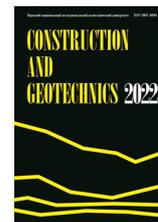




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.07

УДК 624.154

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНКЕРНЫХ СВАЙ-БАРЕТТ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Р.А. Мангушев<sup>1</sup>, Н.С. Никитина<sup>2</sup>, И.Ю. Терещенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Гипроатом, Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 11 декабря 2022  
Одобрена: 27 января 2023  
Принята к публикации:  
6 февраля 2023

#### Ключевые слова:

осадка фундаментов, сваи-баретты, численное моделирование, Midas GTS NX, анкерные сваи.

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены основные проблемы проектирования и расчета фундаментов глубокого заложения высотных зданий в виде свай-баретт. Приводятся результаты и методика полевых испытаний свай-баретт для фундамента проектируемого 56-этажного жилого здания в г. Москве. Представлена характеристика инженерно-геологических условий площадки будущего строительства и проектные решения для проведения опытных испытаний. Учитывая большое поперечное сечение баретт, из-за чего вовлекается значительный объем околосвайного массива грунта с формированием сложного напряженно-деформированного состояния, для получения достоверных результатов и верификации расчетной модели рекомендуется численные испытания проводить в полном соответствии с натурным экспериментом с учетом анкерных свай. В статье описывается методика и результаты численного расчета определения несущей способности баретты с учетом моделирования анкерной системы в программном комплексе «Midas GTS NX» методом конечных элементов, показана принципиальная возможность использования программного комплекса и описанной методики для практических целей с допустимой точностью. В статье приведены графики вертикальных перемещений оголовка баретты от приложенной нагрузки при натурном испытании и общая оценка несущей способности свай-баретты, полученная численными решениями. Установлено, что при учете анкерной системы (балок и свай) в численном моделировании полученные результаты расчета наиболее точно к полевым испытаниям описывают поведение сваи под нагрузкой по сравнению с расчетом одиночной сваи-баретты. Несмотря на заложение низа баретт в скальных грунтах, баретта по условиям взаимодействия с грунтом относится к висячим сваям ввиду значительной передачи нагрузки по боковой поверхности.

© ПНИПУ

© Мангушев Рашид Абдулович – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, email: ramangushev@yandex.ru

Никитина Надежда Сергеевна – кандидат технических наук, профессор, e-mail: nsnikitina@mail.ru

Терещенко Иван Юрьевич – главный специалист, ООО «Гипроатом», e-mail: i.tereshchenko@giproatom.com

Rashid A. Mangushev – Corresponding Member of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ramangushev@yandex.ru

Nadezhda S. Nikitina – Ph. D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: nsnikitina@mail.ru

Ivan Yu. Tereshchenko – Chief Specialist, Giproatom LLC, e-mail: i.tereshchenko@giproatom.com

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ANCHOR PILES ON TEST RESULTS

R.A. Mangushev<sup>1</sup>, N.S. Nikitina<sup>2</sup>, I.Yu. Tereshchenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Giproatom, Moscow, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 11 December 2022  
Approved: 27 January 2023  
Accepted for publication:  
06 February 2023

#### Keywords:

foundation settlement, piles-barrettes, numerical modeling, Midas GTS NX, anchor piles.

### ABSTRACT

The paper considers the main problems of design and calculation of deep foundations of high-rise buildings in the form of piles-barrettes. The results and methodology of field tests of barrette piles for the foundation of a 56-storey residential building in Moscow are presented. The characteristics of engineering-geological conditions of the future construction site and design solutions for pilot tests are presented. Given a large cross-section of the barrette, which involves a significant amount of pile-type soil mass with the formation of a complex stress-strain state, to obtain reliable results and verification of the calculated model is recommended to perform numerical tests in full compliance with the field experiment, taking into account the anchored piles. The paper describes the method and the results of the numerical calculation of the load-carrying capacity of a barrette taking into consideration the modeling of an anchoring system in the Midas GTS NX program complex by the finite-element method and shows the basic possibility of using the program complex and the described method for practical purposes with an admissible accuracy. The paper contains diagrams of vertical displacements of a barrette head as a function of the applied load in full-scale tests and a general evaluation of the carrying capacity of a barrette pile obtained by numerical solutions. It is found that by taking into account the anchoring system (beams and piles) in the numerical simulation, the calculation results obtained are the most accurate to the field tests in describing the behavior of the pile under load in comparison with the calculation of a single barrette pile. In spite of the fact that the barrette bottom is embedded into the rocky soils, the barrette piles are referred to the hanging piles according to the interaction conditions with the soil due to the significant load transfer along the lateral surface.

