

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43

Верификация результатов физического и численного моделирования системы «свая – скальный массив»

Михаил Григорьевич Зерцалов, Дарья Александровна Силантьева

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство объектов повышенного класса ответственности, в частности, требует передачи высоких значений нагрузок на основание, что нередко достигается посредством свайных фундаментов, заглубляемых в скальные массивы. Расчет их несущей способности включает прогнозирование доли нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи и ее основанием, однако сумма этих значений недопустима, поэтому необходимо точно спрогнозировать доли этих значений. Данный прогноз осложняется разнообразием свойств скальных грунтов, масштабным фактором и сложной работой контакта «свая – массив». Существует несколько методов прогнозирования работы сваи, наиболее распространенный — метод конечных элементов. Цель исследования — выполнение верификации результатов физического и численного моделирования, реализуемого в программном комплексе ZSoil, для последующего более глубокого изучения совместной работы сваи и скального массива.

Материалы и методы. Численное моделирование осуществлялось в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ZSoil 3D с учетом фактически полученных характеристик используемых материалов. Для физического моделирования подготовлено три образца, идентичных численной модели, испытанных далее в установке трехосного сжатия.

Результаты. Получены качественные и количественные результаты проведенного моделирования. Качественные результаты — установлено разрушение всего контакта «свая – скальный массив» как на лабораторных образцах, так и в численной модели. Количественно результаты сопоставлялись по графикам зависимости осадки головы сваи от возникающих напряжений.

Выводы. По результатам численного и физического моделирования характер и этапность разрушения системы идентичны, что определено в ходе визуального осмотра образцов и полученных результатов в ПВК. Количественная оценка результатов выполнена в рамках сравнения полученных графиков зависимости осадки головы сваи от напряжений, возникающих в ней. Сопоставление показало максимальное расхождение значений, равное ~ 15 %, что подтверждает применимость ПВК в последующем исследовании системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система «свая – скальный массив», скальный массив, физическое моделирование, численное моделирование, ПВК ZSoil

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству Научно-образовательного центра «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна за возможность проведения физического моделирования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зерцалов М.Г., Силантьева Д.А. Верификация результатов физического и численного моделирования системы «свая – скальный массив» // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 35–43. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43

Автор, ответственный за переписку: Дарья Александровна Силантьева, silantevada@mgsu.ru.

Verification of the results of physical and numerical modelling of the “pile – rock mass” system

Mikhail G. Zertsalov, Daria A. Silantjeva

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The construction of objects of a high class of responsibility, in particular, requires the transfer of high loads to the foundation, which is often achieved through pile foundations buried in rock masses. The calculation of their bearing capacity includes predicting the proportion of the load taken by the side surface of the pile and its base, however, the sum of these values is unacceptable, for this reason it is necessary to accurately predict the proportions of these values. This forecast is complicated by the variety of properties of rocky soils, the scale factor and the complex work of the “pile – rock mass” contact. There are several methods for predicting pile performance, in particular the finite element method. The purpose of this work is to verify the results of physical and numerical modelling implemented in the ZSoil software package (PC), for the subsequent deeper study of the joint work of the pile and the rock mass.

Materials and methods. Numerical modelling was carried out in the ZSoil 3D software-computing complex, taking into account the actually obtained characteristics of the materials used. To carry out physical modelling, three specimens were prepared, identical to the numerical model, and then tested in a triaxial compression installation.

Results. Qualitative and quantitative results of the simulation were obtained. Qualitative results — the destruction of the entire “pile – rock mass” contact was established both on laboratory specimens and in a numerical model. Quantitatively, the results were compared using graphs of the dependence of the settlement of the pile head on the stresses that arise.

