

УДК 624.154.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-7-25](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25)

EDN MVNGZB

# ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ, ПЕРЕСЛАИВАЕМЫХ ДИСПЕРСНЫМИ ГРУНТАМИ, НА ДЕЙСТВИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

И.В. КОЛЫБИН, канд. техн. наук  
Д.Е. РАЗВОДОВСКИЙ, канд. техн. наук  
А.В. СКОРИКОВ, канд. техн. наук  
А.А. БРЫКСИНА✉

*Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация*

## Аннотация

**Введение.** Актуальная нормативная методика расчета свай в скальных грунтах позволяет определить несущую способность сваи, заделанной в сплошной скальный массив без слабых прослоек. В реальной практике проектирования распространены случаи переслаивания скальных грунтов менее прочными и жесткими дисперсными грунтами, включение которых изменяет работу сваи. Простое суммирование расчетных сопротивлений по длине сваи и пяте завышает ее расчетную несущую способность и не соответствует реальной работе ввиду разных скоростей мобилизации сил трения в грунтах различного сложения.

**Цель.** Разработать методику определения несущей способности одиночной буронабивной сваи, взаимодействующей со скальными грунтами, переслаиваемые дисперсными грунтами, на действие вертикальной вдавливающей нагрузки.

**Материалы и методы.** Методика оценки сопротивления на боковой поверхности сваи, прорезающей скальные и дисперсные грунты, разработана на основе анализа результатов статических испытаний свай, численного моделирования и учитывает табулированные и аналитические решения, приведенные в нормативной литературе.

**Результаты.** Разработана методика определения несущей способности одиночной сваи, взаимодействующей со скальным массивом, переслаиваемым дисперсными грунтами, с использованием табулированных решений, приведенных в нормативной литературе, эмпирических зависимостей и численного моделирования. В качестве критерия достижения предельного сдвигового сопротивления основания сваи предложена формула для контрольной осадки  $S_{ref}$ , которая учитывает размеры сваи и характеристики материала ствола. Выполнен анализ степени чувствительности величины несущей способности сваи от параметров модели и расчетных предпосылок численного моделирования. Приведенные в статье примеры определения расчетной несущей способности свай с использованием предложенной методики показывают близкие результаты с экспериментальными данными, полученными натурными испытаниями.

**Выводы.** Предложенная методика дает проектировщику возможность учета сопротивлений прослоек дисперсного грунта на боковой поверхности сваи в скальном массиве и, соответственно, повышения ее расчетной несущей способности.

**Ключевые слова:** несущая способность сваи, расчетное сопротивление, сопротивление на боковой поверхности, контрольная осадка, свая, взаимодействующая со скальным грунтом, численное моделирование

**Для цитирования:** 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;34(3):7–25. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-7-25](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25)

#### **Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

#### **Финансирование**

Исследование выполнялось за счет средств ФАУ «ФЦС» в 2021 году.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 25.04.2022*

*Поступила после рецензирования 12.05.2022*

*Принята к публикации 07.06.2022*

# **EVALUATION OF PILE BEARING CAPACITY IN ROCK INTERBEDDED BY COHESION SOILS UNDER VERTICAL LOADING**

I.V. KOLYBIN, Cand. Sci. (Engineering)

D.E. RAZVODOVSKY, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. SKORIKOV, Cand. Sci. (Engineering)

A.A. BRYKSINA 

*Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov,  
JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

#### **Abstract**

*Introduction.* The current regulatory calculation procedure for piles in rocks provides a means to determine the bearing capacity of a pile embedded in a solid rock mass containing no weak interlayers. However, it is not uncommon in actual design practice for rocky soils to be interbedded with softer and less stiff dispersive soils, whose presence affects pile performance. In this case, a summation of estimated resistances along the pile length and at its foot overestimates its estimated bearing capacity, which does not correspond to the actual work due to the different rates of friction force generation in soils of varying formations.

*Aim.* To develop a procedure for determining the bearing capacity of a single bored cast in place pile interacting with rock mass interbedded with cohesion soils under vertical indentation loading.

*Materials and Methods.* The procedure for estimating the skin friction resistance of a pile penetrating rocky and dispersive soils is based on the analysis of static pile tests and numerical simulation, taking into account tabulated and analytical solutions given in regulatory literature.

*Results.* A procedure for determining the bearing capacity of a single pile interacting with a rock mass interbedded with cohesion soils was developed using tabulated solutions given in regulatory literature, empirical dependencies, and numerical simulation. As a criterion for the ultimate shear resistance of bearing soil, a formula for reference settlement  $S_{ref}$  is proposed, which factors in pile dimensions and the characteristics of the pile shaft material. The extent to which the pile bearing capacity is sensitive to the parameters of the model and computational assumptions of numerical modeling is analyzed. The presented examples of determining the design pile bearing capacity via the proposed procedure show results similar to experimental data obtained in the field tests.

*Conclusions.* The presented method allows engineers to factor in the skin friction resistance of cohesion soil interbedding in the rock mass to increase its design bearing capacity.

**Keywords:** pile bearing capacity, design resistance, skin friction resistance, reference settlement, pile interacting with rock, numerical simulation

**For citation:** Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Bryksina A.A. Evaluation of pile bearing capacity in rock interbedded by cohesion soils under vertical loading. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;34(3):7–25. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-7-25](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25)

#### **Author contribution statements**

All authors have contributed equally to the work.

#### **Funding**

The study was funded by the Federal Centre for Regulation, Standardization, and Technical Assessment in Construction in 2021.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 25.04.2022*

*Revised 12.05.2022*

*Accepted 07.06.2022*

## **Введение**

В отечественной нормативной литературе вплоть до 2010 г. использовался упрощенный метод расчета свай-стоек, взаимодействующих со скальными грунтами. В соответствии с традиционным подходом предполагалось, что нагрузка на основание передается преимущественно по пяте сваи [7]. Такой подход, во-первых, не учитывал «масштабный фактор» скального массива – снижение его прочности вследствие структурных дефектов (трещин, полостей и т. д.) – по сравнению с прочностью скальной отдельности на сжатие, получаемой лабораторными испытаниями монолитного образца, во-вторых, не учитывал сопротивление сваи на боковой поверхности.

Последующие редакции СП 24 содержали существенные изменения в методике расчета несущей способности свай в скальных массивах. СП 24.13330.2011 регламентировал консервативную оценку расчетного сопротивления скального массива  $R_m$  под пятой набивной и буровой сваи, заделанной в скальный грунт (формулы 7.6, 7.7 [3]). Для учета снижения прочности скальных грунтов ввиду трещиноватости введен дополнительный коэффициент  $K_s$ , применяемый к расчетному значению предела прочности на одноосное сжатие скального грунта  $R_c$ :

$$R_m = R_c \times K_s \quad (1)$$

Контролирующим параметром для оценки снижения прочности ввиду трещиноватости скальных грунтов принят показатель качества породы RQD, который определяется стандартными инженерно-геологическими изысканиями. Зависимости коэффициента снижения прочности  $K_s$  от показателя качества породы RQD приведены в СП 24.13330.2011 [3]. Однако расчетная несущая способность сваи по скальному грунту по-прежнему определялась только несущей способностью основания под пятой с учетом фактора заглубления.

В действующей редакции СП 24.13330.2011 с изменениями 1–3 [3] дополнительно появились возможности учета сопротивления скальных грунтов на боковой поверхности сваи. Расчетное сопротивление  $R_s$  слоя скального грунта на боковой поверхности сваи, которое является аналогом сопротивления  $f_i$  дисперсного грунта в терминах СП 24, определяется по формуле:

$$R_s = 0,63\sqrt{p_a R_c}, \quad (2)$$

где  $p_a = 100$  кПа.

