

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154.1

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.2

Программа экспериментальных исследований работы свайного поля в однородном основании

Виталий Максимович Дереховский, Геннадий Михайлович Скибин

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
(ЮРГПУ(НПИ)); г. Новочеркасск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается программа экспериментальных исследований на основе численного моделирования работы свайного поля в однородном песчаном основании. Актуальность обусловлена необходимостью повышения надежности и безопасности свайных фундаментов, широко применяемых в современном строительстве. Исследование направлено на устранение существующих пробелов в предсказании взаимодействия свай с однородным грунтом. Разработана и апробирована программа экспериментов, включающая моделирование и натурные испытания. Полученные результаты позволили предложить новые подходы к расчету свайных полей, что имеет значительную научную и практическую ценность для строительной отрасли.

Материалы и методы. Использованы данные научных публикаций, нормативных документов, проектных материалов и результатов экспериментов. Применены методы системного анализа, моделирования, а также экспериментальные и статистические подходы. Эти методы дали возможность получить новые сведения и внести коррективы в расчетные методы свайных фундаментов.

Результаты. Разработана численная модель экспериментальных исследований, проанализированы различные методы расчета свайных фундаментов, разработана модель стенда для проведения опытов, создана поэтапная программа выполнения эксперимента.

Выводы. Результаты исследования работы свайного поля в однородном основании обладают высокой научной и практической ценностью. Разработанная математическая модель и экспериментальные данные позволили более точно описать распределение нагрузок и деформаций в свайном поле, что является значительным вкладом в теорию расчета свайных фундаментов. Полученные результаты подтверждают необходимость и важность пересмотра существующих методов расчета свайных фундаментов. Их внедрение в строительную практику и образовательные программы даст возможность повысить надежность и эффективность строительства, а также создать базу для дальнейших исследований в данной области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свайные фундаменты, численное моделирование, экспериментальные исследования, натурные испытания, системный анализ, оптимизация проектирования, надежность сооружений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дереховский В.М., Скибин Г.М. Программа экспериментальных исследований работы свайного поля в однородном основании // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.2

Автор, ответственный за переписку: Виталий Максимович Дереховский, Vitaliyderekx@ya.ru.

Experimental research programme on the behaviour of a pile group in a homogeneous base

Vitalii M. Derekhovskii, Gennadii M. Skibin

M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A programme of experimental research based on numerical modelling of pile group behaviour in a homogeneous sandy foundation is considered. The relevance of this work is due to the need to improve the reliability and safety of pile foundations, which are widely used in modern construction. The research is aimed at eliminating the existing gaps in predicting the interaction between piles and homogeneous soil. Within the scope of this study, a comprehensive experimental programme was developed and tested, including both modelling and field tests. The results obtained allowed us to propose new approaches to the calculation of pile groups, which has significant scientific and practical value for the construction industry.

Materials and methods. Data from scientific publications, regulatory documents, project materials, and experimental results were used. Methods of systematic analysis, modelling, as well as experimental and statistical approaches, were applied. These methods enabled the acquisition of new data and adjustments to the calculation methods for pile foundations.

Results. A numerical model for experimental research was developed, various calculation methods for pile foundations were analyzed, a test stand model was created, and a step-by-step experimental programme was designed.

Conclusions. The research results on the behaviour of pile groups in a homogeneous foundation have high scientific and practical value. The developed mathematical model and experimental data allowed to describe more accurately the distribution of loads and deformations in the pile group, which is a significant contribution to the theory of calculation of pile foundations. The obtained results confirm the necessity and importance of revising the existing methods of pile foundations calculation. Their introduction into construction practice and educational programmes will improve the reliability and efficiency of construction, as well as create a basis for further research in this field.

