдалось при совпадении оси арматурной сетки с осью действия нагрузки. Несущая способность по сравнению с неармированным основанием при этом возросла в 2–3 раза.

Расчетные значения вертикальных перемещений, полученные при использовании программного комплекса Plaxis–3D 20, и в этом случае были близки к экспериментальным значениям.

В пятой серии испытаний оценивалось влияние количества циклов нагружения на несущую способность основания.

В этой серии испытаний ступень нагрузки, с которой начиналось циклирование (F_i), составляла 0,2 и 0,64 от разрушающей (F_u). Количество циклов изменялось от 4 до 36, с шагом 4 цикла (4/8/12/16/20/24/28/32/36).

За счет армирования предельное давление на основание возросло практически в 2 раза. Значения вертикальных перемещений и приращения вертикальных перемещений за время приложения циклической нагрузки возрастали до определенного количества циклов, при котором достигалось оптимальное значение плотности. В нашем случае это значение составило 20 – 24 цикла. Затем значения вертикальных перемещений либо стабилизировались, либо несколько снижались (рис. 5).

Величина общего вертикального перемещения за счет армирования уменьшалась на (40...80)%, а вертикального перемещения за время цикла – до 83% по сравнению с неармированным грунтом.

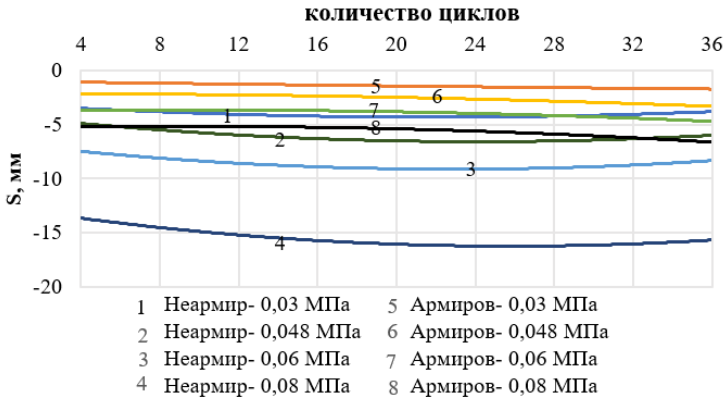


Рис. 5. Зависимость вертикальных перемещений от количества циклов для армированного и неармированного оснований при фиксированном значении давления под подошвой штампа при $F_i = 0,2F_u$

В шестой серии оценивалось влияние коэффициента асимметрии цикла на развитие вертикальных перемещений в основании штампа. В этой серии испытаний изменялась степень нагрузки, с которой начиналось циклирование (F_i), и (F_c), и само значение циклической нагрузки. Количество циклов приложения нагрузки оставалось постоянным, $n = 10$ при плотности основания $1,53 \text{ г/см}^3$.

Значение нагрузки доводилось до требуемой степени: $F_i = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ от предварительно найденной разрушающей, F_u . Затем проводилось 10 циклов нагрузка–разгрузка. Величина циклирующей нагрузки F_c изменялась в пределах $0,2–0,8$ от разрушающей. Определяли коэффициент асимметрии цикла $r = F_{\min c}/F_{\max c}$, где $F_{\min c} = F_i$ – величина нагрузки, с которой начинался цикл, $F_{\max c} = F_i + F_c$ – максимальное значение нагрузки, $\bar{F} = F_i/F_u$ – уровень нагрузки, p – давление под подошвой штампа (рис. 6).

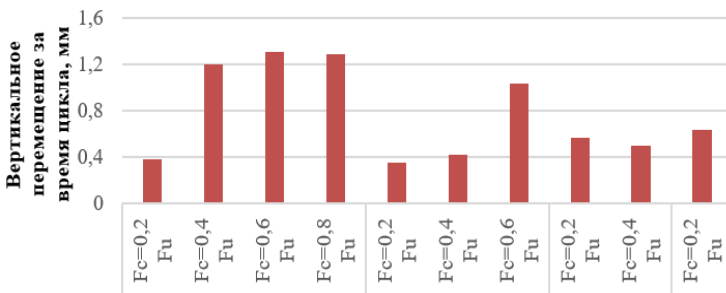


Рис. 6. Значения вертикальных перемещений за время цикла для армированного основания при разных значениях $\bar{F}_c = F_c/F_u$

Чем меньше коэффициент асимметрии цикла, тем больше несущая способность, при этом возрастают значения вертикальных перемещений за период цикла.