Conclusions. Both according to the results of numerical and physical modelling, the nature and stages of destruction of the system are identical to what was established during the visual inspection of the specimens and the results obtained in the PC. A quantitative assessment of the results was carried out by comparing the obtained graphs of the dependence of the settlement of the pile head on the stresses arising in it. The comparison showed a discrepancy in values at the characteristic point corresponding to the complete destruction of the contact, ~ 15 %, which confirms the applicability of the PC in the subsequent study of the system.

KEYWORDS: “pile – rock mass” system, rock mass, physical modelling, numerical modelling, PC ZSoil, pile, bearing capacity, verification

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the management of the Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan for the opportunity to conduct physical modelling.

FOR CITATION: Zertsalov M.G., Silantyeva D.A. Verification of the results of physical and numerical modelling of the “pile – rock mass” system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):35-43. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.35-43 (rus.).

Corresponding author: Daria A. Silantyeva, silantevada@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство «тяжелых» сооружений повышенного класса ответственности, таких как высотные здания или мосты, стало более распространенным. Ключевой задачей проектирования этих объектов является необходимость передачи больших нагрузок на основание, для чего проектировщики отдают предпочтение строительству на прочных скальных массивах, выбирая свайные фундаменты, заглубляемые в коренную породу.

Расчет несущей способности сваи в скальном массиве сводится к прогнозу доли нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи и ее основанием. Существующие исследования доказали возможность передачи до 30 % приходящейся нагрузки на основание даже после полного разрушения боковой поверхности, что говорит о важности учета как несущей способности по боковой поверхности сваи, так и под ее нижним концом¹.

В отличие от проектирования сваи в дисперсных грунтах простая сумма двух значений несущих способностей недопустима² [1]. Это приведет к неоправданному запасу, а значит, и перерасходу материалов и экономической нецелесообразности, поэтому требуется точно знать их процентное соотношение для конкретной системы.

Прогнозирование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия представляет собой сложную задачу из-за большого разнообразия структурных особенностей скальных массивов и, как следствие, создает достаточный разброс значений физических и механических характеристик скальных грунтов, из которых складывается массив. Возникающий по этой причине мас-

штабный фактор [2, 3] объясняет то, что результаты лабораторных и полевых испытаний не дают точных данных, так как охватывают слишком малые объемы породы.

Стоит также отметить влияние сложного характера разрушения контакта «свая – скальный массив» на работу всей системы. Благодаря изменению свойств контакта можно оказать влияние на несущую способность сваи и ее перемещения. Все эти особенности приводят к тому, что в одних и тех же скальных грунтах система может работать по-разному [4, 5].

На сегодняшний день существует не так много исследований, посвященных проектированию свайных фундаментов в скальных массивах, что говорит о необходимости более подробного изучения характера деформирования и разрушения системы «свая – скальный массив», уточнения методик их расчета [6–14].

Наиболее точным подходом к прогнозированию изменения НДС рассматриваемой системы, пользующимся большой популярностью, служит метод конечных элементов (МКЭ) [15–18], однако результаты численного моделирования требуют большого количества входных параметров и часто занижают значения перемещений сваи.

Цель настоящего исследования — выполнение верификации результатов численного моделирования, реализуемого в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ZSoil, и физического моделирования работы системы «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия, для последующего более подробного изучения работы сваи в скальном массиве в соответствующем комплексе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Физическое моделирование

Физическое моделирование реализовывалось на специальном сертифицированном оборудовании производства ООО «НПП Геотек». Испытательная установка включала в себя комплект из кинематического нагрузочного устройства 500 кН, нагнетатель

¹ LRFD Bridge Design Specifications // American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 9th ed. and interim revisions. LRFDUS-9. Washington, DC, 2020. 1904 p.

² СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. 2021.