KEYWORDS: pile foundations, numerical modelling, experimental research, field tests, systematic analysis, design optimization, structural reliability

FOR CITATION: Derekhovskii V.M., Skibin G.M. Experimental research programme on the behaviour of a pile group in a homogeneous base. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.2

Corresponding author: Vitalii M. Derekhovskii, Vitaliyderex@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поведения свайных полей в однородных грунтах является важной областью геотехнической инженерии [1]. Свайные фундаменты широко применяются в строительстве благодаря своей экономичности, надежности и способности адаптироваться к различным геологическим условиям [2, 3]. Однако, несмотря на широкое использование свай, особенности их работы в однородных основаниях требуют более глубокого понимания для обеспечения надежности и долговечности конструкций. Применение метода конечных элементов для расчета плитно-свайных фундаментов приведено в публикации [4].

В последние десятилетия наблюдается значительный интерес к изучению взаимодействия сваи с грунтом, что связано с необходимостью повышения точности прогнозирования осадки и несущей способности свайных конструкций [5, 6]. В частности, следует учитывать влияние возможных дефектов, таких как осадочные породы на основании свай, которые могут существенно изменять механические свойства системы «сваи – грунт» и приводить к непредсказуемым деформациям [7], а также взаимное влияние свай друг на друга [8–10].

Значительное внимание уделяется и изучению поведения свайных полей в условиях динамических нагрузок, таких как ветер. Хотя основное внимание подобных исследований сосредоточено на условиях с чередующимися слоями грунтов, результаты этих работ могут быть полезны и для анализа свайных полей в однородных условиях [11].

Цель исследования — изучение взаимодействия свайного поля с однородным песчаным основанием, анализ распределения напряжений и деформаций в грунте, а также определение оптимальной конфигурации свайного поля для достижения максимального использования несущей способности [12–14].

Основные задачи исследования:

- анализ существующих методов численного моделирования свайных полей;
- разработка модели свайного поля в однородном песчаном основании;
- проведение численного эксперимента для оценки влияния различных параметров (глубины заложения,

диаметра сваи, расстояния между сваями) на несущую способность свайного поля;

- анализ результатов и формулирование рекомендаций для проектирования свайных фундаментов.

Таким образом, необходимость систематического подхода к изучению свайных полей в однородных грунтах обуславливает актуальность данной работы, направленной на анализ существующих методов и разработку новых моделей, позволяющих более точно описывать их поведение в различных эксплуатационных условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Однородное песчаное основание было выбрано в качестве объекта исследования, поскольку песчаные грунты довольно прогнозируемы, не имеют просадочных свойств и не подвержены другим сложным геологическим процессам. Песчаный грунт является отличным материалом для изучения взаимного влияния и методов оптимизации свайных полей. Исследование свайного поля в однородном песчаном основании дает возможность получить представление о взаимодействии сваи с грунтом и о том, как групповые эффекты влияют на общую несущую способность свайного фундамента.

Программа испытаний предполагает несколько циклов выполнения испытаний:

1. Нулевой цикл — испытание одиночных свай различной длины. Цикл подразумевает тестирование одиночных свай разной длины для определения их несущей способности и поведения под нагрузкой. Целью таких испытаний может быть корреляция полученных данных с расчетными моделями и теоретическими расчетами, а также проверка и отладка оборудования перед проведением основных циклов испытания свайных полей.

2. Цикл 1 — центральное нагружение равномерного свайного поля. В этом цикле осуществляется испытание свайного поля с равномерным распределением нагрузки по центру. Это позволяет изучить поведение свайного поля под равномерной нагрузкой и оценить его эффективность в реальных условиях.

3. Цикл 2 — центральное нагружение оптимизированного свайного поля. Исследуется свайное