Увеличение абсолютного значения циклической нагрузки привело к возрастанию несущей способности неармированного и армированного оснований за счет уплотнения основания в период цикла. Чем меньше начальная степень передачи циклирующей нагрузки, тем больше суммарные значения деформаций за время цикла.

В седьмой серии проводилась оценка влияния начальной степени передачи циклической нагрузки и плотности основания на несущую способность.

В этой серии испытаний на неармированное и армированное основание передавались циклические нагрузки при плотности 1,62 и 1,53 г/см³. Каждый цикл состоял из процесса пятикратного нагружения и разгрузки грунта кратковременной статической нагрузкой. Цикл нагрузка–разгрузка проводился в течение 10 с, затем, после стабилизации деформаций, проводилось последующее ступенчатое нагружение до разрушения.

Величина нагрузки циклирования оставалась постоянной и составляла $F_c = 0,5F_u$, где F_u – предварительно найденная предельная нагрузка. Изменяли степень нагрузки, с которой начиналось приложение циклической нагрузки. Для плотности 1,62 г/см³ начальная степень приложения циклической нагрузки $F_i = 0,2F_u$; 0,4 F_u и 0,6 F_u . Для плотности 1,53 г/см³ начальная степень приложения циклической нагрузки $F_i = 0,3F_u$; 0,6 F_u и 0,7 F_u . При подготовке армированного основания под подошву штампа на глубине: 0,2 D ; 0,3 D и 0,4 D (где D – диаметр штампа) укладывали армирующий элемент.

Полученные результаты показали, что чем ниже плотность, тем выше значения вертикальных перемещений штампа от циклической нагрузки. Введение армирующего элемента в зону действия максимальных касательных напряжений позволяет снизить деформации циклирования.

При армировании грунта происходит значительное увеличение несущей способности основания, диапазон увеличения максимальной разрушающей нагрузки составляет от 2,5 до 4 раз, вместе с тем происходит снижение значений суммарных деформаций по сравнению с неармированным основанием.

В восьмой серии проводилась оценка влияния размеров лотка на стеснение поперечных деформаций. В этой серии экспериментов оценивали влияние размеров установки на несущую способность и развитие деформаций в основании штампа.

Рассматривали 2 вида лотков с жесткими боковыми гранями – лоток 1 с размерами ($h \times b \times l$) 55×55×70 см и лоток 2 – с размерами 100×85×180 см.

Испытания проводили на армированном и неармированном основаниях с одной моделью. В качестве модели использовался жесткий металлический

штамп диаметром $D = 120$ мм; толщиной $t_{st} = 10$ мм с гладкой контактной поверхностью. На глубине $h_s = 0,2D; 0,3D; 0,4D$ располагалась сетка с размерами $L_s \approx D; B_s \approx D$. Ступень нагрузки, с которой начиналось циклирование, составляла $F_i = 0,6F_u$. Количество циклов – 20.

По результатам сравнения выявлено, что размеры лотка, в котором проводилась основная масса испытаний, не оказывают заметного влияния на развитие вертикальных перемещений в основании модели (рис. 7).

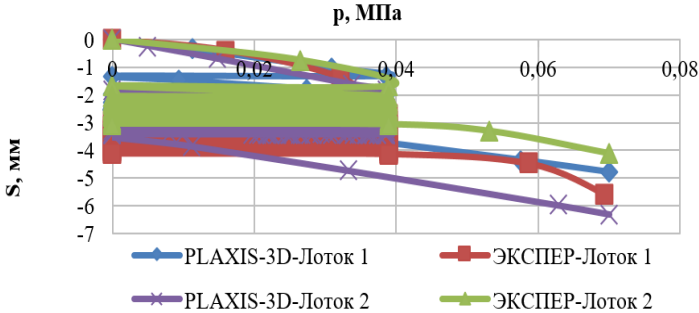


Рис. 7. Развитие вертикальных перемещений штампа на армированном основании при расстоянии до армирующего элемента $h_s = 0,2D$ по результатам экспериментов и численного моделирования

В четвертой главе была разработана методика расчета несущей способности армированного основания при циклическом приложении нагрузок.

Разработана регрессионная модель для определения повышающего коэффициента для модуля деформации – K_E и повышающего коэффициента несущей способности основания – K_S . Предложена блок-схема для расчета несущей способности армированных оснований при циклическом нагружении.

