

Для цитирования: Алехин В.С., Купчикова Н.В. Экспериментальные исследования и численный анализ деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой из щебня. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

For citation: Alekhin V.S., Kupchikova N.V. Experimental studies and numerical analysis for the deformation-strength characteristics of rammed micro-piles with a broadened aggregate BASE. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences 2016; 43 (4):123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.154.1; 624.154.8

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОНАБИВНЫХ МИКРОСВАЙ С УШИРЕННОЙ ПЯТОЙ ИЗ ЩЕБНЯ

Алехин В.С.², Купчикова Н.В.¹

¹Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,

¹414056, г. Астрахань, ул. Татищева 18,

²ООО «Подземпроект»,

²125040, г. Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.2, к.1

¹e-mail:kupchikova79@mail.ru, ²e-mail:alekhin@podzemproekt.ru

Резюме: *Цель.* Экспериментально-теоретическое установление зависимостей деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбованным щебнем: диаметра обсадной трубы, фракции и объёма щебня для просадочных макропористых глин. **Метод.** Выполнены лабораторный и полевой эксперимент численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента с помощью программного комплекса MIDAS GTS_NX, реализующем метод конечных элементов и разработанной для сложных геотехнических задач; даны некоторые рекомендации для внедрения. **Результат.** Определена зависимость несущей способности буронабивных микросвай с уширением из втрамбованного щебня при вертикальном нагружении. При максимальном размере уширения 3,5 диаметра ствола микросваи несущая способность их грунта увеличивается в 1,8- 6 раз по сравнению с микросваями без уширения в зависимости от диаметра ствола сваи. В ходе экспериментальных и численных исследований установлены зависимости деформационно-прочностных параметров работы фундамента глубокого заложения, состоящего из буронабивных микросвай с уширенной пятой, а именно, диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового пространства. Результаты исследования способствуют развитию теории формирования геометрии концевых уширений из втрамбованного щебня в форме эллипсоида вращения. **Вывод.** Натурные обмеры уширений буронабивных микросвай показали, что их форма близка к форме эллипсоида вращения, а соотношение полуосей находится в прямой зависимости от характеристик грунта и объёма щебня, что было учтено при построении конечно-элементной модели в численном моделировании эксперимента. Результаты численных исследований нагружения буронабивной микросваи с уширенной пятой на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний - расхождение составляет 2-15%.

Ключевые слова: буронабивная свая, напряжённо-деформированное состояние, лабораторные, натурные и численные исследования, втрамбованный щебень

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL ANALYSIS FOR THE DEFORMATION-
STRENGTH CHARACTERISTICS OF RAMMED MICRO-PILES WITH A BROADENED
AGGREGATE BASE

Vitaly S. Alekhin², Natalia V. Kupchikova¹

¹Astrakhan State University of Architecture and Construction,

¹18 Tatishchev Str., Astrakhan 414056, Russia

²The limited liability company «Podzemproekt»,

2/1Yamskogo Polya Third Str., Moscow 125040, Russia

¹e-mail: kupchikova79@mail.ru, ²e-mail: alekhin@podzemproekt.ru

Abstract: Objectives. Experimental and theoretical determination of dependencies of strength characteristics of bored micropiles with a pedestal formed by rammed rubble on: casing diameter, fraction, and volume of crushed stone for collapsing macroporous clays. **Method.** Laboratory and field experiments were carried out; numerical calculations in two-dimensional and three-dimensional arrangement for the determination of strain-stress analysis of the foundation using a MIDAS GTS_NX software system, implementing the finite element method and developed for complex geotechnical problems; some recommendations for implementation are provided. **Results** The dependence of the load-bearing capacity of bored micropiles on a broadened base of rammed aggregate with vertical loading is determined. At the maximum broadening diameter of 3.5 of the micropiles shaft the load-bearing capacity of the subsoil is increased by between 1.8 and 6 times compared with micropiles without broadening depending on the diameter of the pile shaft. During the experimental and numerical studies of the dependencies of deformation-strength parameters of the deep foundation works consisting of a bored micropile with a broadened base, namely the pile diameter, aggregate particle size and volume, seal diameter of the subsoil soil half-space, as well as the development of the theory of formation of the end broadening geometry of rammed aggregate in the form of an ellipsoid of revolution were established. **Conclusion** The full-scale measurements of the broadening of bored micropiles showed that their shape is close to an ellipsoid of revolution, and the ratio of semi-axes is directly dependent on the characteristics of soil and gravel volume, which was taken into account in the construction of the finite element model in the numerical simulation experiment. The results of numerical studies of the bored micropile loading with broadened base on the MIDAS GTS show good agreement with the results of the field test, consisting of a difference of between 2 and 15%.