Рис. 1. Общий вид установки для проведения испытаний на трехосное сжатие

Fig. 1. General view of the installation for testing three-axis compressions

2 МПа, блоки управления, камеру трехосного сжатия типа А и персональный компьютер, оснащенный программным обеспечением (ПО) АСИС 4.1. Проводится испытание по консолидированнонедренированной схеме при гидростатическом давлении, равном 5 % от предела прочности материала на одноосное сжатие ~ 600 кПа при кинематическом режиме нагружения со скоростью 2 МПа/с. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Физическая модель — это цилиндр диаметром 300 мм и высотой 400 мм, в котором бурилась скважина под сваю диаметром 40 мм и высотой 200 мм. Такие размеры принимались для обеспечения отсутствия влияния границ фрагмента на работу сваи.

В публикации [19] было установлено, что влияние на работу системы оказывают не столько фактические значения модулей деформации, сколько их отношение: E_b/E_r . Для упрощения и экономии ресурсов при подготовке образцов в рамках данного исследования принято решение использовать

цементно-песчаные смеси (ЦПС) марок М300 и М100 для материалов сваи и окружающего массива соответственно.

По критерию квазисплошности [2] допускаем, что размеры отдельностей скального массива малы относительно моделируемой конструкции, что позволяет применять методы механики сплошных сред и переходить эмпирически к приведенному значению модуля деформации массива, моделируя его сплошной средой.

Подготовка образцов

Изготовление образцов реализовывалось в следующей технологической последовательности:

1. Подготовка опалубки образца из ПВХ труб диаметром 315 мм: распил трубы на отрезки длиной 450 мм; монтаж металлического диска на дно; обработка внутренних стен и дна смазывающим раствором Литолом (рис. 2).

2. Подготовка цементно-песчаного раствора марки, соответствующей окружающему массиву в текущем испытании.

Цементно-песчаные смеси, используемые при моделировании: смесь цементно-песчаная М100 BROZEX; пескобетон КАЛИБЕР М300. Замешивание раствора в гравитационной бетономешалке в соответствии с инструкцией: замешивание сухой смеси с водой в необходимом соотношении: для М100 — 4,5–5,5 л воды температурой 15–20 °С на 25 кг смеси. Выдержка — 3–5 мин.

3. Заполнение формы получившимся раствором соответствующей массиву марки, вибрирование до требуемой консистенции (рис. 3).

4. Монтаж самодельной конструкции опалубки из трубы ПВХ диаметром 40 мм, длиной 200 мм для моделирования сваи в образце (рис. 4).

5. Выдержка образца — 28 суток. Армирование сваи выполнялось пространственным арматурным каркасом продольно-поперечного типа. Продольная арматура



Рис. 2. Подготовка опалубочной конструкции

Fig. 2. Preparation of the formwork structure

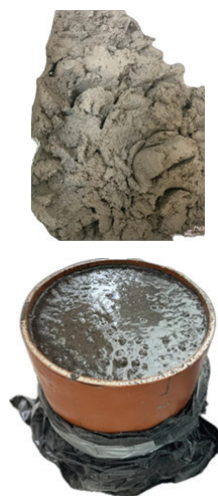


Рис. 3. Подготовка ЦПС, заполнение формы

Fig. 3. Preparing the CSM and filling out the form



Рис. 4. Конструкция опалубки сваи, монтаж
Fig. 4. Pile formwork construction, installation

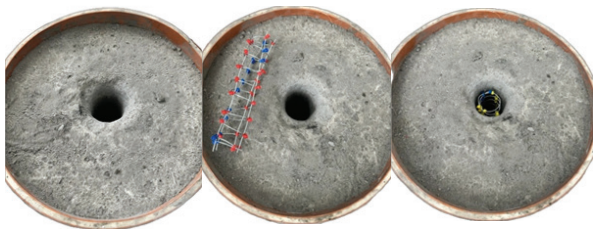


Рис. 5. Демонтаж опалубки сваи с последующим монтажом арматуркаса
Fig. 5. Dismantling of pile formwork followed by reinforcement installation

ра — четыре «арматуры» из оцинкованной проволоки диаметром 12 мм и длиной ≈ 200 мм. Поперечная арматура представлена спиралью из аналогичной проволоки. Диаметр арматуркаса ≈ 35 мм. Последующий демонтаж опалубки и монтаж арматуркаса в скважину (рис. 5).