Исследования, приведенные в третьей главе, показали, что основные преимущества армированных оснований проявляются при их переходе из упругой в упругопластическую стадию работы. Наиболее распространенным методом, позволяющим решать задачи по расчету армированных оснований, является метод конечных элементов (МКЭ). На этом методе базируется пакет прикладных программ Plaxis, который позволяет определить вертикальное перемещение и несущую способность штампа, а также прогнозировать напряженно-деформированное состояние активной зоны основания. Особенностью комплекса Plaxis 3D является возможность моделирования как статической, так и циклической нагрузок.

По формуле Шлейхера вертикальное перемещение определяется:

$$S_u = \omega D(1 - \nu^2)p_u/E, \quad (1)$$

где ω – коэффициент, принимаемый для круглых фундаментов 0,8; D – диаметр фундамента; ν – коэффициент Пуассона, принимаемый 0,3 для песка; p_u – предельное давление по подошве штампа на участке линейной зависимости между давлением и вертикальным перемещением; S_u – вертикальное перемещение штампа при давлении p_u .

Следовательно, вертикальное перемещение за счет приложения циклической нагрузки:

$$\Delta s = \omega D(1 - \nu^2)p_c/E, \quad (2)$$

где p_c – циклическая нагрузка.

При делении уравнения (2) на (1) получим

$$\Delta s/S_u = p_c/p_u, \quad (3)$$

из уравнения (3) несущая способность за время передачи циклической нагрузки Δq_c будет

$$p_c = \left(\frac{\Delta s}{S_u}\right)p_u; \quad \Delta q_c = \left(\frac{\Delta s}{S_u}\right)q_u, \quad (4)$$

где q_u – несущая способность неармированного основания при статической нагрузке.

Основываясь на уравнениях (3) и (4) и результатах экспериментов, была определена несущая способность неармированного и армированного оснований. Несущая способность неармированного основания – $\Delta q_{u(\text{неар})}$:

$$q_{u(\text{неар})} = q_u + \Delta q_{c_{\text{неар}}}; \quad (5)$$

или

$$q_{u(\text{неар})} = q_u + \left(\frac{\Delta s}{S_u}\right)_{\text{неар}} q_u; \quad (6)$$

$$q_{u(\text{неар})} = q_u \left[1 + \left(\frac{\Delta s}{S_u}\right)_{\text{неар}} \right]. \quad (7)$$

При расчете несущей способности армированного основания $q_{u(R)}$ рассматривали три составляющие – прирост несущей способности армированного грунта при приложении циклической нагрузки – $\Delta q_{c_{\text{арм}}}$; несущую способность при приложении статической нагрузки – $q_u + \Delta q_T$, где Δq_T – приращение несущей способности за счет армирования.

$$q_{u(R)} = q_u + \Delta q_T + (\Delta q_c)_{\text{арм}}. \quad (8)$$

Тогда, аналогично уравнению (4)

$$(\Delta q_c)_{\text{арм}} = (q_u + \Delta q_T) * \left(\frac{\Delta s}{S_u}\right)_{\text{арм}}. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в уравнение (8), получим:

$$q_{u(R)} = q_u + \Delta q_T + (q_u + \Delta q_T) \left(\frac{\Delta s}{S_u} \right)_{\text{арм}}, \quad (10)$$

где Δq_T – прирост несущей способности за счет армирования, рассчитываемый по Chen, Qiming, 2007:

$$\Delta q_T = \sum_{i=1}^N \frac{12T_i[h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1})]r_T}{\frac{\pi}{4}D^2}, \quad (11)$$

где

$$r_T = f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \left[1 - 2 \frac{h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1})}{\sqrt{D^2 \frac{\pi}{4}}} \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \right] & h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1}) < \frac{\sqrt{D^2 \frac{\pi}{4}}}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \\ \frac{1}{2} - \frac{h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1})}{2H_f} & h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1}) \geq \frac{\sqrt{D^2 \frac{\pi}{4}}}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \end{array} \right\}, \quad (12)$$

H_f – глубина поверхности разрушения, может быть оценена как

$$H_f = \frac{\sqrt{D^2 \frac{\pi}{4}}}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} e^{(\pi/4 + \varphi/2) \tan \varphi} \cos \varphi, \quad (13)$$

где T_i – растягивающее усилие в i -м слое арматуры, Н/мм; N – количество слоев арматуры; h_{s1} – расстояние до верхнего слоя арматуры; $h_{s2} - h_{s1}$ – расстояние между верхним и следующим слоем арматуры; D – диаметр штампа.