Keywords: pressure pile, stress-strain state, laboratory and full-scale and numerical studies, rammed aggregate

Введение. Основные неблагоприятные инженерно-геологические процессы, влияющие на устойчивость оснований зданий и сооружений на территории Астраханской области, такие как просадочность грунтов, переработка берегов водотоков, подтопление территории грунтовыми водами, территории, сложенные намывными грунтами и карстовые провалы, приводят к удорожанию производства работ по возведению нулевого цикла.

Наиболее опасными являются в регионе территории, сложенные просадочными суглинками и супесями, характеризующиеся как первым, так и вторым типом грунтовых условий по просадочности. Наиболее опасны грунты, как основания зданий и сооружений, со вторым типом просадочности, где должны предусматриваться дорогостоящие противопросадочные мероприятия [1-6, 11,12]. Обычно они проявляются при повышении влажности грунтов в результате аварийной обводненности грунтов или общем техногенном подъеме уровня грунтовых вод. Одним из эффективных конструктивных решений фундаментов мно-

гоэтажных зданий и сооружений для строительства на подобных территориях является устройство буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбовыванием щебня.

Постановка задачи. Цель исследования - экспериментально-теоретическое определение зависимостей деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбованным щебнем, а именно, диаметра обсадной трубы, фракции и объёма щебня для просадочных макропористых глин.

В рамках реализации поставленной цели исследования были решены следующие задачи:

- выполнен лабораторный и полевой эксперимент;
- построена расчётная модель конструкции свай с уширением и без него;
- выполнены численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента;
- даны практические рекомендации для внедрения результатов.

Методы исследования. Предпосылками к проведению натурных исследований стали лабораторные испытания штампа на просадочном грунте, упрочнённом забивкой щебня мелкой фракции 5 – 10 мм. Испытания показали увеличение начальной жёсткости основания в упругой стадии работы в 6 раз по сравнению с испытаниями штампа на естественном основании и уменьшение осадки (с учётом работы грунта в пластической стадии до 15 раз) [1,2].

На первом этапе проводились испытания штампа в котловане с втрамбованным щебнем мелкой (5-20 мм) и крупной фракции (40-50 мм) и без щебня. Испытания показали, что при вертикальном нагружении $P=8000\text{Н}$ осадка штампа на неуплотнённом грунте составила 40 мм, на грунте с втрамбованным щебнем мелкой фракции – 22,5 мм, и крупной фракции – 7,5 мм. Таким образом, осадка снизилась в 3-5,3 раза.

Имеющиеся многочисленные данные об испытаниях трубобетонных, буронабивных свай или свай – оболочек говорят о том, что фактическая осадка во многих случаях оказывается меньшей, чем данные, полученные теоретическим путём. Исследования в натурных условиях позволили изучить поведение системы «основание-свая-концевое уширение из щебня» и определить эффективность использования способа упрочнения грунта щебнем под нижним концом свай.

Натурный эксперимент был проведён на строительной площадке города Астрахани при возведении свайного фундамента девятиэтажного панельного двухсекционного жилого дома. Геологический разрез представлен следующими литологическими породами: насыпной слой, строительный мусор мощностью 0,5м; суглинок лёссовый мягкопластичный мощностью 1,5-2,2м; глина бурая, мягкопластичная мощностью 8,2-9м.

В основании лёссовый суглинок плотностью в природном состоянии $\rho_{гр}=1,87\text{ г/см}^3$. Для получения наиболее точных данных растительный слой грунта до глубины 50 см был удалён. Испытания проходили с использованием обсадных труб диаметром 100, 200, 300, 400 мм, длиной 3000 мм (рис.1).

Вначале обсадные трубы задавливали, а грунт извлекали на всю их глубину. Затем в образованную полость обсадной трубы послойно по 10-20 см засыпали щебень фракцией 10-30 мм с его уплотнением с помощью трамбовки соответствующего диаметра, подвешенной к крюку крана. В ходе проведения эксперимента щебень подвергался циклическому нагружению глубинной железобетонной трамбовкой, сбрасываемой с высоты 5-6м. Эффективное решение данной проблемы возможно лишь при условии ясного представления структуры грунта и анализа механического его состава.