6. Подготовка цементно-песчаного раствора марки, соответствующей свае в текущем испытании (М100 или М300 соответственно), замешивание раствора



Рис. 6. Общий вид физической модели
Fig. 6. General view of the finished physical model

в гравитационной бетономешалке. Цементно-песчаные смеси, применяемые при моделировании сваи, аналогичны используемым при подготовке материала массива. Для моделирования сваи требуется 0,8 кг смеси марки М100 и 1 кг марки М300, замешивание реализуется аналогично.

7. Далее осуществляется заполнение скважины, вибрирование. Выдержка образца — 28 сут. Общий вид готового образца представлен на рис. 6.

Ход испытания

1. Для реализации корректной передачи нагрузки изготовлен переходный элемент от штока к свае из монолитного алюминия, посредством которого передача реализовывалась точно на голову сваи, не задевая окружающий массив (рис. 7).

2. Образец покрывался силиконовой водонепроницаемой оболочкой и устанавливался на постамент в камеру прибора. Между переходным элементом и образцом прокладывалась прослойка в виде бумажных фильтров соответствующего свае диаметра во избежание возникновения концентраторов напряжений на границе различных по прочности материалов при передаче нагрузки.

3. Выполнялся монтаж камеры с последующим ее заполнением водой.

Всего проведено три испытания с целью обеспечения надежности и объективности результатов лабораторных испытаний.

Численное моделирование

Численное моделирование проводилось в ПБК ZSoil 3D — швейцарском ПО, проверенном временем и широко применяемом в мире. Расчетная схема абсолютно идентична физической модели (рис. 8, 9).

Физико-механические характеристики материалов массива и сваи принимались на основе проведенной серии испытаний в приборе трехосного сжатия для скальных грунтов^{3, 4} (рис. 10).

³ ГОСТ 30416–2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.

⁴ ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.



Рис. 7. Установка образца в камеру прибора
Fig. 7. Installation of the specimen in the device chamber