Формула (2) широко применяется в мировой геотехнической практике, подтверждается многими исследователями и в качестве консервативной оценки подходит для проектирования [9]. Результаты, полученные расчетом по приведенной выше формуле, хорошо согласуются с результатами испытаний буровых свай, прорезающих известняки московского региона (например, на площадках ММДЦ «Москва-Сити» [11] и по материалам авторов работы [5]).

Помимо определения расчетной несущей способности по скальному грунту отдельно под пятой и на боковой поверхности, в СП 24 рассматривается также расчетный случай совместной работы нижнего конца сваи и ее боковой поверхности [3]. При этом используется упрощенная схема, в которой сваи опираются на идеализированный скальный массив без участия слоев дисперсных грунтов. Тем не менее в практике проектирования нередко встречаются случаи и схемы взаимодействия свай в скальных грунтах, переслаиваемых менее прочными и жесткими дисперсными грунтами, методика определения несущей способности для которых не отражена в действующих нормативно-технических документах. На первый взгляд информации для анализа и оценки несущей способности сваи достаточно: существуют подтвержденные и нормированные величины сопротивлений дисперсного и скального грунтов на боковой поверхности сваи, и имеется рекомендованная в СП 24 консервативная оценка расчетного сопротивления скального грунта  $R$  под пятой набивной и буровой сваи, заделанной в скальный грунт. Однако простое суммирование всех расчетных сопротивлений на участках сваи, взаимодействующих со скальными и дисперсными грунтами, может значительно завьисить ее несущую способность по грунту. Следует учитывать, что ввиду существенно различной жесткости и прочности дисперсного и скального грунтов скорости мобилизации их сопротивлений на боковой поверхности сваи, а также под ее пятой разные, и предельные сопротивления на разных участках боковой поверхности сваи и под ее пятой достигаются, как правило, неодновременно.

Практика проведения натурных испытаний свай в скальных грунтах показывает, что первым достигает предела сопротивление на боковой поверхности сваи, при перемещениях сваи уже около 8–10 мм [10]. В то же время для реализации предельного сопротивления под пятой требуются, как правило, значительно большие перемещения, составляющие примерно 5–10 % от диаметра сваи (для сваи метрового диаметра перемещение может составить около 50–100 мм или более) [10]. Указанная закономерность связана как с особенностями механизмов разрушения на боковой поверхности сваи и под ее нижним концом (когда под пятой сваи вовлекается большая часть скального массива), так и с возможным наличием бурового шлама в забое скважин. Таким образом, для достижения предельного сопротивления под пятой могут реализоваться перемещения, значительно превышающие допустимые величины, исходя из требований эксплуатационной пригодности для сваи. На боковой поверхности сваи предельные сопротивления также могут достигаться неодновременно, в зависимости от соотношения жесткостей и прочностных характеристик дисперсных и скальных грунтов.

СП 24.13330.2011 [3] регламентирует, что при проведении расчетов несущей способности и осадок одиночных свай предпочтение следует отдавать табулированным или аналитическим решениям, приведенным в СП. Но при этом допускает проведение расчетов с использованием компьютерного обеспечения для определения несущей способности одиночных свай.

В настоящей работе предлагается методика определения расчетной несущей способности свай, взаимодействующей со скальными и дисперсными грунтами, с использованием как численного моделирования, так и аналитических решений.

### Критерии достижения предельного сопротивления основания сваи

В соответствии с требованиями отечественных нормативных документов [2, 3] расчеты свайных фундаментов и их оснований проводят по предельным состояниям первой и второй групп. При этом СП 24.13330.2011 [3] определяет несущую способность сваи  $F_d$  как предельное сопротивление основания одиночной сваи по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием по перемещениям сваи. Таким образом, значение несущей способности может являться как истинным предельным сопротивлением сваи при исчерпании несущей способности грунта (при срыве), так и быть принятым с некоторым запасом при достижении сваей заранее заданной допустимой осадки, исходя из требований ее эксплуатационной пригодности. Для производственных и гражданских зданий заранее заданная (контрольная) осадка  $S$  составляет 20–40 мм. Отметим, что контрольная осадка 20 мм, соответствующая эксплуатационной пригодности одиночной сваи, наиболее часто применяется в зарубежных источниках [9, 10] и является общепринятым стандартом для скальных грунтов. При этом предельное сопротивление скальных грунтов на боковой поверхности сваи реализуется при перемещениях около 1 % от диаметра сваи.

В работе [5] предложено контрольную осадку  $S_{ref}$  определять по формуле:

$$S_{ref} = 0,01d_f + k \frac{R_b L}{E}, \quad (3)$$

где  $d_f$  и  $l$  – диаметр и длина сваи соответственно;

$R_b$  – призмная прочность бетона (расчетное значение);

$E$  – модуль упругости бетона;

$k$  – коэффициент уменьшения продольной силы по длине сваи за счет трения на боковой поверхности, принимающий значения в диапазоне 0,5–0,75. По умолчанию предлагается принять  $k = 0,5$ .

Первый член формулы (3) представляет собой вертикальное перемещение сваи, при котором, как правило, достигается предельное сопротивление дисперсного и скального грунта на боковой поверхности, составляющее на практике примерно 10 мм.

Второй член формулы (3) представляет собой оценку ожидаемого укорочения ствола сваи при наибольшей возможной вертикальной вдавливающей нагрузке, исходя из прочности материала ствола сваи с учетом уменьшения продольной силы по длине сваи за счет трения на боковой поверхности.

При этом в соответствии с требованиями СП 24 значение контрольной осадки  $S_{ref}$  принимается не более 40 мм.

## Численные методы определения расчетного предельного сопротивления основания сваи

По результатам численного моделирования с использованием геотехнического программного обеспечения предполагается прямое получение величины продольной вдавливающей нагрузки на сваю, которая принимается за несущую способность одиночной сваи по грунту. Указанная нагрузка является результатом построения кривой «осадка – нагрузка», соответствует нелинейному участку кривой и ускоренному нарастанию деформаций или достижению контрольной осадки  $S_{ref}$  соответствующей эксплуатационной пригодности одиночной сваи.

Несущая способность сваи определяется как минимальное значение из действительно предельной несущей способности сваи, связанной с ее расчетным «срывом» в грунте, или нагрузки, соответствующей допустимой осадке сваи, связанной с ее эксплуатационной пригодностью.

При решении задачи определения несущей способности одиночной сваи расчеты проводят моделированием в осесимметричной постановке способом ячейки, принципиальное описание которого содержится в нормативных документах [3]. При этом уточняются дополнительные расчетные предпосылки, связанные со спецификой скальных грунтов:

- подразделение грунтов на скальные и дисперсные выполняют в соответствии с [1];
- модели механического поведения грунтов принимают, как правило: для скальных грунтов – Мора – Кулона (идеальной пластичности), для дисперсных (глинистых) грунтов – модели с упрочнением, с двойным изотропным упрочнением, а также жесткостью при малых деформациях (модели Hardening soil, Hardening soil small strain или их аналоги), модель Мора – Кулона;
- прочностные характеристики грунтов при использовании нелинейных моделей грунтов принимают по II группе предельных состояний;
- размеры расчетной области подбираются радиусом 10–20 диаметров сваи и высотой сжимаемой толщи – 3 диаметра сваи;
- для поверхности стенок скважины сваи, которая имеет природную или искусственную шероховатость при отсутствии бентонитового раствора, интерфейсные элементы принимают с коэффициентом снижения прочностных характеристик, равным единице. В случае использования смазки или бентонитового раствора несущую способность рекомендуется определять натурными испытаниями;
- при выполнении численного моделирования учитывают: предусматривают ли проектные решения проведение специальных мероприятий по подготовке забоя скважины (удаление шлама, цементация и т. д.) и обеспечение непосредственного контакта пяты сваи со скальным основанием. В случае если специальные мероприятия не предусмотрены, в запас надежности работу пяты сваи возможно не учитывать;
- при наличии результатов натурных испытаний для свай в схожих инженерно-геологических условиях выполняют сопоставление результатов расчета и эксперимента и корректировку расчетной схемы на основании обратных расчетов.