© PNRPU

---

## Введение

Проектирование и строительство свайных фундаментов высотных зданий возможно только на основе адекватных геологических изысканий, натурных испытаний свай и численных расчетов методом конечных элементов (МКЭ) (Мангушев и др. [1, 5], Katzenbach, Leppa [2], Katzenbach и др. [3], Kulhawy, Phoon [4], Ильичёв и Мангушев [6]).

Одним из вариантов свайных фундаментов являются сваи-баретты – особый вид буровых свай, которые могут воспринимать значительные вертикальные, горизонтальные и моментные нагрузки, особенно действующие вдоль их вытянутой стороны (рис. 1).

Бареттные фундаменты используются при значительных нагрузках, часто применяются для строительства высотных зданий и служат альтернативой буронабивным сваям, в частности, когда требуется производство большого количества свай значительного диаметра. Благодаря большим размерам они могут принимать на себя большие нагрузки как по грунту, так и по материалу (Ishihara [7], Тер-Мартirosян и др. [8], Сидоров и Степанищев [9]).

Баретты выполняются в плане в виде прямоугольников и различных вариаций из них. При выборе параметров форм баретт ориентируются на конструктивную схему здания, нагрузки от стен, колонн и других конструктивных элементов.

Однако очень часто значения, полученные расчетами, значительно отличаются от результатов полевых испытаний свай вертикальной нагрузкой (Мангушев, Никитина [10, 11], Мангушев и др. [12], Algin и др. [13]).



Рис. 1. Общий вид сваи-баретты  
Fig. 1. General view of baretta pile

Натурные испытания свай статической вдавливающей нагрузкой проводятся с помощью гидравлических домкратов. Реактивные усилия передаются на анкерные сваи, работающие на выдергивание (рис. 2).

Работа анкерных свай создает сложное напряженно-деформированное состояние околосвайного массива грунта, тем самым оказывая влияние на испытываемую сваю.

В первую очередь это касается таких фундаментов глубокого заложения, как баретты (Мангушев и др. [14], Мангушев [15]).



Рис. 2. Статические испытания сваи большой длины  
Fig. 2. Static testing of a long pile

Так как поперечное сечение свай-баретт, устраиваемых для высотных зданий, как правило, имеет значительные габариты в плане, то в процессе нагружения в работу вовлекается большой массив грунта вокруг свай. Поэтому в ходе испытаний эффект влияния соседних анкерных баретт может быть существенным, и при выполнении численных расчетов немаловажную роль играет подробное моделирование проведенного натурального испытания с учетом распорных и анкерных конструкций для получения достоверного поведения свайного основания, максимально приближенного к фактическим данным (Петрухин и др. [16]).

На площадке будущего строительства 56-этажного жилого здания в Москве были проведены натурные полевые испытания двух опытных баретт сечением  $2800 \times 640$  мм и длиной 52,5 м в соответствии с разработанным проектом. В верхней части они имеют уширение, размеры которого в плане составляют  $2820 \times 1020$  мм (Знаменский и др. [17]).

## Инженерно-геологические условия площадки и полевые испытания

Площадка строительства проектируемого жилого дома на бареттах расположена в пределах поймы реки Яузы г. Москвы со сравнительно ровным спланированным рельефом.

Фундаменты высотного здания предусмотрены в виде монолитной железобетонной плиты толщиной 3,3 м на основании из баретт размерами в плане 2800 × 640 мм и по глубине 52,4 м. Материал баретт – тяжелый бетон класса В35.