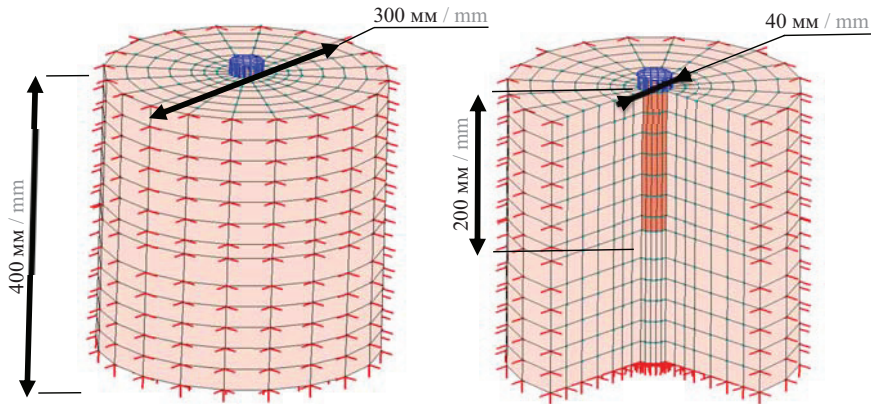


Рис. 8. Расчетная схема в ПК ZSoil 3D

Fig. 8. Geomechanical model in ZSoil 3D

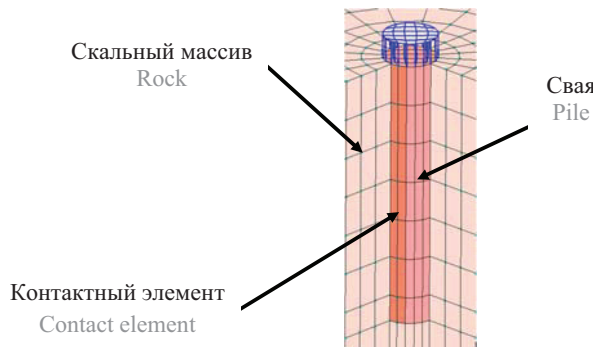


Рис. 9. Фрагмент расчетной схемы: свая, контактный элемент

Fig. 9. Fragment of the calculation scheme: pile, contact element



Рис. 10. Образец в приборе трехосного сжатия до и после испытания

Fig. 10. Specimen in a triaxial compression device before and after testing

Полученные характеристики материалов физической модели

The obtained characteristics of the materials of the physical model

Марки ЦПС Marks CSM	E , МПа / MPa	c , МПа / MPa	φ , град degree
М100 массив M100 rock mass	1625	2,4	41
М300 свая M300 pile	4523	2,6	39

Результирующие значения механических характеристик ЦПС М300 и М100, принятые в численном моделировании, представлены в таблице.

Для моделирования корректной совместной работы системы «свая – скальный массив» также был задан специальный контактный элемент. Определение фактических характеристик контакта затруднительно, поэтому их жесткостные характеристики устанавливались в соответствии с исследованиями [18–20] по следующим формулам:

$$k_n = \frac{E_m}{(1+\nu)R}; \quad (1)$$

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)}. \quad (2)$$

Обжимающие напряжения в модели задавались через граничные условия посредством функций нагружения в Z_Soil: load function. Осевая нагрузка прикладывалась в виде равномерно распределенной, приложенной к голове сваи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование

По результатам выполненных расчетов анализировалось предельное состояние системы на основе разрушения окружающего массива, сваи и контак-

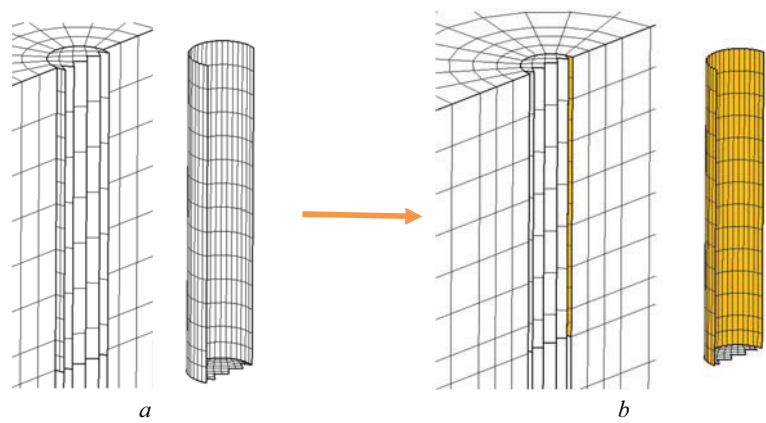


Рис. 11. Результаты расчетов: фрагменты (a) — состояние системы при $Q = 1450$ кПа; b — полное разрушение контакта при $Q = 1540$ кПа

Fig. 11. Calculation results: fragments (a) — system state at $Q = 1,450$ kPa; b — complete contact failure at $Q = 1,540$ kPa



Рис. 12. Фрагмент образца после испытания. Разрушение области контакта «свая – массив»

Fig. 12. A fragment of the specimen after testing. Failure of the “pile – rock mass” contact area

тного элемента, а также соответствующие вертикальные осевые перемещения сваи.

По результатам расчета установлено почти мгновенное разрушение всего контактного элемента «свая –

массив» при нагрузке $Q = 1,54$ МПа (оранжевые элементы на рис. 11).

Далее был зафиксирован резкий рост осадки сваи, что соответствует потере несущей способности по боковой поверхности.

Физическое моделирование

Разрушение всех образцов происходит схожим образом, что и по результатам численного моделирования: на образцах зафиксировано полное разрушение контакта «свая – массив» (рис. 12), что качественно подтверждает результаты численного моделирования.