Помимо очевидных достоинств, прежде всего прямого получения величины несущей способности сваи по грунту, проведение численного моделирования для скальных грунтов имеет недостатки.

Основной недостаток связан с неопределенностями выбора деформационных и прочностных показателей грунтов основания, а также назначением параметров расчетной модели. Точность

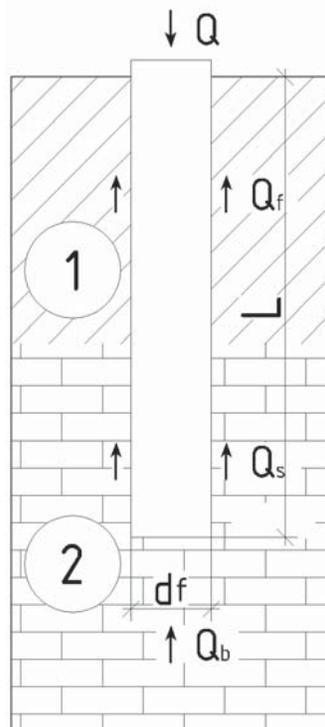
моделирования, получения нагрузки, соответствующей контрольной осадке, в большой степени зависят от качества исходных данных, полученных инженерно-геологическими изысканиями. Не всегда исходные данные для моделирования скальных грунтов, как, впрочем, и для глин, отличаются полнотой и обоснованностью. Наибольшей сложностью является получение деформационных характеристик скальных грунтов в массиве. Отсутствие результатов испытаний для свай в аналогичных условиях и скорректированных обратными расчетами параметров модели также может увеличить погрешность определения предельной нагрузки.

### Определение расчетного предельного сопротивления основания сваи с использованием численного моделирования совместно с аналитическими решениями

Для расчета свай в скальных грунтах наиболее рациональным является метод учета разной скорости мобилизации сопротивлений под пятой и на боковой поверхности разных участков сваи, при котором предельные сопротивления суммируются в виде слагаемых с учетом понижающих коэффициентов.

При суммировании сопротивлений учитывается полностью предельное сопротивление, которое в первую очередь достигается на одном из участков сваи, к которой добавляется лишь часть доступного предельного сопротивления, соответственно на участках боковой поверхности или под пятой сваи, которые успели реализоваться при достижении заданной нагрузки или контрольной осадки на основании предварительно проведенного численного деформационного анализа. Результатом деформационного анализа является определение долей нагрузки, воспринимаемых пятой сваи и участками ее боковой поверхности в дисперсных и скальных грунтах.

Рассмотрим характерный расчетный случай взаимодействия сваи со скальными грунтами, переслаиваемыми дисперсными грунтами, в котором свая прорезает толщу дисперсных (глинистых) грунтов и опирается на скальные грунты с заделкой в них (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Расчетная схема взаимодействия сваи со скальным и дисперсным грунтом:  
 $Q$  – вертикальная нагрузка на сваю;  $Q_b$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемой пятой сваи;  $Q_s$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи в скальных грунтах;  $Q_f$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью сваи в дисперсных грунтах;  $L$  – длина сваи;  $d_f$  – диаметр сваи; 1 – дисперсный грунт; 2 – скальный грунт  
**Fig. 1.** Model showing the interaction of the pile with rock mass and cohesive soils:  
 $Q$  – vertical pile load;  $Q_b$  – response to the vertical load carried by the pile foot;  $Q_s$  – response to the vertical load carried by the pile skin in rocks;  $Q_f$  – response to the vertical load carried by the pile skin in cohesive soils;  $L$  – pile length;  $d_f$  – pile diameter; 1 – cohesive soil; 2 – rock

Предварительно выполняется численное моделирование в осесимметричной постановке с определением вертикальной вдавливающей нагрузки  $Q$ , соответствующей достижению заданной контрольной осадки сваи  $S_{ref}$ . По результатам деформационного анализа определяются части и доли нагрузок:

$Q_b$  – часть нагрузки, воспринимаемая пятой сваи в скальном грунте,  $\eta_b = Q_b/Q$  – соответствующая доля от общей нагрузки;

$Q_s$  – часть нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью сваи в скальном грунте,  $\eta_s = Q_s/Q$  – соответствующая доля от общей нагрузки;

$Q_f$  – часть нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью сваи в дисперсном грунте,  $\eta_f = Q_f/Q$  – соответствующая доля от общей нагрузки;

$Q_{rock}$  – часть нагрузки, воспринимаемая только при взаимодействии сваи со скальным грунтом, без учета дисперсных,  $Q_{rock} = Q_b + Q_s$  и соответствующие доли  $\eta = Q_b/Q_{rock}$ ,  $(1-\eta) = Q_s/Q_{rock}$ .

Для каждого характерного участка согласно СП 24.13330 [3] определяется:

- несущая способность сваи по скальному грунту  $F_{db}$ , определяемая предельным сопротивлением под нижним концом;
- несущая способность по скальному грунту на боковой поверхности сваи  $F_{ds}$ , определяемая предельным сопротивлением на ее боковой поверхности;
- несущая способность сваи по дисперсному грунту  $F_{df}$ , определяемая сопротивлением на ее боковой поверхности.

Дополнительно вычисляется несущая способность только по скальному грунту  $F_{d,rock}$ , которая определяется в соответствии с п. Б.2 Приложения Б СП 24.13330 [3], на основании известных величин  $F_{ds}$ ,  $F_{db}$  и  $\eta$ .

При проведении численных расчетов по определению несущей способности одиночной сваи по грунту следует ограничивать сопротивления скального и дисперсного грунтов на каждом характерном участке сваи, которые не должны превышать величины соответствующих предельных сопротивлений грунтов  $R_{si}$  и  $f_i$  на боковой поверхности сваи, а также расчетного сопротивления скального грунта  $R$  под пятой сваи, заделанной в скальный грунт. Таким образом, должны выполняться неравенства:

$$\begin{aligned} Q_b &\leq F_{db} = \gamma_c R A, \\ Q_s &\leq F_{ds} = u \Sigma R_{si} h_i, \\ Q_f &\leq F_{df} = \gamma_c \gamma_{R,f} u \Sigma f_i h_i. \end{aligned} \tag{4}$$

Исходя из указанных требований, получаем систему неравенств:

$$\begin{aligned} \eta_b \times Q &\leq F_{db}, \\ \eta_s \times Q &\leq F_{ds}, \\ \eta_f \times Q &\leq F_{df}. \end{aligned} \tag{5}$$

Далее полагаем, что при достижении вдавливающей нагрузкой  $Q$  величины предельной несущей способности сваи по грунту  $F_d$ , соответствующей заданной контрольной осадке  $S_{ref}$ , должны также выполняться неравенства:

$$\begin{aligned} \eta_b \times F_d &\leq F_{db}, \\ \eta_s \times F_d &\leq F_{ds}, \\ \eta_f \times F_d &\leq F_{df}. \end{aligned} \tag{6}$$

Расчетные значения осадок, зависящие от точности исходных данных, полученных инженерно-геологическими изысканиями, а также от особенностей моделей грунта, расчетных предпосылок и возможностей программных комплексов, могут отличаться от фактических. Поэтому принимается допущение, что расчетное соотношение долей нагрузок, полученное численным моделированием при заданной контрольной осадке  $S_{ref}$ , сохраняется и при достижении фактической несущей способности сваи по грунту  $F_d$ . Результаты расчетов и сопоставление их с экспериментальными данными, приведенными в [5], показывают слабую чувствительность соотношения долей нагрузок и итоговой расчетной несущей способности сваи по грунту к вариациям контрольной осадки и прикладываемой нагрузки. Учитывая при этом, что использование наперед заданной осадки при определении истинного предельного сопротивления сваи (при исчерпании несущей способности грунта) приводит к некоторому запасу надежности, такой подход соответствует положениям нормативных документов (п. 7.1.2 [3]), требующим содержание погрешности расчетных моделей только в сторону запаса надежности.