Трамбовку сбрасывали с высоты в полуобсадную трубу со щебнем у её нижнего конца. Величина отказа от каждого удара наступала после 5-10 ударов. Затем в трубу опускали арматурный каркас и нагнетали бетонную смесь. С целью экспериментальной отгрузки полученная таким образом свая постепенно загружалась вертикальной нагрузкой при помощи груза, подвешенного к крюку крана.

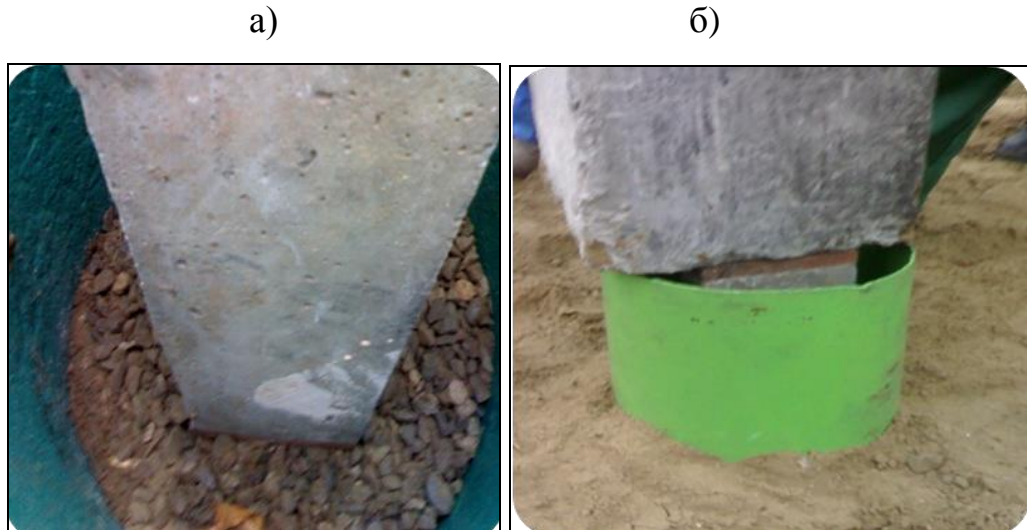


Рис.1. Иллюстрации с места проведения полунатурных испытаний:
а) - втрамбованный щебень в нижний конец обсадной трубы диаметром 400мм;
б) – загрузка штампа в обсадной трубе диаметром 300 мм

Fig.1. Illustrations from the location of the semi-real test:
a) - tamped rubble into the lower end of a casing with a diameter of 400 mm;
b) - loading of a stamp in a casing with a diameter of 300 mm

Каждый этап загрузки повторялся до 6-8 раз для получения статистически достоверных результатов осадки сваи. Вертикальные перемещения свай замеряли с помощью нивелира. Зависимость перемещения сваи от вертикальной нагрузки при испытании на естественном грунте и на уплотнённом щебне показала, что с увеличением диаметра трубы увеличивается и эффективность использования втрамбованного щебня. Так, испытания сваи диаметром 400 мм при нагружении силой 5 кН на грунте показали перемещение – 2,4 мм, а на уплотнённом щебне – 0,122 мм (рис.2) [7-10].

