

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №3, Том 8 / 2021, N 3, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-3-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS321.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS321 (<https://doi.org/10.15862/05SATS321>)

Особенности взаимодействия одиночной буронабивной сваи с окружающим скальным массивом при действии горизонтальной нагрузки

Хохлов И.Н., Зерцалов М.Г.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Хохлов Иван Николаевич, e-mail: inh.2017@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности взаимодействия буровой сваи со скальным массивом при действии горизонтальных нагрузок, а также механизм потери сваей несущей способности. В статье представлены результаты численного моделирования и разработанный на их основе метод расчёта свай в скальных грунтах при действии горизонтальной нагрузки в условиях пространственной упруго-пластической задачи, учитывающий работу контакта сваи и скального массива. Исследование взаимодействия одиночной буровой сваи и окружающего скального массива при действии горизонтальных и моментных нагрузок выполнялось на основании анализа численных моделей свай и окружающего скального массива в пространственной постановке с использованием метода конечных элементов. Использование методов регрессионного анализа позволило на основе полученных результатов численного моделирования получить параметрические уравнения, связывающие исследуемые функции отклика (несущую способность и горизонтальное перемещение сваи)

от заранее выбранных независимых факторов, отражающих геомеханические свойства массива и конструктивные особенности свай. Разработанный метод расчета позволяет на предварительной стадии проектирования оценить величину горизонтальных перемещений сваи, а также ее несущую способность. Также, используя предлагаемую методику, возможно построить график испытания свай под нагрузкой, что может быть использовано при подготовке натуральных исследований на стадии проектирования. Актуальность темы обусловлена тем, что в современной строительной практике буровые сваи применяются для передачи на основание значительных по величине нагрузок на скальное основание от сооружений различного назначения, в том числе и транспортных (фундаменты опор мостов и эстакад и пр.).

Ключевые слова: буровая свая; массив; скальный грунт; геомеханическое моделирование; регрессионный анализ; численные методы расчета; горизонтальные нагрузки

Interaction peculiarities of a single unit bored pile with the surrounding rock mass under the horizontal load effect

Ivan N. Khokhlov, Mikhail G. Zertsalov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Corresponding author: Ivan N. Khokhlov, e-mail: inh.2017@yandex.ru

Abstract. Interaction peculiarities of a single unit bored pile with the surrounding rock mass under the horizontal load effect, as well as loss mechanism of piles bearing capacity, are considered. The article presents the numerical modeling results and a method developed on their basis for calculating piles in rocky soils under the horizontal load effect under the spatial elastic-plastic problem conditions, with the account of the contact behavior between the pile and the rock mass. The study of the single unit bored pile interaction and the surrounding rock mass under the horizontal and moment loads effect was carried out based on the numerical models' analysis of the piles and the surrounding rock mass in a spatial setting using the finite element method. The use of regression analysis methods made it possible, to obtain parametric equations, based on the numerical modeling obtained results, that connected the studied response functions (bearing capacity and horizontal displacement of the

pile) from preselected independent factors reflecting the geomechanical properties of the body and the design piles peculiarities. The developed calculation method allows at the preliminary design stage to estimate the horizontal pile displacement value, as well as its bearing capacity. Also, using the proposed technique, it is possible to make a piles load test schedule, which can be used in the field observation preparation at the design stage. The relevance of the topic is due to the fact that in modern construction practice, bored piles are used to transfer to the foundation significant loads, on the rock foundation from structures for various purposes, including transport (bridges and overpasses piers' foundations, etc.).

Keywords: bored pile; rock mass; rocky soil; geomechanical modeling; regression analysis; numerical calculation methods; horizontal loads

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Как отмечается в работах [1; 2], в настоящее время буронабивные сваи широко используются во всём мире как фундаменты сооружений, передающих значительные нагрузки на скальные основания зданий и сооружений различного назначения: транспортного (фундаменты опор мостов и эстакад), гражданского (фундаменты многоэтажных зданий — башен), сооружений энергетического назначения (фундаменты сооружений ГЭС и ТЭС), портовых сооружений (причалы и доки) и др., о чем свидетельствует растущий объем сооружения свай в скальных грунтах.

В настоящее время разработаны методы расчёта, как отечественных, так и зарубежных авторов, позволяющие исследовать взаимодействие свай и окружающего грунтового и скального массива при действии горизонтальной нагрузки, которые можно классифицировать по используемой модели взаимодействия свай с окружающим грунтовым массивом:

- методы, базирующиеся на использовании теории предельного равновесия грунта, которые применяются, в основном, при расчете коротких жестких свай и описанные в работах [3–5];
- методы, использующие описание взаимодействия свай с линейно-упругим основанием (модель Винклеровского основания) [6–8];
- методы, рассматривающие грунт в виде упругого полупространства [9; 10];
- эмпирические и инженерные методы расчета [11].

Постановка задачи

Research objective

Взаимодействие одиночной сваи и массива скального грунта при горизонтальной нагрузке имеет сложный характер, зависящий от множества факторов. Результаты анализа литературных источников, а также данных лабораторных и натурных исследований поведения свай в скальных грунтах позволили установить факторы, оказывающие наибольшее влияние на взаимодействие свай и окружающего скального массива [12; 13]:

- степень трещиноватости скального массива, в основном определяющая его прочностные и деформационные характеристики;

- соотношение жесткостей массива и материала сваи;
- соотношение длины и диаметра сваи L_p/D_p ;
- свойства контакта сваи со скальным массивом.

Учитывая наличие множества вышеупомянутых факторов, исследование их влияния на характер взаимодействия сваи и скального массива, наиболее рационально вести способом, впервые предложенным для исследования инженерных сооружений в [14]. Способ основан на совместном использовании метода конечных элементов (МКЭ) и метода планирования эксперимента [15]. Подобный подход даёт возможность построить матрицу необходимых численных экспериментов, минимизируя при этом их количество. Дальнейшая обработка результатов численного моделирования с помощью метода планирования эксперимента позволила представить решения в виде уравнений регрессии, которые невозможно получить аналитическим путём или путём физического моделирования. Практика показала, что совместное использование МКЭ и метода планирования эксперимента существенно расширяет исследовательские возможности и позволяет решать различные инженерные задачи [16].