Тогда несущая способность сваи по грунту  $F_d$  должна определяться системой неравенств:

$$\begin{aligned} F_d &\leq F_{db} / \eta_b \\ F_d &\leq F_{ds} / \eta_s \\ F_d &\leq F_{df} / \eta_f. \end{aligned} \quad (7)$$

Каждое из неравенств (7) определяет несущую способность, ограниченную соответственно:

- предельным сопротивлением скального грунта под нижним концом сваи;
- предельным сопротивлением скального грунта на боковой поверхности сваи;
- предельным сопротивлением дисперсного грунта на боковой поверхности сваи.

Последнее неравенство может быть модифицировано, как показано ниже, в случае малого вклада сопротивления дисперсного грунта при оценке общей несущей способности.

Далее определяется наименьшая величина из двух значений  $F_{d,rock} / (\eta_b + \eta_s)$  и  $F_{df} / \eta_f$  после чего возможна реализация двух основных расчетных случаев.

1. Наименьшей несущей способностью является величина  $F_{df} / \eta_f$ , ограниченная сопротивлением  $f$  дисперсного слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, где в первую очередь мобилизуется предельное сопротивление:

$$F_{d,rock} / (\eta_b + \eta_s) \geq F_{df} / \eta_f. \quad (8)$$

В этом случае предполагается следующий алгоритм решения. Как показывают экспериментальные исследования, предельное сопротивление в глинистых грунтах достигается уже при достаточно малых перемещениях (около 10 мм и менее наперед задаваемой контрольной осадки по умолчанию –  $S_{ref}$ ), и перемещение сваи в дисперсном грунте при действии вдавливающей нагрузки не предполагает хрупкого разрушения на боковой поверхности. Поэтому вычисление несущей способности сваи допускается отдельно по скальному грунту (с совместным рассмотрением работы по пяте и боковой поверхности), к которой может быть добавлена в полной мере несущая способность по дисперсному грунту  $F_{df}$ . Несущая способность сваи по грунту  $F_d$  определяется неравенством:

$$F_d \leq F_{d,rock} + F_{df}. \quad (9)$$

2. Наибольшей несущей способностью является величина  $F_{df} / \eta_f$ , связанная с сопротивлением  $f$  дисперсного слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи:

$$F_{d,rock} / (\eta_b + \eta_s) < F_{df} / \eta_f \quad (10)$$

Такой вариант, противоположный первому, возможен, если свая прорезает значительную толщу дисперсных грунтов, а слои скальных грунтов имеют незначительную мощность или прочность.

Несущая способность сваи по грунту  $F_d$  должна определяться неравенством:

$$F_d \leq F_{d,rock} / (\eta_b + \eta_s) \quad (11)$$

и соответствует случаю, когда первым мобилизуется предельное сопротивление в скальном грунте при совместной работе боковой поверхности и нижнего конца сваи.

### Пример расчетной схемы взаимодействия сваи с дисперсным и скальным грунтом

Численное моделирование выполнено для фрагмента (далее – фрагмент № 1) экспериментальной буронабивной сваи на строительном объекте по адресу: г. Москва, ул. Летниковская, вл. 10/11, испытание которой проведены ООО «НОВА» в августе 2021 г. Параметры опытной сваи, нагрузка и величина контрольной осадки приведены в табл. 1. Численные расчеты проводились в ПК PLAXIS по физико-механическим характеристикам грунтов, представленным в отчете об инженерно-геологических изысканиях (см. рис. 2). Для исключения из работы участка сваи, расположенного выше рассматриваемого фрагмента, участок искусственно моделируется с использованием интерфейсных элементов с пониженными прочностными характеристиками. Ввиду отсутствия данных по прочностным характеристикам известняка сцепление и угол внутреннего трения приняты в соответствии СП 23.13330.2018 [4].

Величина полной расчетной несущей способности фрагмента № 1 по грунту составила  $F_d^{расч} = 11\,993$  кН, что хорошо согласуется с экспериментальным значением  $F_d^{экспер} = 12\,024$  кН. Несущая способность фрагмента сваи, определенная простым суммированием табулированных значений несущих способностей участков сваи ( $F_d^{сумм} = AR + u \sum R_{si} h_i + u \sum f_i h_i$ ), более чем в два раза превышает значение, определенное по изложенной методике и по результатам

Таблица 1

#### Параметры экспериментальной сваи и исходные данные фрагмента № 1, принятые для численного моделирования

Table 1

#### Parameters of the test pile and initial data of Section No. 1 adopted for numerical simulation

	Диаметр сваи, м	Длина сваи, м	Нагрузка, кН	Осадка сваи, мм	Бетон сваи, класс / $R_b$ (МПа) / модуль упругости, Е (ГПа)	Контрольная осадка сваи, $s_{ref}$ мм по формуле (2)
Экспериментальные данные	1,0	24	15 000	14,25	B50 / 27,5 / 39,3	10+8,4=18,4
Численное моделирование*	1,0	5,7	12 024	–	B50 / 27,5 / 39,3	10+2,0=12,0

Примечание: \* – параметры фрагмента экспериментальной сваи, принятые для выполнения численного расчета  
 Note: \* – parameters of the test pile used for numerical simulation