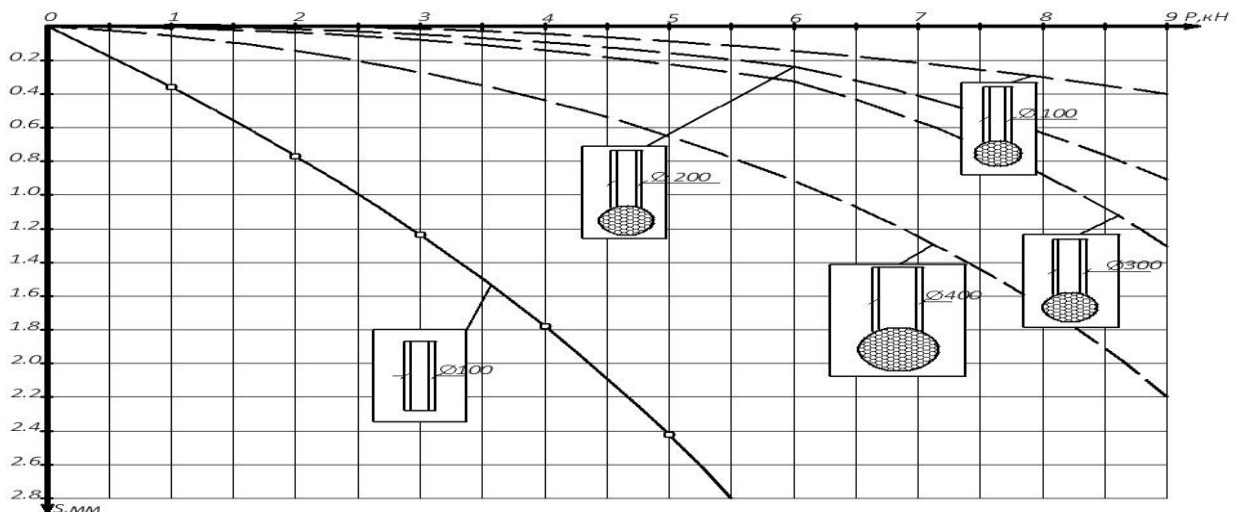


Рис. 2. График зависимости осадки буронабивных микросвай от вертикального нагружения с различными диаметрами ствола сваи

Fig. 2. Graph of the dependence of the sedimentation of boring microcavities on the vertical Loading with different diameters of the pile shaft

В начальный момент свая с уширением в основании работает упруго, что подтверждается прямо пропорциональной зависимостью между нагрузкой и осадкой сваи, а затем линейная зависимость исчезает, что свидетельствует о появлении пластической деформации

грунта. По данным натурного испытания установлено, что снижение осадки трубобетонной сваи с концевым уширением, образованным трамбованием щебня, по сравнению со свайей без уширения достигает в среднем до 600%.

Дальнейшие исследования напряжённо-деформированного состояния буронабивной сваи выполняли с помощью метода конечных элементов и его реализации на ПК. Расчет выполнялся в программном комплексе MIDAS GTS_NX, реализующем метод конечных элементов.

GTS NX является программой, разработанной для детальных расчетов грунтовых (наземных и подземных) сооружений и туннельных систем. В программе реализованы различные методы расчетов, такие как: статический расчет, динамический расчет, расчет фильтрации, сопряженный расчет фильтрации и напряженно-деформированного состояния, расчет консолидации, расчет поэтапности возведения.

Эффективность расчетов в GTS NX обеспечивается специализированными конечными элементами для точного моделирования грунтов и подземной части здания. Для геометрического моделирования в GTS NX могут быть использованы различные библиотеки конечных элементов. Различные элементы могут быть использованы для линейных и нелинейных расчетов напряженно-деформированного состояния, фильтрации, консолидации и других видов сопряженных расчетов [13-17].

Для выполнения расчетов в GTS NX были использованы следующие типы элементов:

- *Трехмерные элементы (3 Dimensional shape element)*. Элементы в форме пентаэдра и гексаэдра, которые могут иметь 4/5/6/8/10/13/15/20 узлов. Пентаэдры могут иметь форму пирамиды или призмы.
- *Элементы интерфейса (контактные элементы) (Interface element)*. Элементы, используемые для моделирования взаимодействия между поверхностями или линиями разграничения. К элементам данного типа относятся контактные элементы типа «грань-грань» с 6/8/12/16 узлами. Для моделирования поведения грунта использовалась нелинейная модель Мора-Кулона. Минимальный шаг разбиения сетки – 20 мм.

Обсуждение результатов. На рис. 3 и 4 представлены: конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и без него; конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и уплотнённым окологрунтовым пространством; изополя деформаций в ограниченном массиве грунта от вертикального нагружения.

Параметры и свойства материалов соответствуют экспериментальным данным (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные физико-механических характеристик грунтов
Table 1. Initial data of physico-mechanical characteristics of soils

Mohr-Coulomb	Измеритель	Суглинок	Глина	Щебень втрамбованный в глину
Type		Drained	Drained	Drained
F_{unsat}	[kN/mi]	18,70	21,20	20,00
F_{sat}	[kN/mi]	18,0	21,20	20,00
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/mI]	17000,000	10000,000	70000,000
input modulus of elasticity	[-]	0,250	0,250	0,250
G_{ref}	[kN/mI]	6800,000	4000,000	28000,000
E_{oed}	[kN/mI]	20400,000	12000,000	84000,000
c_{ref}	[kN/mI]	24,00	40,00	20,00
$R_{inter.}$	[-]	0,10	0,10	1,00