Несущая способность штампа на армированном песчаном основании с горизонтальным армированием может быть найдена, как

$$q_{u(R)} = \left[q_u + \left[\sum_{i=1}^N \frac{12T_i[h_{s1}+(i-1)(h_{s2}-h_{s1})]r_T}{\frac{\pi}{4}D^2} \right] \right] \left[1 + \left(\frac{\Delta s}{S_u} \right)_{\text{арм}} \right]. \quad (14)$$

Для определения влияния армирования на снижение сжимаемости грунта и увеличение его несущей способности проводился множественный нелинейный регрессионный анализ. Разрабатывалась регрессионная модель для определения повышающего коэффициента для модуля деформации – K_E , равного отношению модуля деформации армированного основания при циклической нагрузке к модулю деформации неармированного основания при циклической нагрузке; повышающего коэффициента несущей способности основания – K_s , равного отношению несущей способности армированного основания при циклической нагрузке к несущей способности неармированного основания при циклической нагрузке.

Переменные в множественном нелинейном регрессионном анализе: F_i/F_u – начальная ступень приложения циклической нагрузки; F_c/F_u – циклическая нагрузка; h_s/D – относительное расстояние до армирующего элемента;

$\Delta s_s / \Delta s_0$ – вертикальное перемещение за время цикла для армированного грунта/вертикальное перемещение за время цикла для неармированного грунта; $\gamma_0 * D / p_u$, где γ_0 – значение удельного веса грунта, kH/M^3 ; D – диаметр штампа, м; p_u – предельное статическое давление для неармированного основания, kH/M^2 ; L/B – отношение длины к ширине армирующего элемента; s_{st}/D – относительный шаг стержней; d_{st}/D – относительный диаметр стержней арматуры; n – количество циклов; γ_0/γ_{st} – отношение удельного веса грунта к удельному весу материала арматуры; $V_{st}/(A_\phi t_\phi)$ – отношение объема армирующего элемента к объему штампа; r – коэффициент асимметрии цикла.

На основе результатов, полученных численным моделированием методом конечных элементов с помощью программы PLAXIS 3D 20, была подобрана модель нелинейной регрессии для определения K_E , представленная в уравнении (15):

$$K_E = \exp \left[\begin{array}{l} 0,144 \cdot F_i/F_u - 0,0199 \cdot F_c/F_u - 0,3116 \cdot h_s/D - 0,0128 \cdot \Delta s_s/\Delta s_0 + \\ + 0,148 \cdot \gamma_0 D/p_u + 0,0194 \cdot L/B - 0,349 \cdot s_{st}/D + 5,84 \cdot d_{st}/D + 0,0611 \end{array} \right] \quad (15)$$

Проведенный численный анализ с помощью программного комплекса PLAXIS 3D 20 по зависимости ($S-P$) с помощью 3D-модели дал идентичные значения.

Максимальные касательные напряжения были сосредоточены в арматуре (рис. 8, а). Зоны потери прочности для армированного и неармированного оснований представлены на рис. 9.

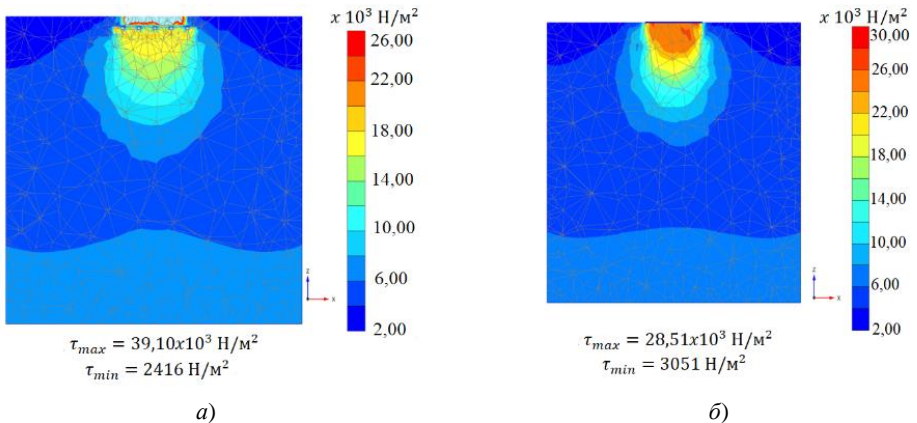
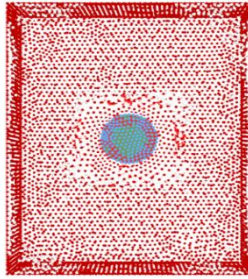
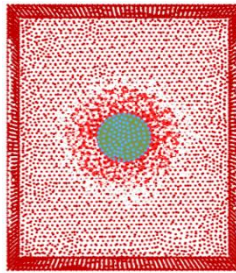