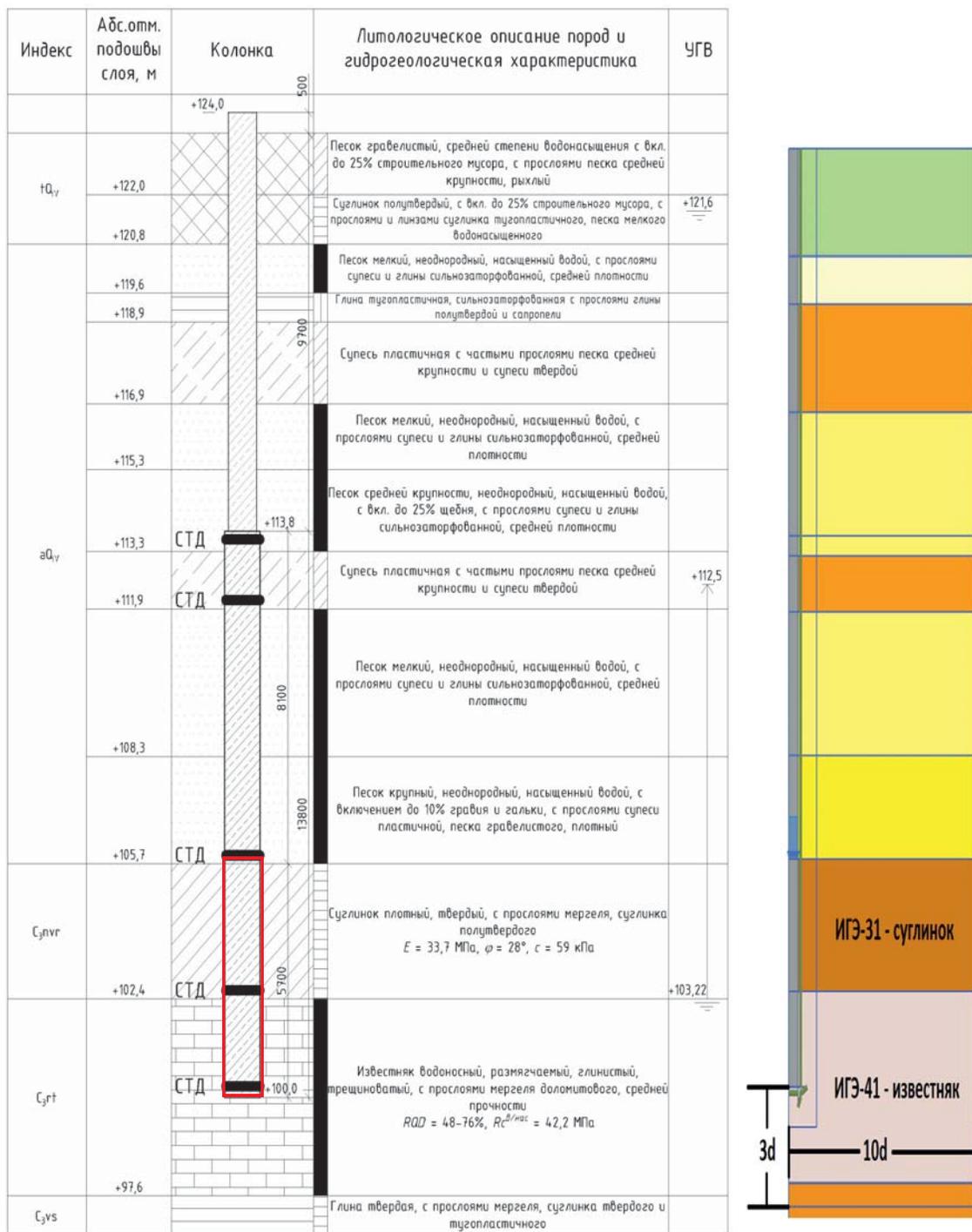
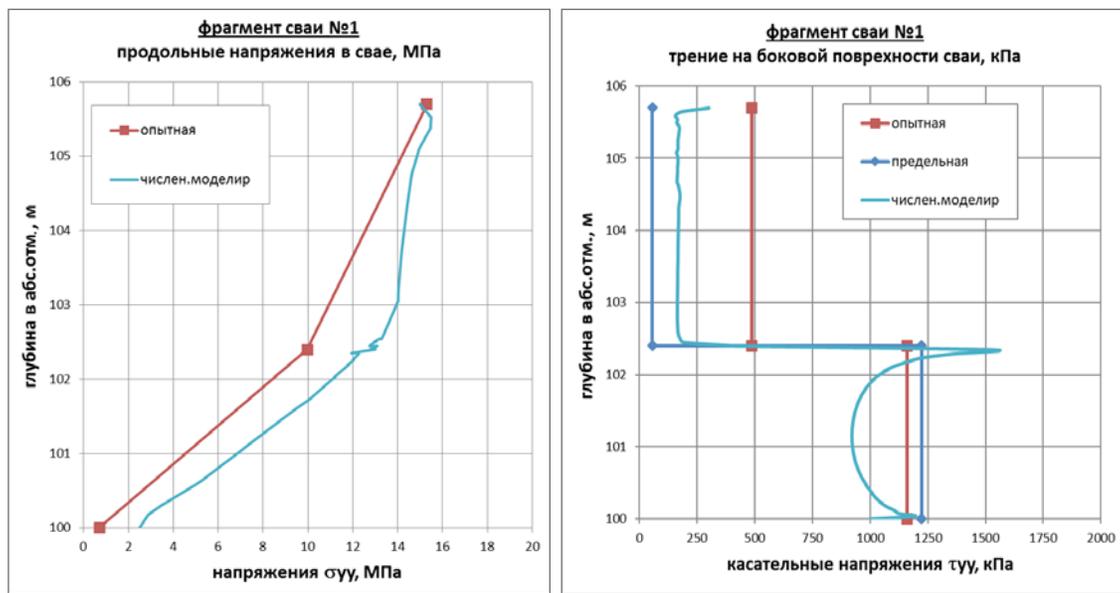


Рис. 2. Инженерно-геологическое строение участка экспериментальной сваи. Красный прямоугольник – фрагмент № 1 сваи, участвующий в численном моделировании. Справа представлена расчетная схема для численного моделирования

Fig. 2. Geotechnical strata of test pile. Red rectangle – section No. 1 of the pile used in the numerical simulation. A numerical simulation model is shown on the right



**Рис. 3.** Графические результаты численного моделирования фрагмента № 1. Эпюры продольных напряжений для фрагмента сваи (МПа) и трения на ее боковой поверхности (кПа)  
**Fig. 3.** Graphical results obtained in the numerical simulation of Section No. 1. Diagrams for vertical stresses (MPa) and skin friction (kPa) for the pile section

натурного испытания, и составляет 25 500 кН. Приведенный пример подтверждает, что подход простого суммирования расчетных сопротивлений в полной мере не отображает истинную работу сваи и ведет к завышению ее расчетной несущей способности. Как отмечалось выше, из-за высокой неопределенности прочностных и деформационных характеристик грунтов основания соотношения долей нагрузки, воспринимаемой сваями на боковой поверхности в дисперсных и скальных грунтах и пятой сваи, полученные численным моделированием, несколько отличаются от результатов, полученных экспериментально (см. рис. 3).

Для анализа степени влияния параметров грунтовой модели и расчетных предпосылок на величину несущей способности сваи, определяемой по предложенной методике, проведена серия расчетов. Исследование на чувствительность расчетной модели проводилось в соответствии с рекомендациями СП 22.13330 по методике, разработанной в [6, 8]. Результаты расчетов показали, что величина несущей способности сваи слабо чувствительна к параметрам грунтовой модели, тогда как принятые расчетные предпосылки являются определяющими (см. табл. 2).

### Пример расчетной схемы взаимодействия сваи со скальным грунтом с прослойкой дисперсного грунта

Расчетная схема, приведенная на рис. 4, отличается от рассмотренной ранее добавлением слоя скального грунта поверх дисперсного. Расчеты дополняются вычислением общей нагрузки  $Q_{rock} = Q_{bs} + Q_s$ , воспринимаемой только при взаимодействии сваи со скальным грунтом, где  $Q_{bs}$  – часть нагрузки, воспринимаемая пятой и боковой поверхностью заделки сваи в скальный грунт. Вычисляются также доли  $\eta = Q_{bs}/Q_{rock}$ ,  $1-\eta = Q_s/Q_{rock}$  и несущая способность

Таблица 2

**Оценка чувствительности исследуемых параметров на несущую способность сваи, определяемую по предложенной методике**

Table 2

**Assessment of the impact of the studied parameters on the pile bearing capacity determined according to the proposed procedure**