Исследования проводилось на численной модели (рис. 1) с размерами: расстояние от сваи до боковой границы расчётного фрагмента — $11D_p$ (где D_p — диаметр сваи) и от конца сваи до нижней границы фрагмента — $0,7L_p$ (где L_p — длина сваи). Для моделирования контакта сваи со скальным массивом в конечно-элементной сетке использовался специальный контактный элемент [17]. Механические характеристики элементов, моделирующих поведение сваи и скального массива, назначались аналогично характеристикам, принятым при исследовании вертикально нагруженных свай [18].

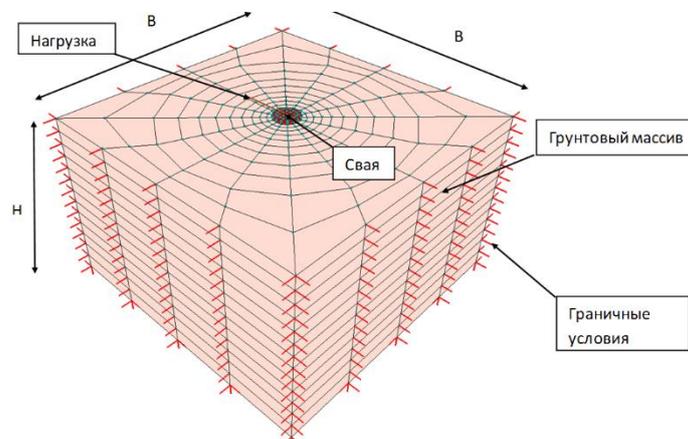


Рисунок 1. Пространственная модель взаимодействия свай с массивом скального грунта (разработано авторами)

Figure 1. A spatial model of the piles' interaction with a rock mass (developed by the authors)

Заранее были определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние системы «свая — скальный массив»: RQD — показатель качества скального массива, характеризующий степень его трещиноватости; E_c/E_r — отношение модуля упругости бетона к модулю упругости скальной отдельности и L/D — отношение длины сваи к её диаметру. В ходе исследования выполнялся анализ работы одиночной сваи под нагрузкой на численных моделях. Геометрические параметры численных моделей и характеристики элементов, моделирующих сваю и окружающий скальный массив, определялись для каждой задачи в соответствии с заранее составленной матрицей планирования эксперимента, в которой устанавливались пределы варьирования факторов. Методика определения факторных зависимостей в виде уравнений регрессии и построения с их помощью кривых деформирования свай при действии горизонтальной нагрузки, была аналогичной разработанной автором методике¹, а также описанной в [18–20]. Влияние свойств контакта сваи и окружающего массива изучалось отдельно, так как его деформационные и прочностные характеристики зависят не только от соответствующих характеристик сваи и окружающего массива, но и от шероховатости стенок буровой скважины, которая определяется как структурой скального грунта, так и технологическими особенностями устройства сваи, о чем достаточно подробно изложено в [21; 25].

Несущая способность и деформации сваи

Pile bearing capacity and deformation

Несущая способность сваи и ее перемещения зависят от схемы деформаций в скальном массиве, которые можно условно разделить на два типа — «короткие жёсткие» (рис. 2а), «короткие гибкие» (рис. 2б) и «длинные гибкие» (рис. 2в). Указанные схемы деформаций аналогичны схемам деформаций свай в нескальных грунтах, подробно изученных и описанных автором¹, а также приведенных в [8; 19].

Действие горизонтальной силы, приложенной к оголовку «короткой жёсткой» сваи (рис. 2а), вызывает ее горизонтальное перемещение и поворот в массиве вокруг точки с нулевыми перемещениями. В результате происходит отрыв («отлипание») сваи от стенок скважины со стороны приложения нагрузки и сжатие массива перед свайей.

¹ Хохлов И.Н. Исследование работы свай в скальных грунтах на действие горизонтальной нагрузки: дис. ... к-та тех. наук / И.Н. Хохлов // — Москва, 2016.

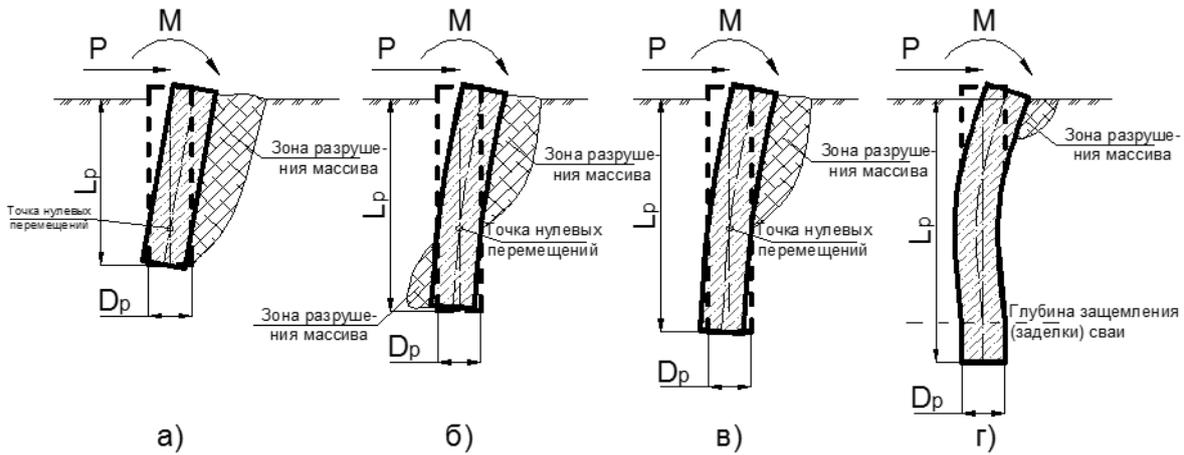


Рисунок 2. Схемы взаимодействия свай и скального массива при горизонтальной нагрузке (разработано авторами)

Figure 2. Piles and rock mass interaction schemes of under horizontal load (developed by the authors)

В начальной стадии её сопротивление горизонтальному смещению определяется в основном касательными напряжениями, возникающими по контакту боковой поверхности сваи с окружающим массивом. При возрастании касательных напряжений происходит разрушение контакта и прилегающих к нему областей скального массива, вызванное появлением и увеличением растягивающих напряжений (рис. 3).