Количественно результаты верифицировались по графикам зависимости напряжений, возникающих на голове сваи от прикладываемой нагрузки, от перемещений головы сваи, построенным в одной системе координат (рис. 13).

Результирующие графики численного моделирования и физического (осредненный) приведены на рис. 13. На графике результатов численного моделирования участок AB соответствует полному разрушению контакта, почти мгновенному с увеличением нагрузки. Аналогично участок A'B' на графике

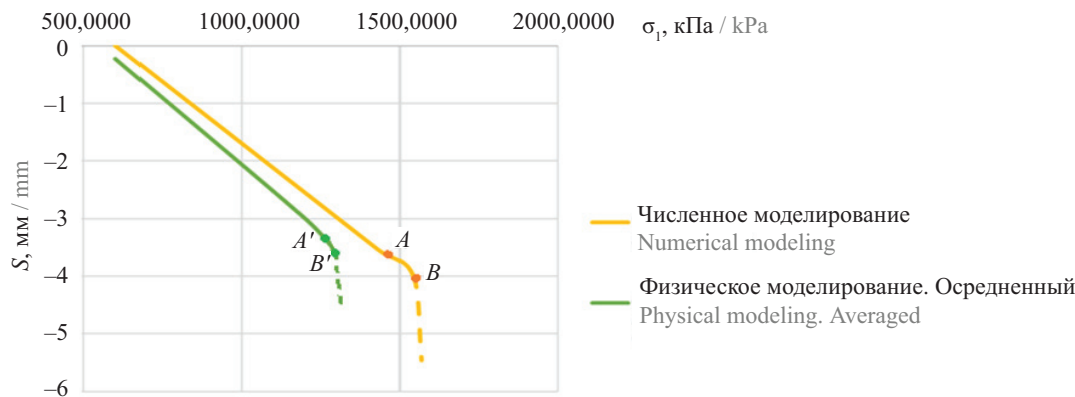


Рис. 13. Графики «осадка – нагрузка» физического (осредненный) и численного моделирования

Fig. 13. Settlement – load graphs of physical (averaged) and numerical modelling

результатов физического моделирования — не линейен и свидетельствует о разрушении контакта «свая – массив». Далее происходит срыв сваи, о чем говорит мгновенный прирост ее осадки. Точки B , B' можно считать точкой потери несущей способности сваи по боковой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования подготовлена геомеханическая модель в ПБК ZSoil 3D, описывающая систему «свая – скальный массив» в условиях осевого сжатия, материалы и геометрические характеристики которой были приняты на основании изученной литературы и данных практического опыта. Для верификации результатов, полученных численным методом, создана аналоговая физиче-

ская модель, проведено три испытания для повышения достоверности результатов.

Сопоставление результатов показало, что характер деформирования и разрушения системы «свая – скальный массив», установленный по результатам численного моделирования, соответствует проведенным испытаниям физического моделирования. На рис. 13 представлены графики зависимости перемещений головы сваи от напряжений, возникающих в ней, по результатам численного и физического моделирования максимальное расхождение результатов составило ~ 15 %, что находится в пределах инженерной точности и подтверждает достоверность полученных результатов. По результатам верификации была обоснована дальнейшая применимость программно-вычислительного комплекса с целью более подробного исследования совместной работы буронабивной сваи и скального массива в условиях осевого сжатия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В., Брыксина А.А. Оценка несущей способности сваи в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, на действие вертикальной нагрузки // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 3 (34). С. 7–25. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25. EDN UXPEZG.

2. Зерцалов М.Г. Геомеханика. Введение в механику скальных грунтов. М. : Издательство АСВ, 2014. 352 с. EDN TBDUEH.

3. Hoek E., Kaiser P.K. Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, 1995.

4. Zhang L. Drilled Shafts in Rock. Analysis and Design. London : CRC Press, 2004. 396 p. DOI: 10.1201/9780203024423

5. Zhang L. Analysis and Design of Axially Loaded Drilled Shafts Socketed in Rock // Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering at MIT. 1997. 167 p.