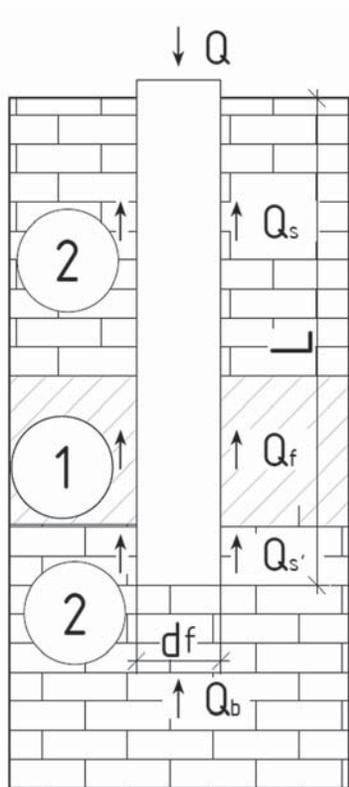
1. Параметры грунтовой модели		Степень чувствительности	Диапазон
1.1	степень переуплотнения дисперсных грунтов (OCR)		OCR [1...6]
1.2	модуль деформации массива скального грунта ( $E_m$ )		$E_m$ [0,3...4,2] ГПа
1.3	модуль сдвига дисперсного грунта (G)		$E_n$ [75...750] МПа
2. Расчетные предпосылки		Степень чувствительности	Критерий
2.1	шламовый слой в пяте сваи		доля нагрузки $\eta_b$
2.2	упрощенная модель грунта		Leaner Elastic, LE
2.3	критерий контрольной осадки		$S_{ref} = 0,01d_f + k \frac{R_b L}{E}$
2.4	мощность дисперсного грунта		$h_{дисп.гр} \gg h_{ск.гр}$

Примечание:

не чувствительна    
  слабо чувствительна    
  умеренно чувствительная    
  чувствительная

Note:

not sensitive    
  weakly sensitive    
  moderately sensitive    
  sensitive



**Рис. 4.** Расчетная схема взаимодействия сваи со скальным и дисперсным грунтам:

$Q$  – вертикальная нагрузка на сваю;  $Q_b$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемая пятой сваи;  $Q_s, Q_s'$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью сваи в скальных грунтах;  $Q_f$  – реакция от вертикальной нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью сваи в дисперсных грунтах;  $L$  – длина сваи;  $d_f$  – диаметр сваи; 1 – дисперсный грунт; 2 – скальный грунт

**Fig. 4.** Model showing the interaction of the pile with rock and cohesive soils:

$Q$  – vertical pile load;  $Q_b$  – response to the vertical load carried by the pile foot;  $Q_s, Q_s'$  – response to the vertical load carried by the pile skin in rocks;  $Q_f$  – response to the vertical load carried by the pile skin in cohesive soils;

$L$  – pile length;  $d_f$  – pile diameter;  
 1 – cohesive soil; 2 – rock

Таблица 3

**Параметры экспериментальной сваи для схемы с двумя слоями известняка и исходные данные, принятые для численного моделирования**

Table 3

**Parameters of the test pile for a two-layer limestone scheme and initial data adopted for numerical simulation**

	Диаметр сваи, м	Длина сваи, м	Нагрузка, кН	Осадка сваи, мм	Бетон сваи, класс / R <sub>b</sub> , МПа / модуль упругости, Е, ГПа	Контрольная осадка сваи, s <sub>ref</sub> , мм по формуле (2)
Экспериментальные данные	1,2	25,4	31 000	11,01	B60 / 33 / 45,2	12 + 9,3 = 21,3
Численное моделирование*	1,2	11,3	20 560	–	B60 / 33 / 45,2	12 + 4,1 = 16,1

Примечание: \* – параметры фрагмента экспериментальной сваи, принятые для выполнения численного расчета  
 Note: \* – parameters of the test pile used for numerical simulation

только по скальному грунту  $F_d = F_{d,rock}$  в соответствии с Приложением Б СП 24.13330 [3]. Блок-схема определения несущей способности приведена на рис. 8.

В табл. 3 и на рис. 5 приведены исходные данные для анализа работы экспериментальной сваи на объекте, расположенном в г. Москве на пересечении Кутузовского проспекта и улицы Кульнева (испытания проведены ООО «Технотест» в ноябре 2020 г.).

Для оценки предельных расчетных сопротивлений выполнено моделирование нагружения фрагмента сваи (далее – фрагмент № 2) в виде вынужденной осадки в диапазоне контрольной величины  $10 \text{ мм} \leq S_{ref} \leq 20 \text{ мм}$ . Участок сваи, расположенный выше рассматриваемого фрагмента, искусственно моделируется интерфейсным элементом с пониженными прочностными характеристиками.

Последовательность вычислений приведена на рис. 8. На рассматриваемом фрагменте № 2 длиной 11,3 м в первую очередь мобилизуется предельное сопротивление на боковой поверхности сваи в дисперсном грунте, т. е. реализуется случай  $F_{df} / \eta_f \leq F_{d,rock} / (1 - \eta_p)$ . Величина расчетной несущей способности составила  $F_d^{расч} = F_{d,rock} + F_{df} = 30\,028 \text{ кН}$ , что сопоставимо с экспериментальным значением  $F_d^{экспер} = 31\,000 \text{ кН}$ . Несущая способность, полученная суммированием расчетных сопротивлений, составляет 62 800 кН, в два раза превышая расчетное значение.

На рис. 6 представлен график «нагрузка – осадка», полученный численным моделированием приложения к фрагменту сваи вынужденной осадкой с контрольными значениями:  $S_{ref} = [1; 1,61; 2] \text{ см}$ . Квадратными маркерами на графике отмечены точки, для которых посчитаны доли ( $\eta$ ) мобилизации слоев грунта. Значения полной несущей способности фрагмента сваи  $F_p$ , определенные с учетом долей распределения нагрузок, тем меньше, чем меньше заданное перемещение верха сваи. Однако чувствительность итоговой несущей способности к величинам заданной вынужденной осадки невелика. На графике также отмечена несущая способность фрагмента сваи из условия прочности по материалу (для марки бетона по прочности B60). Указанная величина ожидаемо выше расчетной несущей способности по грунту.

Исследование работы сваи, взаимодействующей с большим числом слоев грунта, производится по тому же принципу, а именно учетом долей нагрузки. При оценке несущей способности сваи полной рабочей длины 25,4 м с учетом контрольной осадки  $S_{ref} = 21,3 \text{ мм}$  (см. табл. 3),