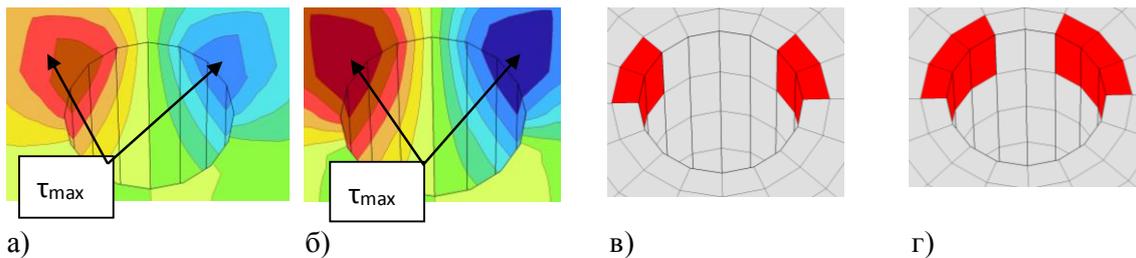


Рисунок 3. Начальная фаза разрушения скального массива и его контакта с «короткой жёсткой» свайей (разработано авторами)

Figure 3. The initial phase of the rock mass destruction and its contact with the "short rigid" pile (developed by the authors)

Одновременно происходит рост горизонтальных сжимающих напряжений в массиве перед свайей: формирующаяся в нём зона сжимающих напряжений, распространяется в горизонтальном направлении и вглубь массива (рис. 4). При этом, несущая способность «короткой жёсткой» сваи может быть ограничена следующими условиями: прочностью скального массива на сжатие, прочностью ствола сваи на изгиб, а также допустимыми величинами горизонтального перемещения головы сваи. Указанный механизм взаимодействия «короткой жёсткой» сваи со скальным массивом подтверждается многими

исследованиями, подробнее с результатами которых возможно ознакомиться в [1; 2].

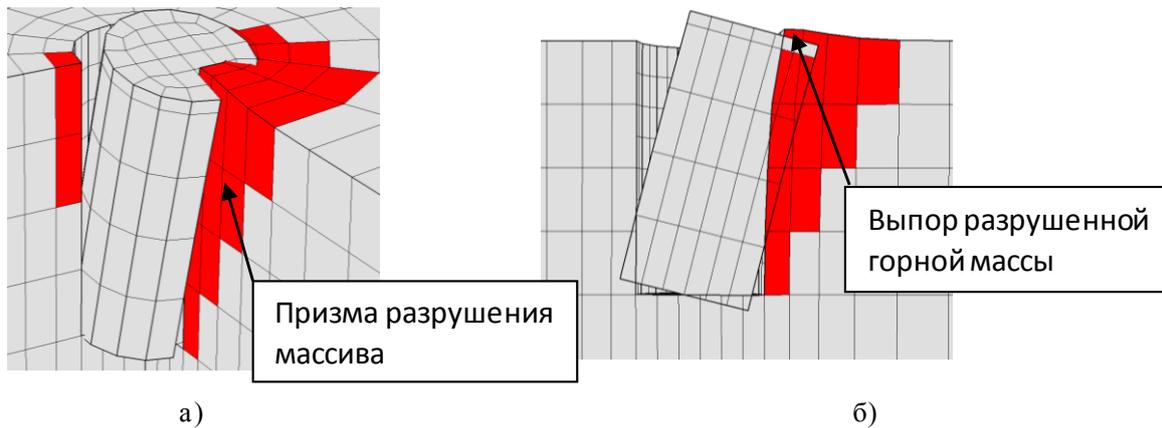


Рисунок 4. Образование призмы разрушения массива перед «короткой жёсткой» свайей (а) выпор грунта перед свайей (б) при действии горизонтальной нагрузки (разработано авторами)

Figure 4. Fracture prism formation in front of the “short rigid” pile (a) pile heave in front of the pile (b) under the horizontal load effect (developed by the authors)

При увеличении длины свай схема их взаимодействия с окружающим массивом меняется от деформации с поворотом к схеме деформации поворота с изгибом, что характерно для «коротких гибких свай» (рис. 2б). Из-за ограничения возможности поворота нижней части сваи увеличиваются деформации изгиба, а вокруг нижнего конца сваи в окружающем массиве начинается формирование области объёмного сжатия. По мере достижения сжимающими напряжениями предельных значений со стороны приложения нагрузки образуется вторая зона разрушения (рис. 5). Несущая способность «коротких гибких» свай определяется прочностью ствола сваи на изгиб и предельными горизонтальными перемещениями головы сваи.

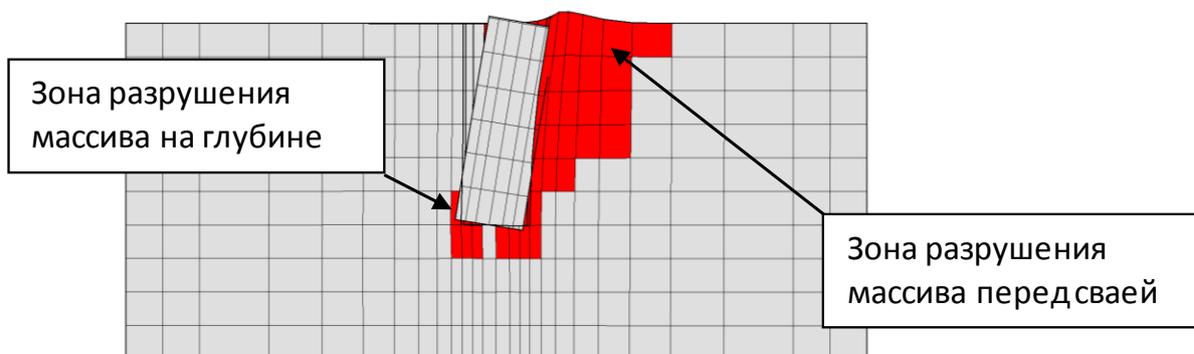


Рисунок 5. Образование двух зон разрушения массива (разработано авторами)