6. Ильинов М.Д., Коришунов В.А., Поспехов Г.Б., Шоков А.Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. 2023. № 5. С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02. EDN KWXDVA.

7. Разводовский Д.Е., Скориков А.В. Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 3 (26). С. 74–85. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85. EDN KZYBMU.

8. Кузнецов Н.Н. Исследование прочностных свойств и удельной энергии деформирования горных

пород в условиях трехосного сжатия // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 140–145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145. EDN SOYEYH.

9. Шарафутдинов Р.Ф., Ботанин Д.П. Исследование сопротивления свай по боковой поверхности в скальных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 4. С. 9–16. EDN GAMNLY.

10. Шарафутдинов Р.Ф., Шулятьев О.А., Исаев О.Н., Закатов Д.С. Исследования взаимодействия буронабивных свай со скальными грунтами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 5. С. 11–16. EDN SQVSIM.

11. Шулятьев О.А., Шарафутдинов Р.Ф., Шулятьев С.О. Обобщение результатов испытаний буронабивных свай в скальных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 1. С. 2–7. EDN PIMBDH.

12. Ощепкова И.А., Сычкина Е.Н. Проблемы лабораторного определения механических свойств полускальных нижнепермских грунтов г. Перми // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 59–63. EDN OJHLTT.

13. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods : a review // Underground Space. 2017. Vol. 2. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.03.003

14. Ye X., Tang C., Phoon K.-K., Chen J. Development and use of axial load test databases for analysis and design of soft rock sockets // Canadian Geotechnical Journal. 2025. Vol. 62. Pp. 1–21. DOI: 10.1139/cgj-2024-0155

15. Barton N. A model study of rock-joint deformation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Vol. 9. Issue 5. Pp. 579–582. DOI: 10.1016/0148-9062(72)90010-1

16. Karzulovic A., Read J. Rock mass model // Guidelines for Open Pit Slope Design. 2009. Pp. 83–139. DOI: 10.1071/9780643101104.ch05

17. Brown D.A., Turner J.P., Castelli R.J., Loeher E.J. Drilled Shafts Construction Procedures and Design Methods: NHI Course No. 132014: Geotechnical Engineering Circular No. 10. Washington, 2010. 970 p.

18. Зерцалов М.Г., Никушкин М.В. Мировой опыт в проектировании свай в скальных грунтах // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 120. EDN OWEBRV.

19. Rowe R.K., Armitage H.H. A design method for drilled piers in soft rock // Canadian Geotechnical Journal. 1987. Vol. 24. Issue 1. Pp. 126–142. DOI: 10.1139/t87-011

20. Axtell P. Combined Side and Base Resistance in Rock-Socketed Drilled Shafts — a State of the Art Consensus // DFI Journal The Journal of the Deep Foundations Institute. 2022. Vol. 16. Issue 2. DOI: 10.37308/dfjnl.20221115.267

Поступила в редакцию 19 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Григорьевич Зерцалов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3862-4166, Scopus: 6602162286, ORCID: 0000-0003-2841-1023; mzersalov@yandex.ru;

Дарья Александровна Силантьева — аспирант, преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8733-3463, ORCID: 0009-0009-5741-5526; silantevada@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Зерцалов М.Г. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в анализе результатов и формулировке выводов.

Силантьева Д.А. — проведение физического и численного моделирования, подготовка текста, анализ результатов и формулировка выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Bryksina A.A. Evaluation of the pile bearing capacity in rock interbedded by cohesion soils under vertical loading. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022; 3(34):7-25. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25. EDN UXPEZG. (rus.).

2. Zertsalov M.G. Geomechanics. *Introduction to the mechanics of rocky soils*. Moscow, ASV, 2014; 352. EDN TBDUEH. (rus.).