Абсолютная отметка основания баретт принята равной + 83,500, основанием служат известняки (ИГЭ-35) средней прочности, водонасыщенные. Основные свойства грунтов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов

Table 1

Physical and mechanical properties of soils

№	Наименование грунта	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\varphi$ , град	$c$ , МПа
3	Суглинок мягко-текучепластичный	18,1	7	17	13
8	Песок мелкий средней плотности	19,2	21	27	2
26	Песок средней крупности, средней плотности, водонасыщенный	19,9	30	29	1
28а	Глины твердые и полутвердые	18,1	56	16	79
29	Глины твердые	18,6	51	21	93
33	Глины твердые	21,7	53	21	66
35	Известняки средней прочности	18,5	6800	$R_c = 34$ МПа	

На площадке будущего строительства проведены классические испытания опытных свай-баретт вдавливающей нагрузкой. Осевая нагрузка на баретты передавалась с помощью объединенных гидравлических домкратов с реперной системой. Реактивные усилия воспринимались железобетонной балкой сечением 2,5 × 3,0 м, длиной 19,5 м. Балка жестко закреплена в шести бареттах, которые не имели уширений в верхней части и соответствовали проекту. Общая схема испытания представлена на рис. 3.

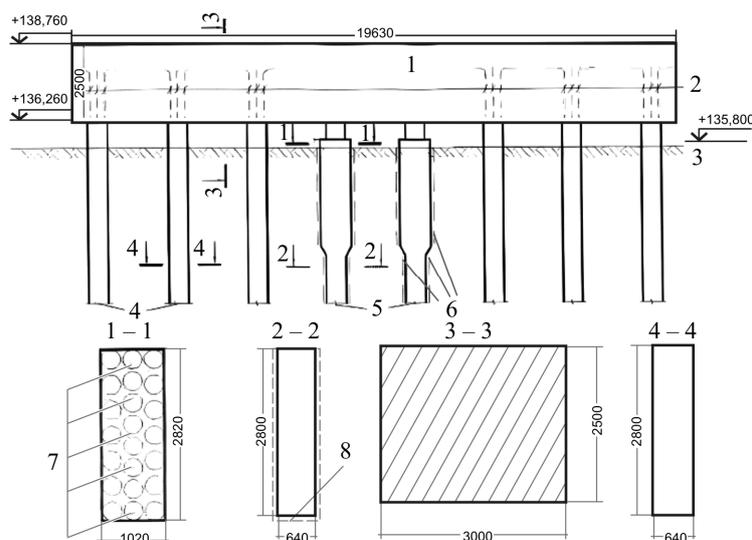


Рис. 3. Схема испытания

Fig. 3. Test scheme

Методика данного испытания более подробно описана в работах (Знаменский и др. [17], Петрухин [16], Шулятьев [18, 19]).

### **Численное моделирование в Midas GTS NX**

Математическое моделирование изменений напряженно-деформированного состояния грунтового массива в процессе виртуального испытания опытных свай – баретт проводилось с помощью специализированного программного комплекса Midas GTS NX в пространственной постановке. При этом в модели были учтены элементы анкерной системы – железобетонная балка и сваи-баретты.

Конечно-элементная модель системы «испытываемые баретты – окружающий массив грунта – анкерная система» в Midas GTS NX представлена на рис. 4.

Габариты расчётной области имеют габариты в плане 39,5 × 23,0 м и по глубине 70 м.

Для расчетов в программе Midas GTS NX для грунтов была принята упругопластическая модель упрочняющегося грунта Hardening Soil (Мирный и Тер-Мартirosян [20]).

Для формирования конечных элементов использовалась гибридная смешанная сетка, в основном гексаэдральные типы конечных элементов (КЭ), так как в них распределение напряжений более равномерное (Daniel [21]). Шаг сетки сгущен в зоне расположения баретт и разряжается к границам расчетной области с целью оптимизации модели без потери качества результатов расчета (Bhattacharya & Prashant [22]).