Figure 5. Formation of two body destruction zones (developed by the authors)

Несущая способность свай «длинных гибких» свай (рис. 2г) определяется прочностью ствола сваи и значениями предельно

допустимых деформаций. Кроме того, при заглублении таких свай в массив ниже определённого уровня («уровень заделки»²), в сечениях свай ниже этого уровня горизонтальные смещения и повороты отсутствуют (рис. 6). «Уровень заделки» зависит от диаметра и длины свай, а также от прочностных и жесткостных характеристик окружающего скального массива.

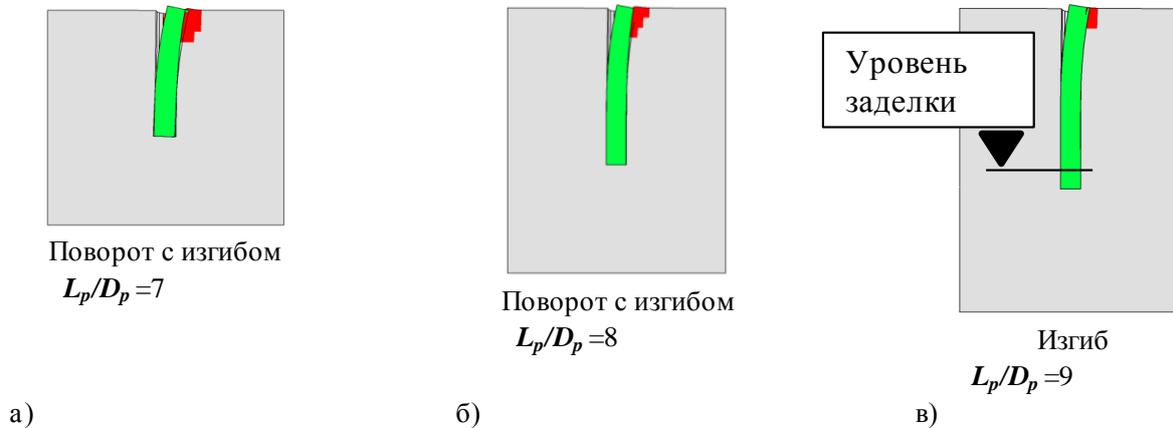


Рисунок 6. Горизонтальные перемещения сечений оголовка свай диаметром 1 м при различных соотношениях L_p/D_p (разработано авторами)

Figure 6. Pile head cutaway view horizontal displacements with a 1 m diameter at various ratios L_p/D_p (developed by the authors)

Принимая во внимание указанные выше особенности взаимодействия свай и окружающего массива скального грунта, которые определяются схемой деформаций свай, необходимо установить в массиве две границы: *границу области*, в пределах которой сваи можно рассматривать как «короткие», а также границу, определяющую «уровень заделки» «длинных гибких» свай.

На основании численных расчетов¹ можно сделать вывод, что отношение L_p/D_p однозначно определяет границы работы «коротких жестких» и «коротких гибких» свай, а также уровень «заделки» свай в каждом конкретном массиве, характеризуемом показателем трещиноватости RQD и модулем упругости скальной отдельности E_r . Путём варьирования двух независимых факторов — RQD и E_b/E_r , используя численное моделирование МКЭ, была получена зависимость, в виде уравнения регрессии (1), определяющая область работы «коротких жестких» свай:

² «Уровень заделки» свай — в зарубежной практике [1; 2] — “fixity”, сечение в заделанном конце свай, ниже которого перемещения и внутренние усилия в стволе свай имеют нулевые значения. Это позволяет избежать излишнего заглубления свай в скальный грунт, а также в расчётных схемах свайных фундаментов заменять реальную сваю эквивалентно работающей стойкой с жёстко заделанным концом в «уровне заделки».

$$\frac{L_p}{D_p} = 2,2 + 0,75 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) - 0,35 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 0,1 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \quad (1)$$

где RQD — показатель трещиноватости массива и E_b/E_r — отношение начального модуля упругости бетона и модуля упругости скальной отдельности.

При этом анализ взаимодействия «коротких» и «длинных» свай со скальным массивом показали, что при $L_p/D_p \geq 3$, во всех рассмотренных случаях, несущая способность свай определяется только предельными внутренними усилиями, возникающими при изгибе её ствола.

Для определения границы заделки («уровня заделки») свай в скальный массив, как и в предыдущем случае, использовались МКЭ и факторный анализ, что позволило получить математическую зависимость (2) «уровня заделки» свай от варьируемых независимых факторов (E_b/E_r и RQD).

$$\frac{L_p}{D_p} = 6,75 + 1,25 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) - 0,75 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) - 0,25 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \quad (2)$$

где RQD — показатель трещиноватости массива и E_b/E_r — отношение начального модуля упругости бетона и модуля упругости скальной отдельности.

При действии на оголовки свай изгибающего момента характер взаимодействия со скальным грунтом аналогичен случаю ее нагружения горизонтально направленной сосредоточенной силой. Размеры областей разрушения массива при увеличении заделки свай в скальный грунт отличаются незначительно, а границы, определяющие характер работы свай в массиве, практически не изменяются, что позволяет использовать для их определения приведённые выше уравнения (1) и (2).