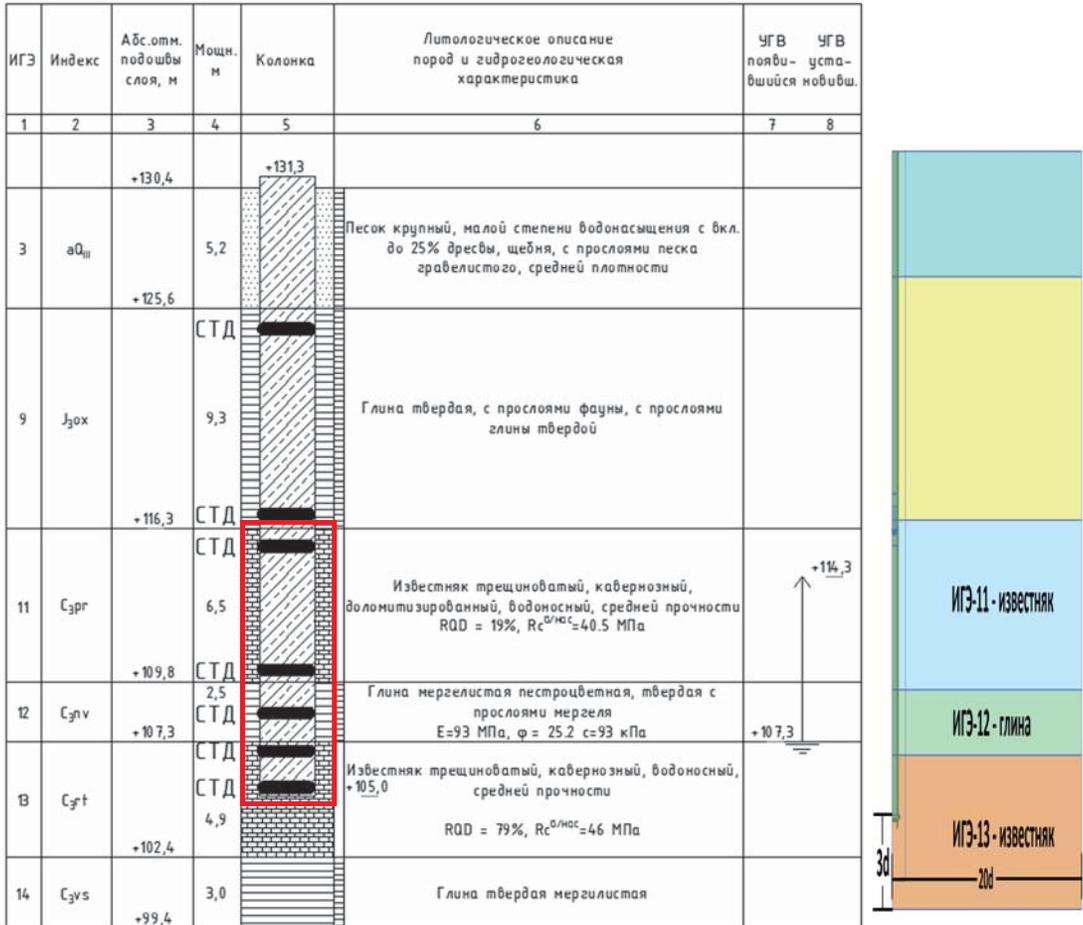
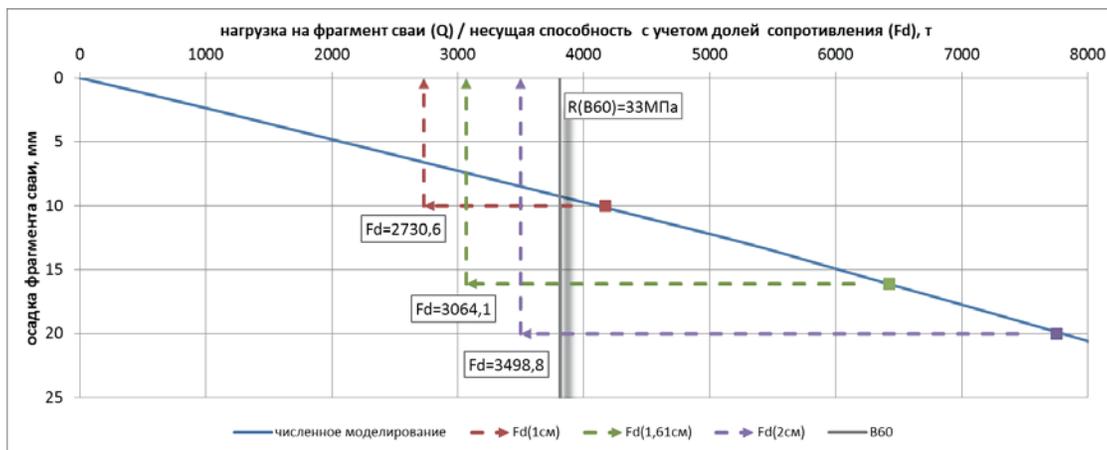


Рис. 5. Инженерно-геологическое строение участка экспериментальной сваи. Красный прямоугольник – фрагмент № 2 сваи, участвующий в численном моделировании. Справа представлена расчетная схема для численного моделирования

Fig. 5. Geotechnical strata of the test pile site. Red rectangle – section No. 2 of the pile used in the numerical simulation. A numerical simulation model is shown on the right

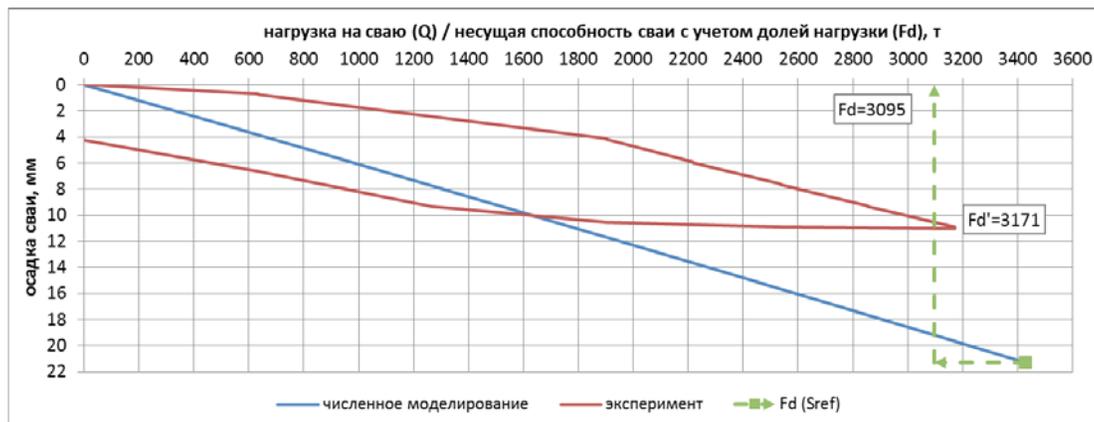
сопротивление дисперсных грунтов, расположенных выше, определяется суммированием согласно СП 24.13330 [3] и добавляется в долю нагрузки, воспринимаемую дисперсными грунтами,  $\eta_f$ . Как и в предыдущем примере, первым мобилизуется сопротивление на боковой поверхности сваи в дисперсном грунте. Полная несущая способность составляет  $F_d^{расч} = F_{d, rock} + \Sigma F_{df} = 30332,3$  кН (3095 т). Полученная величина близка к значению экспериментальной несущей способности  $F_d^{экспер} = 31000$  кН (3171 т).

Сопоставление графиков «нагрузка – осадка» и значений полной несущей способности сваи, определенных в ходе эксперимента и по предложенной методике, представлено на рис. 7.



**Рис. 6.** График «осадка – нагрузка» фрагмента сваи, полученный по результатам численных расчетов, и значения полной несущей способности с учетом долей сопротивления по слоям грунта в диапазоне величины контрольной осадки

**Fig. 6.** Settlement-load diagram for a pile section obtained using the numerical calculation results and the total bearing capacity, taking into account the resistance proportions according to soil layers within the reference settlement range