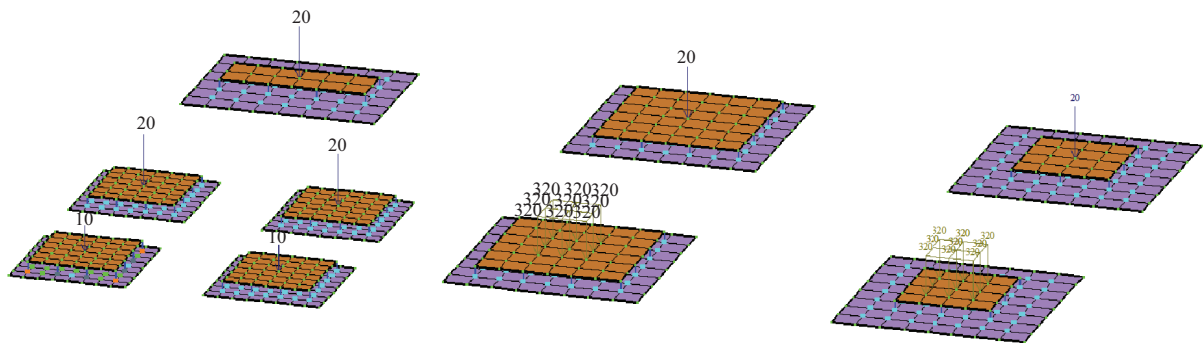


Рис. 1. Варианты модельных образцов

Fig. 1. Model specimen options

поле, которое было предварительно оптимизировано, с учетом различных факторов, таких как расположение свай, их длина и диаметр. Нагрузка также прикладывается по центру, но для уже улучшенного проектного решения.

4. Цикл 3 — нагружение с эксцентриситетом. Выполняется испытание свайного поля с эксцентрическим приложением нагрузки, которое наблюдается при эксплуатации реальных зданий под действием ветра. Это дает возможность оценить поведение свайного поля при несимметричном распределении нагрузки, что может быть важно для анализа устойчивости и распределения сил в реальных условиях эксплуатации.

Эти испытания помогут оценить как одиночные сваи, так и свайные поля в различных условиях нагрузки, что, в свою очередь, способствует более точному проектированию и строительству.

Исследование планируется проводить при помощи лабораторной установки «Машина фундаментная МФ-1», находящейся на кафедре промышленного, гражданского строительства, оснований и фундаментов Южно-Российского государственного политех-

нического университета (НПИ) имени М.И. Платова. У данной лабораторной установки недавно появился цифровой двойник, ознакомиться с которым можно на интернет-ресурсе кафедры.

На нулевом цикле осуществлено поверочное нагружение единичной сваи для сопоставления результатов натурных испытаний с результатами численных расчетов.

Этапы численного моделирования:

- подготовка геометрии модели. Определение размеров расчетной области, конфигурации свайного поля и характеристик грунта (рис. 1);
- установление граничных условий. Задание условий на границах расчетной области, таких как закрепление боковых граней и основания модели;
- назначение физических и механических параметров. Ввод характеристик песчаного основания, таких как угол внутреннего трения, модуль упругости, плотность грунта, а также параметров свай (длина, диаметр);
- моделирование процесса нагружения. Задание статических и динамических нагрузок, прикладыва-