Влияние контакта

Effect of contact

Как уже указывалось, для изучения влияния на работу свай контакта «свая — массив» проводились отдельные исследования. Рассмотрению этого вопроса посвящён ряд работ [21–23]. Следует отметить, что во всех указанных работах изучалось исключительно влияние разрушения контакта «свая — массив» на несущую способность свай по её боковой поверхности. Сопротивление контакта сдвигу изучалось, с учётом дилатансии контакта, зависящей от степени шероховатости стенок

скважины. В то же время, результаты натурных испытаний [24] свидетельствуют также о значительном влиянии жесткостных свойств контакта «свая — массив» на её деформирование. Литературных источников, посвящённых изучению механизма этого влияния, авторам статьи найти не удалось. Исключение составила лишь одна работа [10], в которой представлено аналитическое решение задачи по определению, как несущей способности, так и осадок вертикально нагруженной сваи в грунте при наличии контактного слоя. Деформирование контактного слоя соответствовало модели Кулона-Мора, для задания упругих характеристик контакта введено понятие жесткости контакта K . Вместе с тем, специального исследования влияния упругих характеристик контактного слоя на поведение вертикально нагруженных свай в указанной работе не проводилось. Вопрос влияния контакта сваи со скальным грунтом на её деформирование при действии вертикальной нагрузки рассматривался в работах [20; 21; 25]. С использованием результатов численного моделирования и факторного анализа были построены графики зависимости осадок сваи от деформационных характеристик, как контакта, так и скального массива. Такая же методика использовалась и в рассматриваемом случае — при изучении влияния контакта сваи со скальным грунтом на горизонтально нагруженные сваи.

Поскольку в работе [25] показано, что нормальная касательная жёсткость контакта сваи со скальным грунтом K_n остаётся постоянной и равной коэффициенту упругого отпора скального массива, исследовалось только влияние касательной жёсткости контакта K_s . Перемещения свай определялись при различных значениях $K_s = 50\ 000, 100\ 000, 250\ 000, 1\ 000\ 000$ кН/м³. Была проведена серия расчетов в скальных массивах с различными модулями деформации.

В качестве примера на рисунке 7 приведены графики горизонтальных смещений оголовка свай при действии горизонтальной нагрузки в скальных массивах, характеризуемых модулями деформации: (а) $E_m = 15\ 000$ Мпа и (б) $E_m = 200$ Мпа.

Приведенные графики подтверждают, что влияние касательной жесткости контакта сваи с массивом на её горизонтальные перемещения при действии горизонтальной нагрузки в обоих случаях весьма существенно. С возрастанием величины K_s горизонтальные перемещения оголовка уменьшаются в 1,5–2,0 раза. В случаях, если касательная жёсткость контакта соизмерима с жёсткостью массива, перемещения сваи определяются только жёсткостью массива¹. Это хорошо согласуется с результатами исследования влияния величины K_s на осадки вертикально нагруженной сваи [25]. Следует также отметить (рис. 7), что изменение касательной жёсткости контакта K_s влияет только на деформирование сваи.

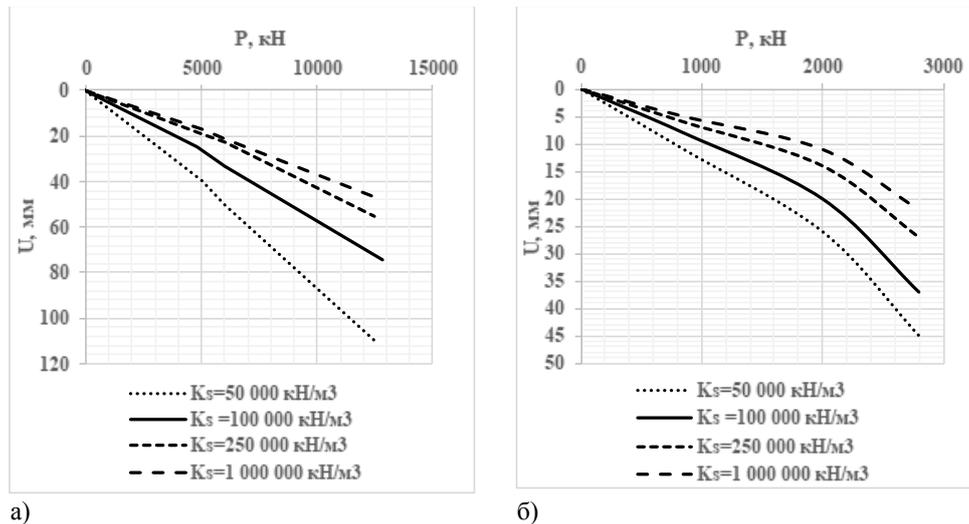


Рисунок 7. Графики горизонтальных отклонений свай в массиве
(а) $E_m = 15000 \text{ МПа}$ и массиве (б) $E_m = 200 \text{ МПа}$ (разработано авторами)

Figure 7. Graphs of piles horizontal deflections in the body
(a) $E_m = 15000 \text{ MPa}$ and in the body (b) $E_m = 200 \text{ MPa}$ (developed by the authors)

Нагрузка на сваю при начале разрушения её контакта с массивом и нагрузка, соответствующая потере сваей несущей способности, с изменением касательной жёсткости контакта практически не меняются и зависят только от его прочностных характеристик.

Применение методики

Methodology application

Результаты расчетов, выполненных по предлагаемой методике, сравнивались с результатами натурных испытаний. В качестве примера использовались испытания свай на горизонтальную нагрузку в массиве средней прочности³. Согласно имеющимся данным натурных испытаний, приведенных в указанной работе, были построены кривые перемещений сваи № 1 (рис. 8) и сваи № 2 (рис. 9).

Анализируя приведенные выше графики сравнения натурных и расчетных значений перемещений и нагрузок, можно сказать, что сходимость с натурными данными была зафиксирована в случае сваи № 2 с расчетными кривыми, описывающими графики испытаний свай, для которых касательная жесткость контакта была принята в диапазоне от $K_s = 50\,000 \text{ кН/м}^3$ до $K_s = 100\,000 \text{ кН/м}^3$.

³ Nixon J.B. Verification of the weathered rock model for P-y curves // A thesis submitted to the Graduate faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science, Raleigh, North Carolina, 2002.