Рис. 8. Изолинии распределения максимальных касательных напряжений в основании штампа при циклической нагрузке. $p = 0,081$ МПа при:

a – расстойнии до арматуры $h_s = 0,2D$ и b – без армирования.
 $F_i = F_c = 0,6F_u$; $n = 20$; $L/B = 1,2$; $\gamma_0 = 1,53 \text{ г/см}^3$, $K_E = 1,17$



a)



б)

Рис. 9. Зоны потери прочности основания при циклической нагрузке при:

a – расстоянии до арматуры $h_s = 0,2D$ и *б* – для неармированного основания.

$$F_i = F_c = 0,6F_u; n = 20; L/B = 1,2; \gamma_0 = 1,53 \text{ г/см}^3, K_E = 1,179$$

Для оценки влияния армирования на несущую способность основания K_s при циклической схеме передачи нагрузок использовалась модель нелинейной регрессии, представленная в уравнении (16)

$$K_s = \exp \left[\begin{array}{l} 0,416 \cdot F_i/F_u - 1,454 \cdot F_c/F_u - 0,89 \cdot h_s/D - 1,306 \cdot (\Delta s/S_u)_{\text{арм}} + \\ + 6,692 \cdot \gamma_0/\gamma_{st} + 3,981 \cdot V_{st}/A_\phi t_\phi - 0,356 \cdot L/B - 0,0051n + 0,297 \end{array} \right]. \quad (16)$$

Для определения несущей способности штампа на армированном песчаном основании с горизонтальным армированием (14), определяли $\Delta s/S_u$ – отношение вертикального перемещения за время передачи циклической нагрузки к предельному вертикальному перемещению. Использовалась модель нелинейной регрессии, представленная в уравнении (17).

Обработка численных данных проводилась с помощью программного пакета Datafit 19.1.

$$\frac{\Delta s}{s_u} = \exp \left[\begin{array}{l} -1,778 \cdot F_i/F_u + 4,891 \cdot F_c/F_u - 2,07 \cdot h_s/D + 17,371 \cdot \gamma_o/\gamma_{st} + \\ + 1,414 \cdot V_{st}/A_{\phi} t_{\phi} - 0,627 \cdot L/B + 0,0193n - 7,936 \end{array} \right]. \quad (17)$$

Блок-схема расчета несущей способности фундаментов на армированном грунтовом основании представлена на рис. 10.