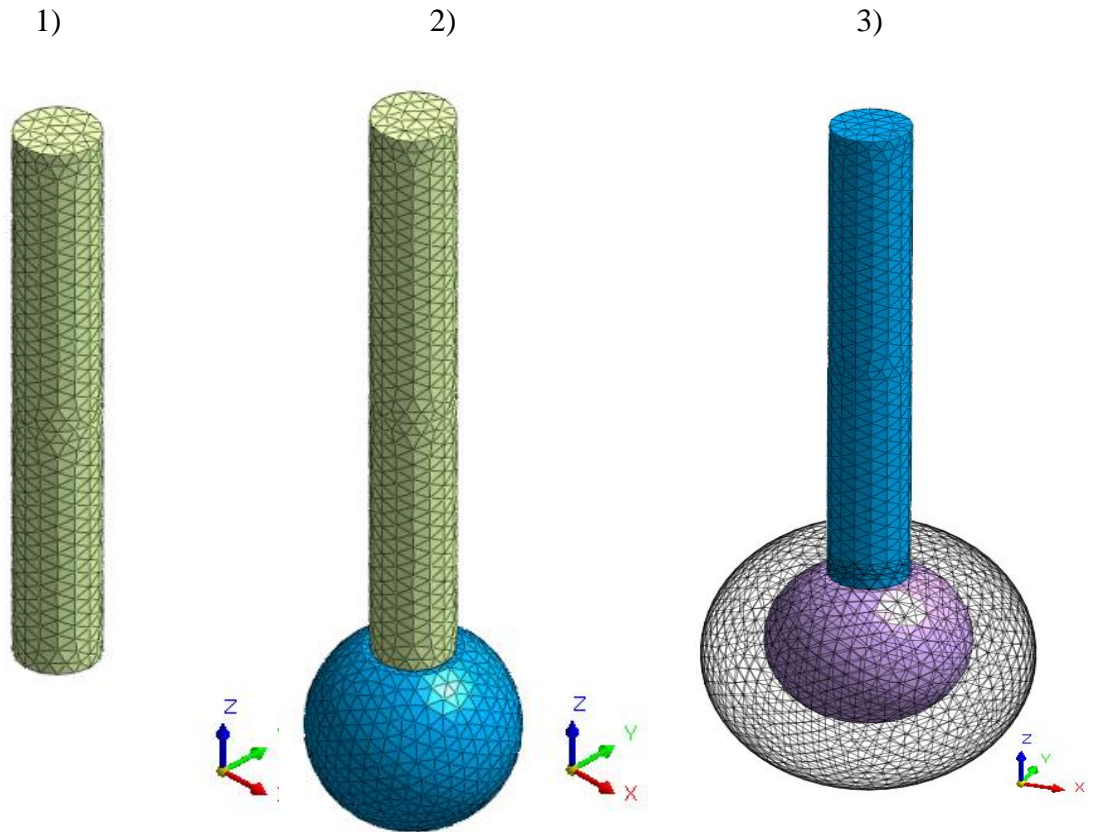


Рис. 3. Конечно-элементные модели сваи в GTS NX:

1- без уширения, 2 – с уширением, 3 – с уширением и уплотнённым окологрунтовым пространством вокруг пяты

Fig. 3. Finite Element Pile Models in GTS NX:

1- without broadening, 2 - with broadening, 3 - with broadening and compacted near-ground space around the heel