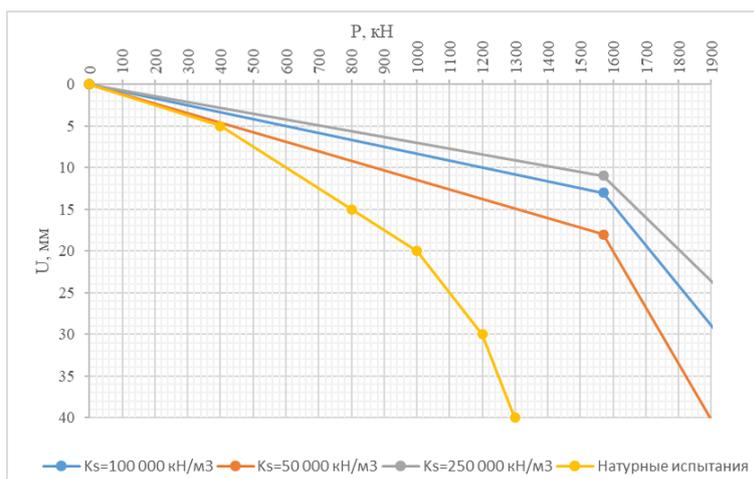


Рисунок 8. Кривые перемещений свай (свая № 1) (разработано авторами)

Figure 8. Piles displacement curves (pile # 1) (developed by the authors)

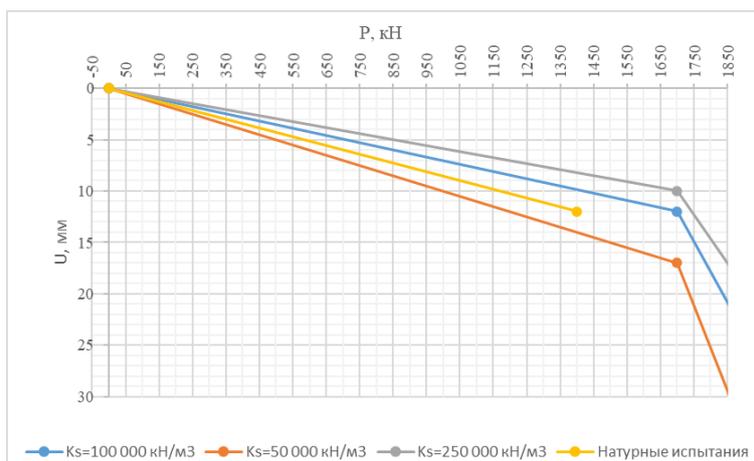


Рисунок 9. Кривые перемещений свай (свая № 2) (разработано авторами)

Figure 9. Piles displacement curves (pile # 2) (developed by the authors)

При сравнении опытных и расчетных данных по свае № 1, следует отметить, что было зафиксировано расхождение графиков уже на первой (линейной) стадии деформирования свай. По данным натурных испытаний свая № 1 при нагрузках выше 400 кН начинает деформироваться нелинейно. По расчету же стадия нелинейных деформаций должна наступать при нагрузке 1570 кН. При анализе перемещений выявилось расхождение около 55 %: по расчету перемещения составили 16 мм, а по данным испытаний — 36 мм. Такие расхождения, прежде всего, могут быть объяснены неоднородной структурой массива на испытательной площадке, о чем свидетельствуют сами авторы, проводившие исследования. Данные геологических изысканий и измерений дилатометром, проводимых на этой площадке, свидетельствуют о значительном разбросе значений получаемых деформационных характеристик массива. Кроме того, низ сваи № 1 заглублен в слой сильновыветрелых, сильнотрещиноватых аллевролитов с переслаиванием

песчаников, в котором возможно наличие локальных нарушений его структуры с пониженными деформационными свойствами. При натурных испытаниях это могло привести к увеличению фиксируемых перемещений.

Сравнение данных расчетов и натурных испытаний подтверждают, что при расчете свай в скальном массиве необходимо учитывать величину касательной жесткости контакта «свая — массив», которая оказывает существенное влияние на перемещения свай при действии нагрузок.

Кроме того, выявившееся расхождение в случае сваи № 1 между данными расчетов и опытными данными можно объяснить неоднородностью сложения рассматриваемого трещиноватого массива, свойства которого неодинаковы по глубине даже в пределах такого ограниченного по площади участка натурных испытаний. Поэтому, особое внимание при подготовке к расчетам необходимо уделять изучению структуры и трещиноватости скального массива, так как эти показатели существенно влияют на его механические характеристики.