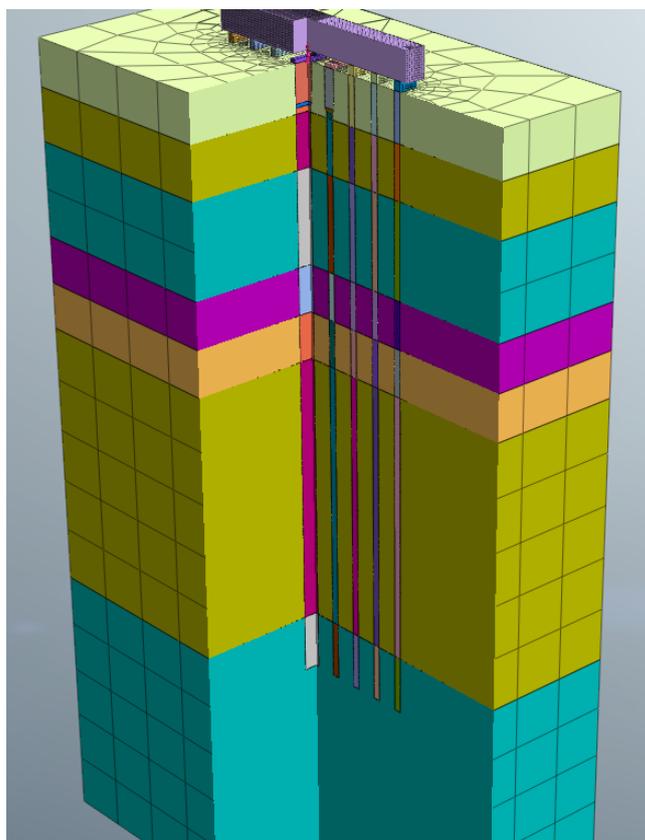


Рис. 4. Общий вид КЭ-модели  
Fig. 4. General view of the FEM-model

Для моделирования работы конструкций и грунтов использованы следующие типы элементов:

– 3D:

*Solid* (твердое тело) – объемные элементы массива грунта, опытных и анкерных баретт, распорной железобетонной балки (рис. 5).

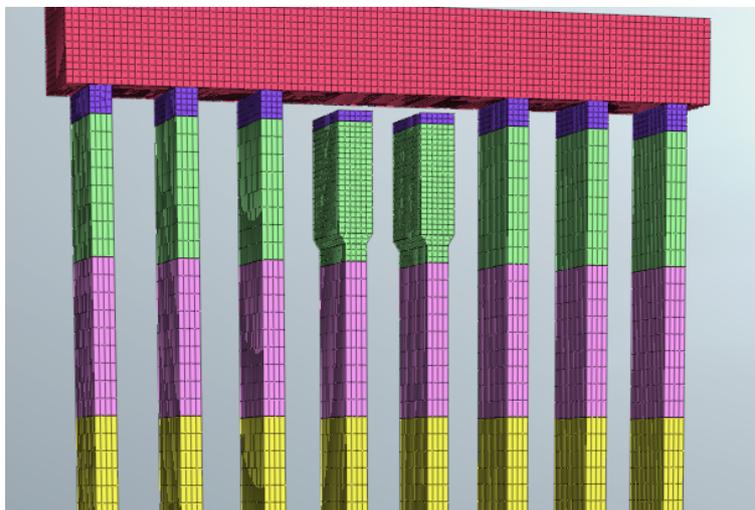


Рис. 5. Моделирование баретт и распорной балки твердотельными элементами  
Fig. 5. Modeling of the barettes and strut with solid elements

– Специальные типы элементов:

*Interface* (контакт) – учёт граничного поведения на контакте баретт и массива грунта. Параметры жесткости назначены с учетом снижения прочности на контакте с учетом понижающих коэффициентов, приведенных в российских нормах проектирования (СП24.13330.2021 «Свайные фундаменты»);

*Rigid link* (элементы жесткой связи) – элементы жесткой связи на контакте для стадий, когда *Interface* еще не активен. Также *Rigid link* применялся для приложения точечной нагрузки по площади поперечного сечения сваи.

Математическое моделирование испытания выполнялось постадийно в несколько этапов:

1) формирование начального напряженно-деформированного состояния (НДС) массива грунта;

2) устройство опытных и анкерных свай-баретт, распорной железобетонной балки. Последующее обнуление перемещений;

3) нагрузка баретты № 1. Поэтапное приложение вертикальной вдавливающей нагрузки к опытной баретте № 1 и одновременное приложение нагрузки с обратным знаком к распорной балке;

4) разгрузка баретты № 1. Поэтапное снятие вертикальной вдавливающей нагрузки к опытной баретте № 1 и одновременное снятие нагрузки с обратным знаком к распорной балке.

## Результаты натурных испытаний

По результатам полевых испытаний при максимальной вертикальной нагрузке 36 000 кН, приложенной к голове сваи-баретты № 1 и направленной сверху вниз, осадка достигла 21,84 мм. Стабилизация осадок при такой нагрузке не была достигнута.