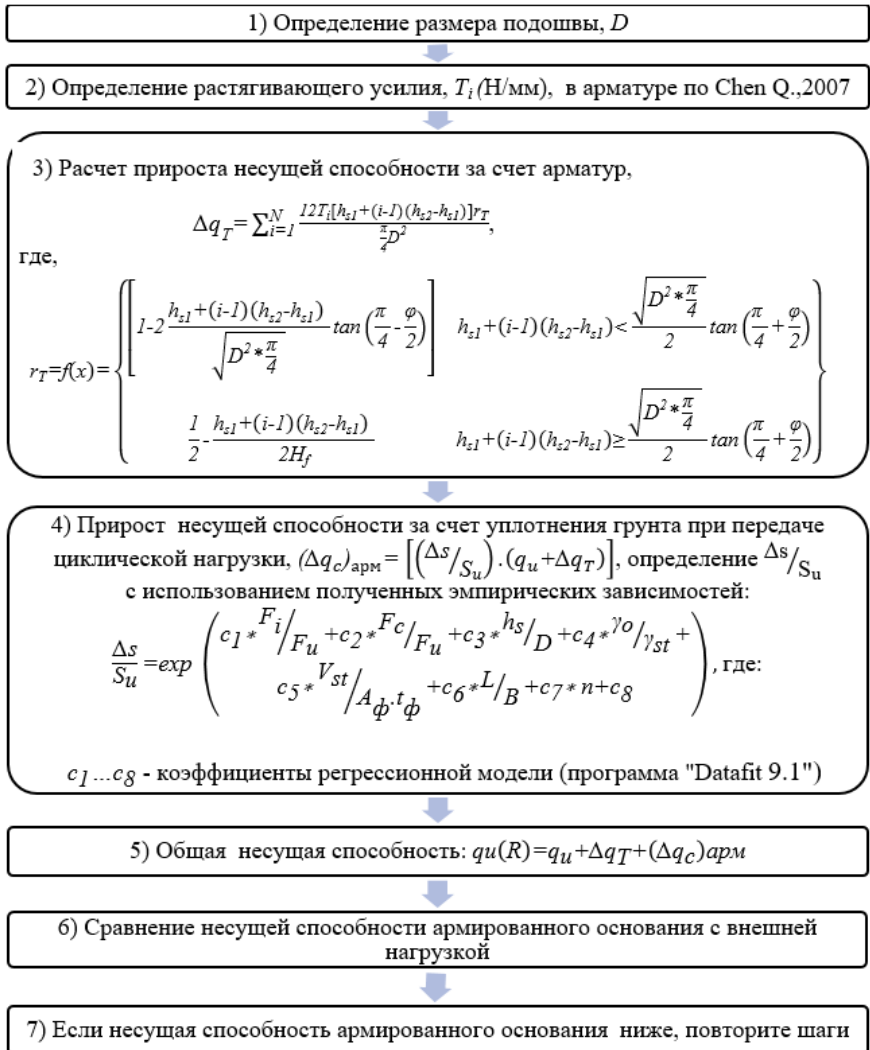


Рис. 10. Блок-схема расчета несущей способности армированного основания под действием циклических нагрузок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальные исследования позволили установить, что циклирование на одной из ступеней нагружения приводит к уплотнению грунта и, как следствие, к увеличению несущей способности основания.

2. Суммарные значения вертикальных деформаций при циклических воздействиях больше, чем при статических нагрузках, за счет накопления остаточных деформаций при повторных приложениях нагрузок.

3. Значения вертикальных деформаций и их приращение за время приложения циклической нагрузки возрастали до определенного количества циклов, при котором достигалось оптимальное значение плотности (в нашем случае это 20 – 24 цикла).

4. Армирование грунта позволяет на 40...80% снизить как суммарные вертикальные деформации, так и деформации за время цикла по сравнению с неармированным грунтом.

5. Значения вертикальных деформаций за период цикла больше для основания, армированного винипластом, по сравнению с металлической сеткой, за счет пониженного значения модуля упругости пластика. В то же время при армировании винипластовой пластиной несущая способность основания возрастает при циклической и при статической схемах передачи нагрузок, превышая те же значения при армировании металлической сеткой.

6. При внецентренном приложении нагрузок максимальное значение несущей способности наблюдалось при совпадении оси арматурной сетки с осью действия нагрузки. Несущая способность по сравнению с неармированным основанием возросла в 2–3 раза.

7. Оптимальный размер армирующего элемента исходя из значений удельной несущей способности для винипластовой пластины $1,5D \times 1,5D$, независимо от режима приложения нагрузок, для сетки оптимальным является размер $D \times D$. Шероховатость армирующего элемента дает значительный эффект при небольших размерах (до $1,5D \times 1,5D$).

8. При двухслойном армировании максимальный эффект наблюдался при расположении верхнего яруса армирования в зоне развития максимальных сдвиговых напряжений. В этом случае верхняя сетка играла роль фиктивной подошвы. По сравнению с неармированным основанием значения предельной нагрузки выше практически в 4 раза при статической и при циклической нагрузках. По сравнению с однослойным армированием, значения разрушающей нагрузки для двухслойного в 1,8–2,8 раза выше для статической схемы передачи нагрузок, а для циклической – в 1,9–3,4.

9. Разработана регрессионная модель для определения повышающего коэффициента за счет армирования для модуля деформации и для определения несущей способности основания при циклической нагрузке.

10. Разработан метод расчета несущей способности армированных оснований, который корректно отражает поведение армированных песчаных грунтов при статических и циклических нагрузках.

Рекомендации по использованию результатов и перспективы дальнейшей разработки темы. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для внедрения в практику строительства при устройстве фундаментов мелкого заложения под машины периодического действия, подверженные циклическим и повторно-переменным нагрузкам.