Выводы

Conclusions

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Получены зависимости в виде уравнений регрессии, позволяющие определить границы изменения характера работы свай от действия горизонтальной нагрузки при увеличении их заделки в скальный грунт.
2. Определено влияние касательной жёсткости K_s контакта сваи со скальным грунтом на перемещения её оголовка при действии горизонтальной нагрузки. Показано, что при большом различии жесткостей контакта и скального массива уменьшение жёсткости контакта может привести к увеличению горизонтальных смещений сваи в 2 раза. При соизмеримых величинах жёсткостей контакта и массива горизонтальные перемещения сваи определяются только модулем деформации скального массива.
3. Учитывая сложность механизма взаимодействия сваи со скальным массивом, необходимо дальнейшее изучение и обобщение зарубежного и отечественного опыта, накопленного в этой области, развитие на его основе отечественных исследований и корректировка существующих нормативных документов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhang, L.** Drilled Shafts in Rock. Analysis and Design / L. Zhang. — Лейден: CRC Press, 2004. — 396 с.
2. NCHRP Synthesis 360: Rock-socketed shafts for highway structure foundations. A Synthesis of Highway Practice. — Вашингтон: Transportation Research Board, 2006. — 145 с. — URL: http://danbrownandassociates.com/wp-content/uploads/2011/08/nchrp_syn_360-Rock-Socketed-Shafts-for-Hwy-Construction.pdf (дата обращения: 25.06.2021).
3. **Березанцев, В.Г.** Расчет одиночных свай и свайных кустов на действие горизонтальных сил / В.Г. Березанцев. — М.: изд-во и 8-я тип. Воен. изд-ва, 1946. — 60 с.
4. **Буслов, А.С.** Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах / А.С. Буслов. — Ташкент: Фан, 1979. — 106 с.
5. **Буслов, А.С.** Расчет горизонтально нагруженных одностоечных опор по устойчивости / А.С. Буслов, Э.С. Тулаков. — DOI <https://doi.org/10.1023/B:SMAF.0000040184.87595.89> // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2004. — № 3. — С. 6–9. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44617563> (дата обращения: 24.05.2021).
6. **Готман, А.Л.** Расчет комбинированных свайных фундаментов на действие горизонтальной нагрузки и изгибающего момента / А.Л. Готман. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9332-x> // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2015. — № 4. — С. 23–27. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24297042> (дата обращения: 24.05.2021).
7. **Готман, А.Л.** Расчёт свай переменного сечения на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок методом конечных элементов / А.Л. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2000. — № 1. — С. 6–12. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43116997> (дата обращения: 25.06.2021).
8. **Готман, А.Л.** Расчет комбинированных свай переменного сечения на горизонтальную нагрузку / А.Л. Готман, Л.Я. Соколов // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. — 2014. — № 2. — С. 79–90. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21615608> (дата обращения: 25.06.2021).
9. **Levachev, S.N.** Piles in Hydrotechnical Engineering / S.N. Levachev, Yu.M. Kolesnikov, V.G. Fedorovsky, S.V. Kurillo. — Токио: А.А. Balkema, 2002. — 256 с.
10. **Тер-Мартirosян, А.З.** Взаимодействие длинной сваи конечной жесткости с уширенной пятой и окружающего грунта / А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Чинь Туан Вьет // Инженерная геология. — 2015. — № 6. — С. 44–51. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25307875> (дата обращения: 25.06.2021).
11. **Знаменский, В.В.** Инженерный метод расчета горизонтально нагруженных групп свай / В.В. Знаменский. — М.: АСВ, 2000. — 128 с.
12. **Wyllie, D.C.** Foundations on Rock / D.C. Wyllie. — London: E and FN SPON, 1999. — 420 с.
13. **Никишкин, М.В.** О работе свай-стоек в скальных грунтах / М.В. Никишкин // Вестник МГСУ. — 2010. — № 4–4. — С. 88–94. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21098485> (дата обращения: 25.06.2021).
14. **Sainov, M.P.** Ultra-high rockfill dam with combination of the reinforced concrete face and clay-cement diaphragm / M.P. Sainov, V.B. Soroka. — DOI <https://doi.org/10.18720/MCE.81.14> // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — № 5. — С. 135–148. — URL: <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2018.81.14/> (дата обращения: 24.05.2021).
15. **Монтгомери, Д.К.** Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. — пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1980. — 380 с.
16. **Орехов, В.Г.** Исследование схемы разрушения системы "бетонная плотина — скальное основание" / В.Г. Орехов, М.Г. Зерцалов, В.В. Толстиков // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. — 1987. — Т 204. — С. 71–76. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21983971> (дата обращения: 28.06.2021).

17. **Goodman, R.E.** A Model for the Mechanics of Jointed Rock / R.E. Goodman, R.L. Taylor, T.L. Brekke. — DOI <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001133> // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. — 1968. — Т 94. — № 3. — С. 637–659. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSFEAQ.0001133> (дата обращения: 28.06.2021).
18. **Зерцалов, М.Г.** К расчету буронабивных свай в скальных грунтах на действие осевых сжимающих нагрузок / М.Г. Зерцалов, М.В. Никишкин, И.Н. Хохлов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2017. — № 3. — С. 2–8. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30558309> (дата обращения: 28.06.2021).
19. **Зерцалов, М.Г.** Об особенностях расчетов несущей способности и перемещений буронабивных свай в скальных массивах при действии вертикальных и горизонтальных нагрузок / М.Г. Зерцалов, В.В. Знаменский, И.Н. Хохлов // Материалы всероссийской национальной конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий». Пермь, 2017 / Пермь: Издательство ПНИПУ, 2017. — С. 429–438.
20. **Zertsalov, M.G.** Interaction of drilled shafts in rock under the action of lateral load / M.G. Zertsalov, V.V. Znamenskiy, I.N. Khokhlov. — DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042050> // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction — The Formation of Living Environment" (FORM 2018) 25–27 April 2018, Moscow / М.: IOP Publishing Ltd, 2018. — С. 42050. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/365/4/042050> (дата обращения: 06.07.2021).
21. **Zertsalov, M.G.** The influence of the interface of drilled socketed shafts and rock mass on their behavior / M.G. Zertsalov, V.E. Merkin, I.N. Khokhlov. — DOI <https://doi.org/10.1201/9780429462078> // EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses / Лондон: CRC Press, 2018. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429462078-131/influence-interface-drilled-socketed-shafts-rock-mass-behavior-mikhail-zertsalov-valeriy-merkin-ivan-khokhlov> (дата обращения: 06.07.2021).
22. **Pells, P.J.** An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone / P.J. Pells, R.K. Rowe, R.M. Turner // Structural foundations on rock: proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, 7–9 May 1980 / Сидней: А.А. Balkema, 1980. — С. 291–302.
23. **Uncuoglu, E.** Lateral resistance of a short rigid pile in a two layer cohesionless soil / E. Uncuoglu, M. Laman // ACTA Geotechnica Slovenica. — 2011. — № 2. — С. 19–43. — URL: <http://fgserver6.fg.um.si/journal-ags/2011-2/article-2.asp> (дата обращения: 28.06.2021).
24. **Horvath, R.G.** Methods of improving the performance of drilled piers in weak rock / R.G. Horvath, T.C. Kenney, P. Kozicki. — DOI <https://doi.org/10.1139/t83-081> // Canadian Geotechnical Journal. — 1983. — Т 20. — № 4. — С. 758–772. — URL: <https://cdnscepub.com/doi/10.1139/t83-081> (дата обращения: 28.06.2021).
25. **Зерцалов, М.Г.** Влияние контакта "свая-скальный массив" на осадку свай / М.Г. Зерцалов. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9527-z> // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2018. — № 4. — С. 2–5. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36456927> (дата обращения: 28.06.2021).