Стабилизации осадок баретты № 2 удалось достигнуть только на ступени нагружения, равной 34 000 кН, при осадке 16,32 мм.

Максимальная статическая нагрузка, передаваемая на баретты с достижением условной стабилизации осадок, составила:

– для баретты № 1 – 3200 тс при осадке 18,33 мм;

– баретты № 2 – 3400 тс при осадке 16,32 мм.

Наряду с испытаниями баретт, авторами работы (Знаменский и др. [15]) были описаны результаты численного моделирования испытания методом конечных элементов с использованием программного комплекса Midas GTS NX, при этом моделировалась одиночная баретта без учета анкерной системы.

При приложении статической нагрузки 3600 т вертикальное перемещение баретты в численном эксперименте составило 29,6 мм, что на 26 % больше, чем осадка баретты, полученная при приложении такой же нагрузки в натурных испытаниях.

## **Результаты численного моделирования в Midas GTS NX**

Деформированная схема модели и вертикальные перемещения на этапе приложения полной нагрузки (36 000 кН) на баретту № 1 представлены на рис. 6.

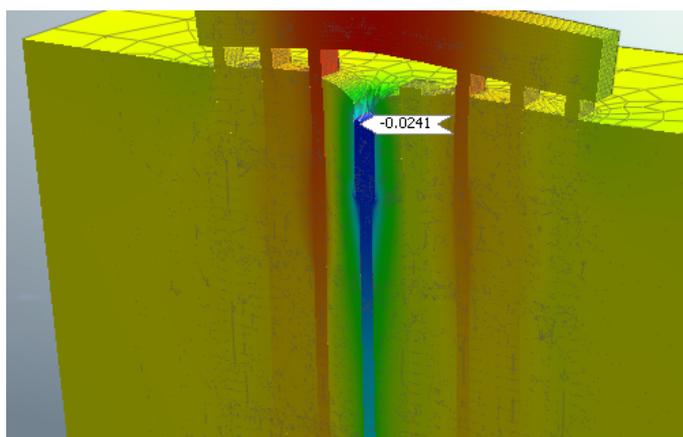


Рис. 6. Деформированная схема и вертикальные перемещения модели при испытании баретты № 1

Fig. 6. Deformed diagram and vertical displacements of the model during the test of barette № 1

При нагрузке на баретту № 1, равной 36 000 кН, осадка составила 24,1 мм, что на 10 % больше осадки, полученной при той же нагрузке по натурным испытаниям.

## **Обсуждение**

Результаты полевых испытаний и численных расчетов баретты показаны на совмещенном графике «нагрузка – осадка» (рис. 7).

При учете анкерной системы (балок и свай) в численном моделировании в программе Midas GTS NX полученные результаты расчета наиболее приближены к полевым испытаниям по сравнению с расчетом одиночной свай-баретты (табл. 2).

Таблица 2

Результаты осадки сваи-баретты по различным методам

Table 2

Results of pile-barette settlement by different methods

Общая осадка опытной сваи-баретты (2,8 × 0,64 м и L – 52,5 м) при нагрузке 36 000 кН, s, мм	
Результаты полевых испытаний	21,84
Расчет по Midas GTS NX (одиночная баретта)	29,6 (+ 26 %)
Расчет по Midas GTS NX (с учетом анкерной системы)	24,1 (+ 10 %)