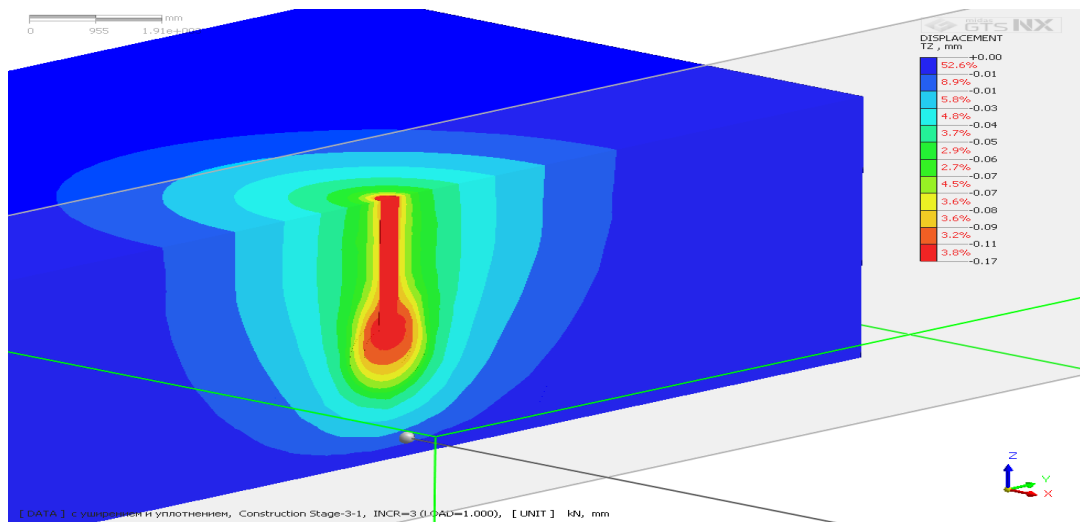


Рис. 4. Перемещения буронабивной микросваи диаметром 400 мм в GTS NX

Fig. 4. Moving of bored micro-beads with a diameter of 400 mm in GTS NX

Результаты численных исследований на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний, расхождение составляет 2-15%. Однако недоучёт

коэффициента уплотнения около грунтовой зоны вокруг уширения из втрамбованного щебня приводит к большому расхождению результатов, что видно из сопоставления числовых параметров осадки с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление результатов расчёта на MIDAS GTS с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны

Table 2. Comparison of calculation results to MIDAS GTS with and without consideration of the compaction factor near the ground zone

№	Диаметр, мм	Эксперимент, перемещение	MIDAS GTS без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны	MIDAS GTS с учетом коэффициента уплотнения около грунтовой зоны
1	Ø100 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,9</u> 3,20	<u>0,86</u> 3,61	<u>0,77</u> =
2	Ø200 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,39</u> <u>0,55</u>	<u>0,35</u> 0,51	<u>0,33</u> =
3	Ø300 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,30</u> 0,42	<u>0,24</u> 0,35	<u>0,23</u> =
4	Ø400 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,3</u> 0,3	<u>0,19</u> 0,29	<u>0,17</u> =

Вывод:

1. По результатам полевых исследований получена зависимость несущей способности буронабивных микросвай с уширением из втрамбованного щебня при вертикальном нагружении. При максимальном размере уширения 3,5 диаметра ствола микросвай несущая способность их грунта увеличивается в 1,8- 6 раз по сравнению с микросваями без уширения в зависимости от диаметра ствола сваи.
2. Натурные обмеры уширений буронабивных микросвай показали, что их форма близка к форме эллипсоида вращения, а соотношение полуосей находится в прямой зависимости от характеристик грунта и объема щебня, что было учтено при построении конечно-элементной модели в численном моделировании эксперимента [3].
3. Результаты численных исследований нагружения буронабивной микросвай с уширенной пятой на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний, расхождение составляет 2-15%.
4. Экспериментальные и численные исследования позволили установить зависимости деформационно-прочностных параметров работы фундамента глубокого заложения состоящего из буронабивных микросвай с уширенной пятой, а именно, диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового полупространства, с учётом коэффициента уплотнения окологрунтового пространства вокруг уширения из щебня.

Библиографический список:

1. Купчикова Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жёсткость основания / Н. В. Купчикова // Журнал «Промышленное и гражданское строительство» №10 / - Москва, 2007 г.