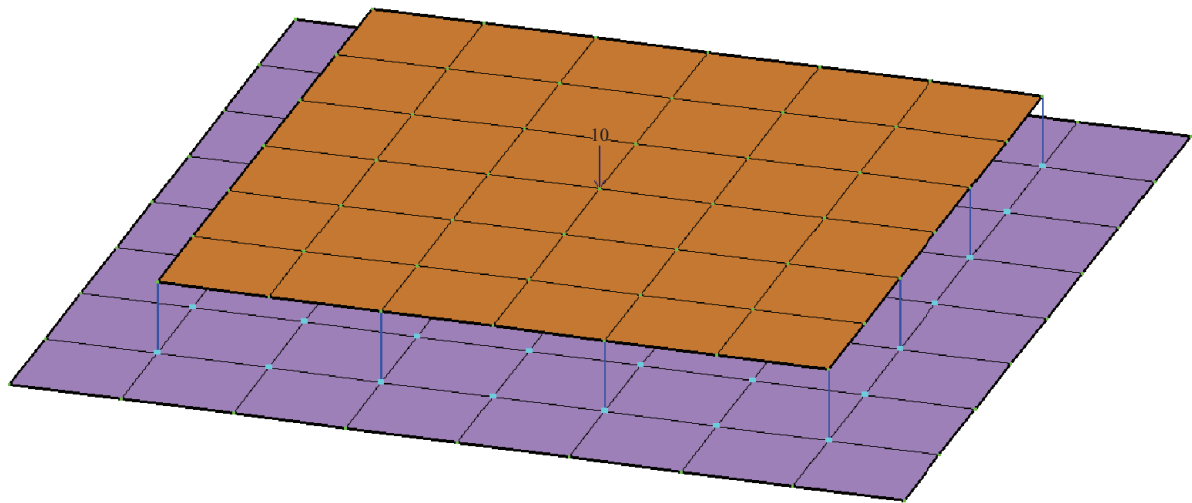


Рис. 2. Выбранный вариант образца

Fig. 2. Selected specimen option

емых к свайному полю, и моделирование возможных процессов консолидации и осадки;

- анализ результатов. Оценка распределения напряжений в грунте и сваях, выявление полей деформаций и перемещений, а также анализ кривых зависимости «нагрузка – осадка» для различных конфигураций свайного поля (рис. 2).

Для подтверждения результатов численного моделирования и их валидации предлагается провести лабораторные испытания. В условиях лаборатории можно выполнить испытания на модельных образцах свайных полей в песчаном грунте с использованием физического моделирования на испытательной установке — машине фундаментной МФ-1.

Этапы экспериментальной программы:

- подготовка песчаного основания. Формирование однородного песчаного слоя в лабораторных условиях;
- монтаж свай. Установка одиночных свай и свайных групп с различными конфигурациями;
- нагружение свай. Проведение статических испытаний с поэтапным увеличением нагрузки и измерение осадок и нагрузок на разных участках схемы;
- сбор и анализ данных. Измерение распределения напряжений в песчаном основании, анализ осадок и определение несущей способности свайного поля.

На базе полученных сведений проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных. Оценка достоверности численной модели выполнена путем сравнения предсказанных и измеренных значений осадок и несущей способности. В случае расхождений будет выполнена корректировка численной модели и уточнение параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате осуществления программы исследований сформулированы следующие выводы и рекомендации:

- определены основные параметры, влияющие на несущую способность свайного поля в песчаном основании;
- разработаны рекомендации по выбору оптимальной конфигурации свайного поля для максимального использования несущей способности [15];
- подтверждена эффективность численного моделирования для прогнозирования работы свайных фундаментов [16–18];
- глубина заложения, диаметр и расстояние между сваями критически влияют на их несущую способность;
- сваи эффективно передают нагрузки в песчаном грунте, который хорошо распределяет напряжения;
- моделирование предсказывает поведение свай, но требует валидации экспериментами;
- следует выбирать оптимальные глубину, диаметр и расстояние между сваями для максимальной эффективности [10, 19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная программа экспериментальных исследований на основе численного моделирования позволит глубже понять механизмы взаимодействия свайного поля с однородным песчаным основанием. Полученные результаты будут полезны для проектировщиков свайных фундаментов и помогут улучшить методы расчета и оптимизировать конструкции свайных полей, что приведет к повышению надежности и эффективности строительных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qi Z., Wei T., Wang C., Wang F., Wang Y., Wang J. *et al.* Numerical Study on Pile Group Effect and Carrying Capacity of Four-Barreled Suction Pile Foundation under V-H-M Combined Loading Conditions // *Processes*. 2022. Vol. 10. P. 2459. DOI: 10.3390/pr10112459
2. Ma B., Cai K., Guo J., Li Z., Hu Z., Chen Q. *et al.* Theoretical Analysis on the Vertical Bearing Characteristics of Pile Foundations Containing Sediment Defects // *Lithosphere*. 2022. Vol. 2021. Issue Special 1. P. 9150985. DOI: 10.2113/2022/9150985
3. Шулятьев О.А. Основные принципы расчета и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий : дис. ... д-ра техн. наук. 2019. 352 с.
4. Sall O.A., Sarr D., Ba M., Tchakou A.E. Numerical Modeling of the Behavior of a Pile Foundation under Axial Load with Ansys // *American Journal of Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 1. Pp. 12–20. DOI: 10.12691/ajmse-7-1-3
5. Tiwari A., Dindorkar N., Kaur S. Bibliometric and Knowledge Network of Global Research on Pile Foundations : a Review of Recent Developments // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 14. P. 11108. DOI: 10.3390/su151411108
6. Sobolev E.S., Berezin E.K., Kechina T.V. Comparative analysis of the dynamic stability of a multistorey building with different base arrangements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012018
7. Нуэдин Л.В., Михайлов В.С. Численный расчет свайного поля с учетом динамических воздействий // *Construction and Geotechnics*. 2023. Т. 14. № 2. С. 22–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.02
8. Chen K. On the Influence of Pile Foundation Settlement of Existing High-Rise Buildings on the Surrounding Buildings // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5560112