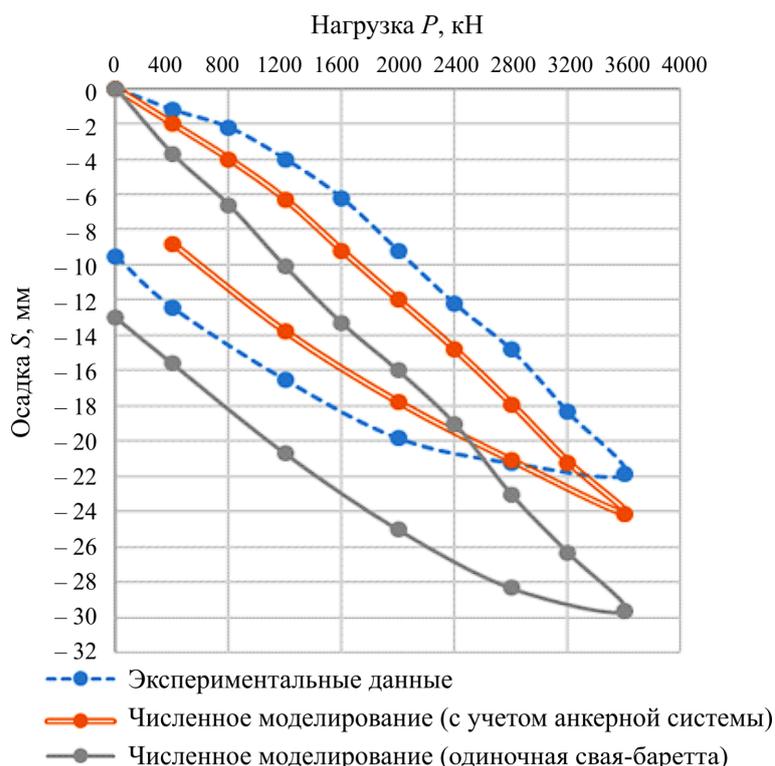


Рис. 7. Совмещенный график «нагрузка – осадка» результатов полевых испытаний и численных решений  
 Fig. 7. Combined "load – settlement" plot of field test results and numerical solutions

## Заключение

1) При нагрузке на баретту № 1, равной 36 000 кН, в численном эксперименте с применением Midas GTS NX осадка составила 24,1 мм. Полученные значения в достаточной степени описывают результаты полевых испытаний (+ 10 %).

2) При учете анкерной системы (балок и свай) в численном моделировании полученные результаты расчета наиболее приближены к полевым испытаниям по сравнению с расчетом одиночной сваи-баретты. Данная методика проведения численного моделирования испытания в программе Midas GTS NX может быть использована в практических целях с достаточной точностью.

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

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

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

## **Библиографический список**

1. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин В.М. Численные расчеты в геотехнической практике. – М.: АСВ, 2022.
2. Katzenbach R., Leppa S. Realistic modelling of soil-structure interaction for high-rise buildings // *Procedia Engineering*. – 2015. – No. 117. – P. 162–171.
3. Katzenbach R., Leppa S., Choudhury D. Foundation systems for high-rise structures. – Boca Raton: CRC Press, 2017.
4. Kulhawy F.K., Phoon K.K. Drilled shaft side resistance in clay soil to rock // *Design Performances of Deep Foundation*. – ASCE (special publication), 1993. – P. 172–183.
5. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р.А. Мангушев, А.Л. Готман, В.В. Знаменский, А.Б. Пономарев. – М.: АСВ, 2015.
6. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М., 2016. – 1040 с.
7. Ishihara K. Recent advances in pile testing and diaphragm wall construction in Japan // *Geotechnical Engineering*. – 2010. – P. 97–122.
8. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Струнин П.В. Теоретические основы расчета фундаментов глубокого заложения – свай и баррет // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 190–216.
9. Сидоров В.В., Степанищев К.Ю. Исследование взаимодействия баррет с основанием с учетом их размера и формы // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 78–88.
10. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Evaluation and analysis of bearing capacity of bored piles and deep-laid pilebarrette for high-rise building on loose ground based on calculations and field tests // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2018. – No. 14 (2). – P. 109–116.
11. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Bearing capacity of deep foundation for high-rise facility on weak soils: Comparing of analysis results and experimental data // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – No. 15 (1). – P. 90–97.
12. Analytical and numerical methods for determining the bearing capacity of piles barett on weak soils in deep pits / R.A. Mangushev, N.S. Nikitina, T. Hieu Le, I.Yu. Tereshchenko // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – No. 17 (3). – P. 94–101.
13. Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L. 3D Finite elements analysis of barrette piled raft foundations // *Teknik Dergi*. – 2021. – P. 9443–9458.
14. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии. – М.: АСВ, 2010.
15. Мангушев Р.А. Численные, аналитические и полевые методы оценки несущей способности свай и свай-баррет глубокого заложения в слабых грунтах Санкт-Петербурга // *Сб. ст. междунар. науч.-техн. конф.* – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 44–52.
16. Петрухин В.П., Поспехов В.С., Шулятьев О.А. Опыт проектирования и мониторинга глубокого котлована // *НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. Сб. науч. тр.* 99. – 2008. – С. 139–148.
17. Исследование несущей способности баретт для 56-этажного жилого здания / В.В. Знаменский, Б.В. Бахолдин, Е.А. Парфенов, М.В. Мусатов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2019. – № 1. – С. 2–6.

18. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. – М.: АСВ, 2020.
19. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – Т. 5, № 4. – С. 202–244.
20. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Области применения современных механических моделей грунтов // Геотехника. – 2017. – № 1. – С. 20–26.
21. Daniel S.H.L. Finite Element Mesh Generation. – N.Y.: CRC Press, 2015.
22. Bhattacharya D., Prashant A. Mesh size sensitivity and effect of perturbation intensity on coupled undrained instability analysis in sands // Selected Papers From Sessions Of The Eighth International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering, Philadelphia, Pennsylvania. – 2019. – P. 1–10.

## References

1. Mangushev R.A., Diakonov I.P., Polunin V.M. Numerical calculations in geotechnical practice. Moscow, ASV, 2022.
2. Katzenbach R., Leppa S. Realistic modelling of soil-structure interaction for high-rise buildings. *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 162-171.
3. Katzenbach R., Leppa S., Choudhury D. Foundation systems for high-rise structures. Boca Raton, CRC Press, 2017.
4. Kulhawy F.K., Phoon K.K. Drilled shaft side resistance in clay soil to rock. *Design Performances of Deep Foundation*. ASCE (special publication), 1993, pp. 172–183.
5. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamensky V.V., Ponomarev A.B. Piles and pile foundations. Structures, design and technology. Moscow, ASV, 2015.
6. Handbook of geotechnics. Bases, foundations and underground structures. 2<sup>nd</sup> ed. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow, 2016, 1040 p.
7. Ishihara K. Recent advances in pile testing and diaphragm wall construction in Japan. *Geotechnical Engineering*, 2010, pp. 97–122.
8. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Strunin P.V. Theoretical basis of calculating deep foundations – piles and barrettes]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, vol. 5, iss. 2, pp. 190-216.
9. Sidorov V.V., Stepanischev K.Yu. Investigation of interaction of barrettes with the base taking into account their size and shape. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 78-88.
10. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Evaluation and analysis of bearing capacity of bored piles and deep-laid pilebarrette for high-rise building on loose ground based on calculations and field tests. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, no. 14 (2), pp. 109-116.
11. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Bearing capacity of deep foundation for high-rise facility on weak soils: Comparing of analysis results and experimental data. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2019, no. 15 (1), pp. 90-97.
12. Mangushev R.A., Nikitina N.S., Hieu Le T., Tereshchenko I.Yu. Analytical and numerical methods for determining the bearing capacity of piles barett on weak soils in deep pits. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2021, no. 17 (3), pp. 94-101.
13. Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L. 3D Finite elements analysis of barrette piled raft foundations. *Teknik Dergi*, 2021, pp. 9443–9458.

14. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Modern pile technologies. Moscow, ASV, 2010.
15. Mangushev R.A. Numerical, analytical and field methods for assessing the bearing capacity of piles and deep pile-barrels in weak soils of St. Petersburg. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Saint Petersburg, SPbGASU, 2012, pp. 44-52.
16. Petrukhin V.P., Pospelov V.S., Shulyatyev O.A.. Experience of designing and monitoring of a deep excavation. *N.M. Gersevanov NIIOSP. Collection of scientific papers*, 99, 2008, pp. 139-148.
17. Znamenskii V.V., Bakholdin B.V., Parfenov E.A., Musatov M.V. Investigation of bearing capacity of barette for 56-storey residential building. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2019, no. 1, pp. 2-6.
18. Shulyatyev O.A. Bases and foundations of high-rise buildings. Moscow, ASV, 2010.
19. Shulyatyev O.A. Foundations of high-rise buildings. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, vol. 5, iss. 4, pp. 202-244.
20. Mirny A.Y., Ter-Martirosyan A.Z. Areas of application of modern mechanical models of soils. *Geotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 20-26.
21. Daniel S.H.L. Finite Element Mesh Generation. New York, CRC Press, 2015.
22. Bhattacharya D., Prashant A. Mesh size sensitivity and effect of perturbation intensity on coupled undrained instability analysis in sands. *Selected Papers From Sessions Of The Eighth International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering*, Philadelphia, Pennsylvania, 2019, pp. 1–10.