2. Штоль, Т.М. Технология возведения подземной части зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов: Спец.: «Пром. и гражд. стр-во»/ Т. М. Штоль, В. И. Теличенко, В. И. Феклин. – М.: Стройиздат, 1990. – 288с.
3. Зоценко Н.Л., Винников Ю.Л., Бабенко В.А. Усиление фундаментов общественного здания методом вдавливания свай //Реконструкция, Санкт-Петербург-2005г.: Материалы международного симпозиума. Ч.2.-С.Петербург, 1993.с.130-133.
4. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве : тез.доклад на IX Всесоюзном науч.-техн.совещ. / - Москва : Стройиздат, 1978. – 368 с.
5. Далматов Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975.
6. Далматов Б. И. Проектирование и устройство фундаментов около существующих зданий / Б. И. Далматов. – Л.: ЛДНТП, 1976.
7. Купчикова Н.В. Учет сдвиговых деформаций свайных фундаментов с усиливающими элементами // Строительная механика и расчет сооружений. - № 3 (254). - 2014.- с. 17-22.
8. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ В. А. Вознесенский. Москва: Финансы и статистика, 1981. - 263 с.
9. Купчикова, Н. В. Особенности берегоукрепления набережной реки Волги свайными оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны Купчикова Н.В. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 36-39.
10. Федоров, В.С., Купчикова, Н. В. Конструктивные решения свайных фундаментов с поверхностными и концевыми уширениями для структурно-неустойчивых оснований / Вестник гражданских инженеров.- 2011. - №1. – С.88-91.
11. Егорушкин В.А., Городков А.В., Федоров В.С., Азаров В.Н. Биосферная совместимость. Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека // Промышленное и гражданское строительство. - № 10. - 2012. - с. 71-72.
12. Ключева Н.В., Федоров В.С. К анализу живучести внезапно повреждаемых рамных систем// Строительная механика и расчет сооружений. - № 3. - 2006.- с. 7-13.
13. Курбацкий, Е. Н. Методические указания по решению задач механики с использованием преобразования Фурье [Текст]: учебное пособие/Е. Н. Курбацкий. –Москва: МИИТ, 1979.
14. Курбацкий, Е.Н. Метод расчета строительных конструкций с использованием дискретного преобразования Фурье. В кн.: «Конструкции жилых зданий». М.: ЦНИИЭп жилища, 1987.
15. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Research of the dynamical system “beam – stochastic base”// Procedia engineering. - Т. 150. - 2016.- с. 1721-1728.
16. Rytov S.A. New geotechnical technologies/ Proceedings of the 15th European Young Geotechnical Engineers Conference. Dublin, Ireland. 11-14 September 2002.- с.311-315.
17. Lemanza W. Lesmana, A/ Deep soil improvement technigue using combined deep mixing and iet grouting method// Proc. 17th Int. Conf/ on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering/ - Alexandra, Egypt, 5-9 october, 2009, с.2439/

References:

- 1.Kupchikova N.V. Vliyanie uplotneniya grunta so shchebnem na zhyostkost osnovaniya. Zhurnal “Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo”. М.; 2007;10. [Kupchikova N.V. Influence of soil consolidation with crushed stone on the rigidity of the basis. Journal of Industrial and Civil Engineering. Moscow; 2007;10. (In Russ.)]
- 2.Shtol T.M., Telichenko V.I., Feklin V.I. Tekhnologiya vozvedeniya podzemnoy chasti zdaniy i sooruzheniy: ucheb. posobie dlya vuzov: Spets.: “Prom. i grazhd. str-vo”. М.: Stroyizdat; 1990. 288 s. [Shtol T.M., Telichenko V.I., Feklin V.I. Technology of construction of subsurface

parts of building and facilities: textbook for higher institutions. Journal of Industrial and Civil Engineering. Moscow; Stroyizdat; 1990. 288 p. (In Russ.)]

3.Zotsenko N.L., Vinnikov Yu.L., Babenko V.A. Usilenie fundamentov obshchestvennogo zdaniya metodom vdavlivaniya svay. Rekonstruktsiya. Sankt-Peterburg: 2005. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma. Ch.2. S.Peterburg; 1993.130-133. [Zotsenko N.L., Vinnikov Yu.L., Babenko V.A. Underpinning of public building by jacking method. Reconstruction. St. Petersburg: 2015. Proceedings of International Symposium. Pt. St. Petersburg; 1993.130-133. (In Russ.)]

4.Zakreplenie i uplotnenie gruntov v stroitelstve: tez. doklad na IX Vsesoyuznom nauch.-tekhn. soveshch. M.: Stroyizdat, 1978. 368 s. [Consolidation and compaction of soils in construction:theses on IX All-Union scientific and technical meeting. Moscow: Stroyizdat, 1978. 368 p. (In Russ.)]

5.Dal'matov, B.I. Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Proektirovanie svaynykh fundamentov v usloviyakh slabyykh gruntov. L.: Stroyizdat, 1975. [Dal'matov, B.I. Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Design of piles foundation in the conditions of soft ground. Leningrad: Stroyizdat, 1975. (In Russ.)]