9. Боков И.А., Федоровский В.Г. Взаимовлияние свай через грунт: сравнение аналитических и численных оценок // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 26–30.

10. Tan Y.C., Chow C.M., Gue S.S. Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay // Proceedings of the sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005. Pp. 2045–2049.

11. Huded P.M., Dash S.R. Pile foundation in alternate layered liquefiable and non-liquefiable soil deposits subjected to earthquake loading // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2024. Vol. 23. Issue 2. Pp. 359–376. DOI: 10.1007/s11803-024-2241-0

12. Пушкарев И.А., Мусина Э.М., Тратканова А.А. Программные технологии как средство повышения производительности проектирования и оптимизации конструкций в области строительной механики // Construction and Geotechnics. 2024. Т. 15. № 1. С. 17–32. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.02

13. Скибин Г.М., Дереховский В.М. Эффективность использования несущей способности свай при формировании свайного поля плитно-свайного фундамента 21-этажного жилого дома // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14. № 3. С. 24–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.03

14. Espinoza J.P., Tamayo J.P. Numerical simulation and parametric study of pile groups under lateral

loads // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2023. Vol. 45. Issue 7. DOI: 10.1007/s40430-023-04285-9

15. Скибин Г.М., Чутченко С.Г. Оценка эффективности параметров свайных фундаментов на стадии проектирования // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : мат. Науч.-техн. конф. 2022. С. 224–228.

16. Нурждин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD office // Construction and Geotechnics. 2018. Т. 9. № 1. С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01

17. Федоровский В.Г., Бобырь Г.А., Боков И.А., Ильин С.В. Применение метода конечных элементов в геотехнических расчетах по первому предельному состоянию // Вестник НИЦ Строительство. 2019. Т. 20. № 1. С. 102–112.

18. Bull J.W. Numerical analysis and modelling in geomechanics. Boca Raton : CRC Press, 2014. 397 p.

19. Боков И.А. Расчет осадок свайных фундаментов со сваями различной длины : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 148 с.

20. Liu X., Cheng G., Wang B., Lin S. Optimum Design of Pile Foundation by Automatic Grouping Genetic Algorithms // ISRN Civil Engineering. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–16. DOI: 10.5402/2012/678329

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виталий Максимович Дереховский** — аспирант кафедры промышленного, гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ))**; 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; Vitaliyderex@ya.ru;

Геннадий Михайлович Скибин — доктор технических наук, профессор, декан строительного факультета, заведующий кафедрой промышленного, гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ))**; 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; skibingm@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Qi Z., Wei T., Wang C., Wang F., Wang Y., Wang J. et al. Numerical Study on Pile Group Effect and Carrying Capacity of Four-Barreled Suction Pile Foundation under V-H-M Combined Loading Conditions. *Processes*. 2022; 10:2459. DOI: 10.3390/pr10112459

2. Ma B., Cai K., Guo J., Li Z., Hu Z., Chen Q. et al. Theoretical Analysis on the Vertical Bearing Characteristics of Pile Foundations Containing Sediment Defects. *Lithosphere*. 2022; 2021(Special 1):9150985. DOI: 10.2113/2022/9150985

3. Shuliat'ev O.A. *Basic principles of calculation and design of slab and pile foundations for high-rise buildings : doctor's degree dissertation*. 2019; 352. (rus.).