Перспективы дальнейших исследований надо рассматривать в направлении совершенствования аналитического подхода напряженно-деформированного состояния армированной упругопластической среды и разработке новых методов повышения прочности и снижения деформативности оснований фундаментов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы результаты диссертации, и приравненных к ним изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Antonov, V. M. Use of program ANSYS in the analysis of interaction between a rigid foundation and reinforced soil / V. M. Antonov, I. A. Al-Naqdi // IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 786, No. 1. – P. 012060.

2. Antonov, V. M. Experimental study of the influence of sand base reinforcement on the development of deformations under static and cyclic loading / V. M. Antonov, I. A. Al-Naqdi // IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 918, No. 1. – P. 012008.

3. Antonov, V. M. Experimental and numerical study of the influence of various parameters on the development of deformations in reinforced base / V. M. Antonov, I. A. Al-Naqdi // Springer proceedings in geotechnical engineering and sustainable construction. – Singapore, 2022. – P. 481 – 493.

4. Антонов, В. М. Влияние армирования на несущую способность и деформативность оснований, подверженных циклическим нагрузкам / В. М. Антонов, В. В. Леденев, И. А. Аль-Накди // Строительная механика и конструкции. – 2022. – № 2(33). – С. 145 – 157.

Публикации в других изданиях:

5. The use of programs complexes “Ansys” and “Plaxis 3D” in assessing the influence of the density of sand base on the modulus of deformation / V. M. Antonov, I. A. Al-Naqdi, P. Monastirev, E. Pakhomova, V. Amelin // IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 1138, No. 1. – P. 012002.

6. Антонов, В. М. Экспериментальные исследования дискретно армированных оснований / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди, М. А. Попов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы 5 Междунар. науч.-практ. конференции Института архитектуры, строительства и транспорта. – Тамбов, 2018. – С. 148 – 155.

7. Антонов, В. М. Использование программного комплекса ANSYS при анализе взаимодействия жесткого штампа с армированным основанием / В. М. Антонов,

И. А. Аль-Накди // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы 6 Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию юбилею Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ. – Тамбов, 2019. – С. 293 – 301.

8. Антонов, В. М. Анализ результатов экспериментов и моделирования при оценке несущей способности песчаного основания, армированного геотекстилем / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Современная наука: теория, методология, практика : материалы 1 Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. – Тамбов, 2019. – С. 117 – 123.

9. Антонов, В. М. Использование программного комплекса ANSYS при оценке влияния армирования на несущую способность слабого основания / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении : материалы науч.-техн. конф. с иностранным участием. – Воронеж, 2019. – С. 155 – 160.

10. Антонов, В. М. Влияние армирования на характер развития напряжений в песчаном основании / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Вестник науки и образования северо-запада России. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 9 – 19.

11. Антонов, В. М. Влияние армирования основания на развитие деформаций при циклическом приложении нагрузок / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Актуальные вопросы архитектуры и строительства / под общ. ред. В. Т. Ерофеева. – Саранск, 2020. – С. 236 – 240.

12. Антонов, В. М. Влияние армирования песчаного основания на развитие деформаций при циклическом приложении нагрузок / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2020. – С. 185 – 189.

13. Антонов, В. М. Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования при оценке зависимости модуля деформации от плотности песчаного основания / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Современная наука: теория, методология, практика : материалы 2 Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. – Тамбов, 2020. – С. 130 – 135.

14. Антонов, В. М. Влияние смещения армирующего элемента на несущую способность основания при внецентренном приложении нагрузок / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Современная наука: теория, методология, практика : материалы III Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. – Тамбов, 2021. – С. 117 – 123.

15. Антонов, В. М. Влияние размера армирующего элемента на развитие деформаций в основании штампа при циклическом приложении нагрузок / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Современные проблемы материаловедения : сб. науч. тр. II Всерос. (национальной) науч.-практ. конф., посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк, 2021. – С. 242 – 246.

16. Антонов, В. М. Влияние размеров и шероховатости армирующего элемента на несущую способность основания при статических и циклических воздействиях / В. М. Антонов, И. А. Аль-Накди // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Волгоград, 2021. – С. 6 – 13.

Подписано в печать 07.10.2022.

Формат 60 × 84 / 16. 1 печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ № 40

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.

Телефон (4752) 63-81-08.

E-mail: izdatelstvo@tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А

Телефон (4752) 63-07-46.

E-mail: tipo_tstu68@mail.ru