6. Dal'matov, B.I. Proektirovanie i ustroystvo fundamentov okolo sushchestvuyushchikh zdaniy. L.: LDNTP, 1976. [Dal'matov, B.I. Foundation works near buildings. Leningrad: LDNTP; 1976. (In Russ.)]

7. Kupchikova N.V. Uchyot sdvigovykh deformatsiy svaynykh fundamentov s usilivayushchimi elementami. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2014;3(254):17-22. [Kupchikova N.V. The accounting of shift deformations of the pile bases with the strengthening elements. Construction mechanics and structural analysis. 2014;3(254):17-22. (In Russ.)]

8.Voznesenskiy V.A. Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh. M.: Finansy i statistika, 1981. 263 s. [Voznesenskiy, V.A. Statistical methods of experiment design in technical and economic research. Moscow: Finances and statistics; 1981. 263 p.(In Russ.)]

9.Kupchikova N.V. Osobennosti beregoukrepleniya naberezhnoy reki Volgi svaynymi obolochkami, kamennoy nabroskoy i stroitelstva na namyvnykh gruntakh vdol beregovoy zony Kupchikova N.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2014;6:36-39. [Kupchikova N.V. Features of bank protection of Volga River embankment by pile covers, riprap and constructions on alluvial soil along a coastal zone of Kupchikov N. V. Industrial and civil engineering. 2014;6:36-39. (In Russ.)]

10.Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Konstruktivnyye resheniya svaynykh fundamentov s poverkhnostnymi i kontsevnyimi ushirennyami dlya strukturno-neustoychivykh osnovaniy. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2011;1:88-91. [Fedorov, V.S., Kupchikova, N.V. Constructive solutions of the piles foundations with superficial and trailer broadenings for the structural-unstable bases. Bulletin of civil engineers. 2011;1:88-91. (In Russ.)]

11.Egorushkin V.A., Gorodkov A.V., Fedorov V.S., Azarov V.N. Biosfernaya sovmestimost. Tekhnologii vnedreniya innovatsiy. Goroda, razvivayushchie cheloveka. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2012;10:71-72. [Egorushkin V.A., Gorodkov A.V., Fedorov V.S., Azarov V.N. Biospheric compatibility. Technologies of innovations. The cities developing a human. Industrial and civil engineering. 2012;10:71-72. (In Russ.)]

12.Klyueva N.V., Fedorov V.S. K analizu zhivuchesti vnezapno povrezhdayemykh ramnykh system. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2006;3:7-13. [Klyueva N.V., Fedorov V.S. To the liveness analysis of unexpectedly damaged frame systems. Construction mechanics and structural analysis. 2006;3:7-13. (In Russ.)]

13.Kurbatskiy E.N. Metodicheskie ukazaniya po resheniyu zadach mekhaniki s ispolzovaniem preobrazovaniya Furye [Tekst]: uchebnoye posobie. M.: MIIT; 1979. [Kurbatskiy E.N. Guidelines to solve mechanics problems using Fourier transformation: textbook. Moscow: MIIT; 1979. (In Russ.)]

14.Kurbatskiy E.N. Metod rascheta stroitelnykh konstruktsiy s ispolzovaniem diskretnogo preobrazovaniya Furye. V kn.: "Konstruktsii zhilykh zdaniy". M.: TsNIIEp zhilishcha; 1987. [Kur-

batskiy E.N. Method of calculation of building constructions using Fourier discrete transformation. In book "Structures of residential buildings". Moscow: TsNIIEP; 1987. (In Russ.)]

15. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Research of the dynamical system "beam – stochastic base". *Procedia Engineering*. 2016;150:1721-1728.

16. Rytov, S.A. New geotechnical technologies. *Proceedings of the 15th European Young Geotechnical Engineers Conference*. Dublin, Ireland; 11-14 September 2002. 311-315.

17. Lemanza W., Lesmana A. Deep soil improvement technique using combined deep mixing and jet grouting method. *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt; 5-9 October, 2009. 2439 p.

Сведения об авторах.

Алехин Виталий Сергеевич - ведущий инженер.

Купчикова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Промышленное и гражданское строительство».

Information about the authors.

Vitaly S. Alekhin - Leading engineer.

Natalia V. Kupchikova – Cand. Sc.(Technical), Assoc. Prof., Department Industrial and civil construction.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 19.09.2016.

Принята в печать 01.12.2016.

Conflict of interest

Received 19.09.2016.

Accepted for publication 01.12.2016.