4. Sall O.A., Sarr D., Ba M., Tchakou A.E. Numerical Modeling of the Behavior of a Pile Foundation under Axial Load with Ansys. *American Journal of Materials Science and Engineering*. 2019; 7(1):12-20. DOI: 10.12691/ajmse-7-1-3

5. Tiwari A., Dindorkar N., Kaur S. Bibliometric and Knowledge Network of Global Research on Pile

Foundations : a Review of Recent Developments. *Sustainability*. 2023; 15(14):11108. DOI: 10.3390/su151411108

6. Sobolev E.S., Berezin E.K., Kechina T.V. Comparative analysis of the dynamic stability of a multistorey building with different base arrangements. *Journal of Physics : Conference Series*. 2021; 1928(1):012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012018

7. Nuzhdin L.V., Mikhaylov V.S. Field numerical analysis at the stage of dynamic impacts. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(2):22-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.02

8. Chen K. On the Influence of Pile Foundation Settlement of Existing High-Rise Buildings on the Surrounding Buildings. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5560112

9. Bokov I.A., Fedorovski V.G. Mutual influence of piles through the soil: comparison of analytical and numerical estimates. *Industrial and Civil Construction*. 2016; 10:26-30.

10. Tan Y.C., Chow C.M., Gue S.S. Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay. *Proceedings of the sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005; 2045-2049.

11. Huded P.M., Dash S.R. Pile foundation in alternate layered liquefiable and non-liquefiable soil deposits subjected to earthquake loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024; 23(2):359-376. DOI: 10.1007/s11803-024-2241-0

12. Pushkarev I.A., Musina E.M., Tratkanova A.A. Software technologies as a means of increasing the productivity of design and optimization of structures in the field of structural mechanics. *Construction and*

Geotechnics. 2024; 15(1):17-32. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.02 (rus.).

13. Skibin G.M., Derekhovskii V.M. The effectiveness of using the bearing capacity of piles in the formation of the pile field of the slab pile foundation of a 21-storey apartment building. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(3):24-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.03 (rus.).

14. Espinoza J.P., Tamayo J.P. Numerical simulation and parametric study of pile groups under lateral loads. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023; 45(7). DOI: 10.1007/s40430-023-04285-9

15. Skibin G.M., Chutchenko S.G. Valuation of the effectiveness of the parameters of pile foundations at the design stage. *Soil mechanics in geotechnics and foundation engineering : materials of the scientific and technical conference*. 2022; 224-228. (rus.).

16. Nuzhdin L.V., Mikhaylov V.S. Numerical modelling of pile foundations using SCAD office structural analysis software. *Construction and Geotechnics*. 2018; 9(1):5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01 (rus.).

17. Fedorovskii V.G., Bobyr G.A., Bokov I.A., Il'in S.V. Application of finite element method to the geotechnical ULS analysis. *Bulletin SRC of Construction*. 2019; 20(1):102-112. (rus.).

18. Bull J.W. *Numerical analysis and modelling in geomechanics*. Boca Raton, CRC Press, 2014; 397.

19. Bokov I.A. *Calculation of the settlement of pile foundations with piles of various lengths : abstract of Ph. D. thesis*. Moscow, 2020; 148. (rus.).

20. Liu X., Cheng G., Wang B., Lin S. Optimum Design of Pile Foundation by Automatic Grouping Genetic Algorithms. *ISRN Civil Engineering*. 2012; 2012:1-16. DOI: 10.5402/2012/678329

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S : **Vitalii M. Derekhovskii** — postgraduate student of the Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; Vitaliyderex@ya.ru;

Gennadii M. Skibin — Doctor of Technical Science, Professor, Dean of the Faculty of Civil Engineering, Head of Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; skibingm@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.