3. Hoek E., Kaiser P.K. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, 1995.

4. Zhang L. Drilled Shafts in Rock. *Analysis and Design*. London, CRC Press, 2004; 396. DOI: 10.1201/9780203024423

5. Zhang L. Analysis and Design of Axially Loaded Drilled Shafts Socketed in Rock. *Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering at MIT*. 1997; 167.

6. Ilinov M.D., Korshunov V.A., Posphekhov G.B., Shokov A.N. Integrated experimental research of mechanical properties of rocks: problems and solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2023; 5:11-18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02. EDN KWXDVA. (rus.).

7. Razvodovsky D., Skorikov A. Problems and possible ways of development of pile design building codes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020; 3(26):74-85. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85. EDN KZYBMU. (rus.).

8. Kuznetsov N.N. Investigation of strength properties and specific strain energy of rocks under triaxial compression. *Russian Mining Industry*. 2025; 2:140-145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145. EDN SOYEYH. (rus.).

9. Sharafutdinov R.F., Botanin D.P. Study of the side resistance of bored piles in rock. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024; 4:9-16. EDN GAMNLY. (rus.).

10. Sharafutdinov R.F., Shulyat'ev O. A., Isaev O.N., Zakatov D.S. Studies of interaction of drilled piles with

rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 5:11-16. EDN SQVSIM. (rus.).

11. Shulyat'ev O.A., Sharafutdinov R.F., Shulyat'ev S.O. Generalization of the test results of bored piles in rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 1:2-7. EDN PIMBDH. (rus.).

12. Oshchepkova I.A., Sychkina E.N. Problems of laboratory determination of the mechanical properties of semi-rocky Lower Permian soils in the city of Perm. *Bulletin of PGU. Construction and Architecture*. 2011; 1:59-63. EDN OJHLTT. (rus.).

13. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods : a review. *Underground Space*. 2017; 2(1):1-15. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.03.003

14. Ye X., Tang C., Phoon K.-K., Chen J. Development and use of axial load test databases for analysis and design of soft rock sockets. *Canadian Geotechnical Journal*. 2025; 62:1-21. DOI: 10.1139/cgj-2024-0155

15. Barton N. A model study of rock-joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and*

Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972; 9(5):579-582. DOI: 10.1016/0148-9062(72)90010-1

16. Karzulovic A., Read J. Rock mass model. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. 2009; 83-139. DOI: 10.1071/9780643101104.ch05

17. Brown D.A., Turner J.P., Castelli R.J., Loehr E.J. *Drilled Shafts Construction Procedures and Design Methods: NHI Course No. 132014: Geotechnical Engineering Circular No. 10*. Washington, 2010; 970.

18. Zertalov M.G., Nikiskin M.V. International experience in designing piles in rock. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 5:120. EDN OWEBRV. (rus.).

19. Rowe R.K., Armitage H.H. A design method for drilled piers in soft rock. *Canadian Geotechnical Journal*. 1987; 24(1):126-142. DOI: 10.1139/t87-011

20. Axtell P. Combined Side and Base Resistance in Rock-Socketed Drilled Shafts — a State of the Art Consensus. *DFI Journal The Journal of the Deep Foundations Institute*. 2022; 16(2). DOI: 10.37308/dfi-jnl.20221115.267

Received October 19, 2025.

Adopted in revised form on November 7, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

B I O N O T E S : **Mikhail G. Zertsalov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3862-4166, Scopus: 6602162286, ORCID: 0000-0003-2841-1023; mzertsalov@yandex.ru;

Daria A. Silantyeva — postgraduate student, lecturer of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8733-3463, ORCID: 0009-0009-5741-5526; silantevada@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail G. Zertsalov — scientific leadership, research concept, development of methodology, participation in the analysis of results and formulation of conclusions.

Daria A. Silantyeva — carrying out physical and numerical modeling, preparing text, analyzing results and formulating conclusions.

The authors declare no conflict of interest.