Сведения об авторах:

Хохлов Иван Николаевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: inh.2017@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8848-1416>

Зерцалов Михаил Григорьевич — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: mzertsalov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4997-4896>

Статья получена: 09.08.2021. Принята к публикации: 16.10.2021. Опубликована онлайн: 31.10.2021.

REFERENCES

1. Zhang L. Drilled Shafts in Rock. Analysis and Design. Leiden: CRC Press; 2004. (In Eng.).
2. NCHRP Synthesis 360: Rock-socketed shafts for highway structure foundations. A Synthesis of Highway Practice. Washington, D.C.: Transportation Research Board; 2006. Available at: http://danbrownandassociates.com/wp-content/uploads/2011/08/nchrp_syn_360-Rock-Socketed-Shafts-for-Hwy-Construction.pdf (accessed 25th June 2021). (In Eng.).
3. Berezantsev V.G. [Calculation of single piles and pile clusters for the action of horizontal forces]. Moscow: publishing house and 8th type. Military. publishing house; 1946. (In Russ.).
4. Buslov A.S. [Work of piles for horizontal load beyond elastic limit in cohesive soils]. Tashkent: Fan; 1979. (In Russ.).
5. Buslov A.S., Tulakov E.S. Stability analysis of horizontally loaded pedestal supports. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2004; 41(3): 78–83. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/B:SMAF.000040184.87595.89>.
6. Gotman A.L. Analysis of Combined Pile Foundations Exposed to Horizontal Load and Bending Moment. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 52(4): 225–231. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9332-x>.
7. Gotman A.L. [Calculation of piles of variable cross-section for the combined action of vertical and horizontal loads by the finite element method]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2000; (1): 6–12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43116997> (accessed 25th June 2021). (In Russ.).
8. Gotman A.L., Sokolov L.Ya. Analysis of a Composite Pile of Variable Section Under the Lateral Load. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2014; (2): 79–90. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21615608> (accessed 25th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Levachev S.N., Kolesnikov Yu.M., Fedorovsky V.G., Kurillo S.V. Piles in Hydrotechnical Engineering. Tokyo: A.A. Balkema; 2002. (In Eng.).
10. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Chin’3Tuan V’yet [Interaction of a long pile of finite stiffness with a widened heel and surrounding soil]. *Engineering Geology*. 2015; (6): 44–51. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25307875> (accessed 25th June 2021). (In Russ.).
11. Znamenskiy V.V. [Engineering method for calculating horizontally loaded pile groups]. Moscow: ASV; 2000. (In Russ.).
12. Wyllie D.C. Foundations on Rock. London: E and FN SPON; 1999. (In Eng.).
13. Nikishkin M.V. Drilled Shafts Behavior Based on Rocks. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2010; (4–4): 88–94. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21098485> (accessed 25th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Sainov M.P., Soroka V.B. Ultra-high rockfill dam with combination of the reinforced concrete face and clay-cement diaphragm. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; (5): 135–148. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.81.14>.
15. Montgomeri D.K. [Experiment design and data analysis]. Leningrad: Sudostroyeniye; 1980. (In Russ.).
16. Orekhov V.G., Zertsalov M.G., Tolstikov V.V. [Investigation of the scheme of destruction of the system "concrete dam — rock foundation"]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneyeva*. 1987; (204): 71–76. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21983971> (accessed 28th June 2021). (In Russ.).
17. Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1968; 94(3): 637–659. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001133>.
18. Zertsalov M.G., Nikishkin M.V., Khokhlov I.N. [To the calculation of bored piles in rocky soils for the action of axial compressive loads]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017; (3): 2–8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30558309> (accessed 28th June 2021). (In Russ.).

19. Zertsalov M.G., Znamenskiy V.V., Khokhlov I.N. [On the features of calculations of the bearing capacity and displacement of bored piles in rock mass under the action of vertical and horizontal loads]. In: [Materials of the All-Russian National Conference with International Participation "Deep Foundations and Geotechnical Problems of Territories". Perm, 2017]. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2017. p. 429–438.
20. Zertsalov M.G., Znamenskiy V.V., Khokhlov I.N. Interaction of drilled shafts in rock under the action of lateral load. In: *XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction — The Formation of Living Environment" (FORM 2018) 25–27 April 2018, Moscow*. Moscow: IOP Publishing Ltd; 2018. p. 42050. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/365/4/042050> (accessed 6th July 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042050>.
21. Zertsalov M.G., Merkin V.E., Khokhlov I.N. The influence of the interface of drilled socketed shafts and rock mass on their behavior. In: *EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. London: CRC Press; 2018. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429462078-131/influence-interface-drilled-socketed-shafts-rock-mass-behavior-mikhail-zertsalov-valeriy-merkin-ivan-khokhlov> (accessed 6th July 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429462078>.
22. Pells P.J., Rowe R.K., Turner R.M. An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone. In: *Structural foundations on rock: proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, 7–9 May 1980*. Sydney: A.A. Balkema; 1980. p. 291–302.
23. Uncuoglu E., Laman M. Lateral resistance of a short rigid pile in a two layer cohesionless soil. *ACTA Geotechnica Slovenica*. 2011; (2): 19–43. Available at: <http://fgserver6.fg.um.si/journal-ags/2011-2/article-2.asp> (accessed 28th June 2021). (In Eng.).
24. Horvath R.G., Kenney T.C., Kozicki P. Methods of improving the performance of drilled piers in weak rock. *Canadian Geotechnical Journal*. 1983; 20(4): 758–772. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1139/t83-081>.
25. Zertsalov M.G. Influence of "Pile-Rocky Massif" Contact on Pile Settlement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 55(4): 209–214. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9527-z>.

Information about the authors:

Ivan N. Khokhlov — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: inh.2017@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8848-1416>

Mikhail G. Zertsalov — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: mzertsalov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4997-4896>

Submitted: 9th August 2021. Revised: 16th October 2021. Published online: 31st October 2021.