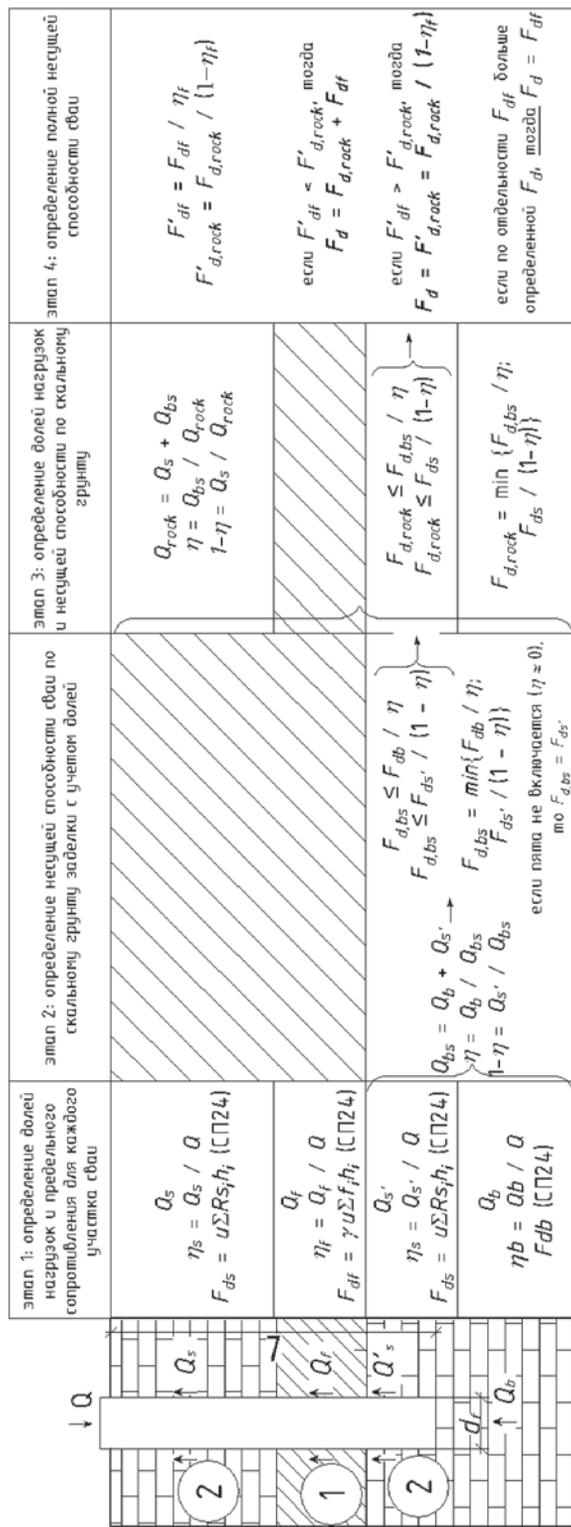
**Рис. 7.** Графики зависимости «нагрузка – осадка», полученные по результатам эксперимента и численно-аналитического метода с контрольной осадкой  $S_{ref} = 21,3$  мм

**Fig. 7.** Load-settlement dependency graphs obtained according to the experimental results and via the numerical-analytical method at a reference settlement of  $S_{ref} = 21.3$  mm

## Заключение

Для оценки расчетной несущей способности сваи в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными, следует учитывать разные степени мобилизации сопротивлений дисперсного и скального грунтов ввиду их существенно различной прочности и жесткости. Суммирование всех предельных сопротивлений скальных и дисперсных грунтов без ограничений излишнего задействования сопротивлений может существенно завязать несущую способность сваи по грунту.

Представлена методика оценки расчетного предельного сопротивления скального основания сваи с использованием численного моделирования совместно с табулированными и аналитическими решениями.



$Q_s + Q_f + Q_{s'} + Q_b = Q$   
 $\eta_s + \eta_f + \eta_{s'} + \eta_b = 1$

**Рис. 8.** Блок-схема определения несущей способности свай по грунту для расчетной схемы взаимодействия свай со скальным грунтом с прослойкой дисперсного грунта

**Fig. 8.** Flowchart for determining bearing capacity for pile interacting with rocks interbedded with cohesive soil

Предложена формула для определения контрольной осадки  $S_{ref}$ , которая может быть использована как критерий достижения предельного сопротивления основания сваи в скальных грунтах по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием по перемещениям сваи при выполнении численного моделирования.

Приведены примеры расчета несущей способности сваи в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, с сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными по натурным испытаниям свай.

## Список литературы

1. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. Москва: Стандартиформ; 2020.
2. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартиформ; 2015.
3. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. Москва: Стандартиформ; 2017.
4. СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 (с изменением № 1). Москва: Стандартиформ; 2019.
5. *Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В., Брыксина А.А.* Исследование работы свай в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, на действие вертикальной нагрузки. Отчет о НИР. Москва: НИИОСП; 2021.
6. *Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В., Павловский Н.А.* Разработка методики оценки чувствительности расчетных моделей фундаментов и сооружений, взаимодействующих с основанием, для обеспечения требуемой степени надежности. Отчет о НИР. Москва: НИИОСП; 2020.
7. *Разводовский Д.Е., Скориков А.В.* Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов. Вестник НИЦ «Строительство». 2020;26(3):74–85. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\[26\]-74-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3[26]-74-85)
8. *Скориков А.В., Павловский Н.А.* Стохастический подход к оценке надежности результатов расчета оснований и фундаментов в зависимости от чувствительности МКЭ-моделей. Вестник НИЦ «Строительство». 2021;29(2):101–111. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\[29\]-101-111](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2[29]-101-111)
9. *Rowe R.K., ed.* Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook. New York: Springer; 2001. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1729-0>
10. *Haberfield C.M., Lochaden A.L.E.* Analysis and design of axially loaded piles in rock // Journal of rock mechanics and geotechnical engineering. 2013;(3):535–548.
11. *Shulyatiev O.A., Ladyzhenskyy I.G., Yastrebov P.I.* Skyscrapers of “Moskva-City” Business Center – Tests of Bored Piles. In: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris; 2013.

## References

1. State Standard 25100-2020 Soils. Classification. Moscow: Standartinform Publ.; 2020 (in Russian).
2. State Standard 27751-2014 Reliability of building structures and foundations. Basic provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2015 (in Russian).
3. SP 24.13330.2011 Pile foundations. Updated edition SNiP 2.02.03-85. Moscow: Standartinform Publ.; 2017 (in Russian).
4. SP 23.13330.2018 Foundations of hydraulic structures. Updated edition SNiP 2.02.02-85 (with edition No. 1). Moscow: Standartinform Publ.; 2019 (in Russian).
5. *Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Bryksina A.A.* Study of the work of piles in rocky soils overlaid with cohesive soils on the effect of vertical loading. Report on research. Moscow: NIIOSP; 2021 (in Russian).
6. *Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Pavlovsky N.A.* Development of a methodology for assessing the sensitivity of computational models of foundations and structures interacting with soil basement to ensure the required degree of reliability. Report on research. Moscow: NIIOSP; 2020 (in Russian).

7. *Razvodovsky D.E., Skorikov A.V.* Problems and possible ways of development of pile design building codes. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020;26(3);74–85 (in Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-74-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85)
8. *Skorikov A.V., Pavlovsky N.A.* A Stochastic approach to assessing the reliability of the calculation results of bases and foundations depending on the sensitivity of the Fem-models. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;29(2):101–111 (in Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-101-111](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-101-111)
9. *Rowe R.K., ed.* Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook. New York: Springer; 2001. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1729-0>
10. *Haberfield C.M., Lochaden A.L.E.* Analysis and design of axially loaded piles in rock // Journal of rock mechanics and geotechnical engineering. 2013;(3):535–548.
11. *Shulyatiev O.A., Ladyzhenskyy I.G., Yastrebov P.I.* Skyscrapers of “Moskva-City” Business Center – Tests of Bored Piles. In: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris; 2013.

## Информация об авторах / Information about the authors

**Игорь Вячеславович Колыбин**, канд. техн. наук, директор НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: [kolybin@eccpf.ru](mailto:kolybin@eccpf.ru)

**Igor V. Kolybin**, Cand. Sci. (Engineering), Director of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [kolybin@eccpf.ru](mailto:kolybin@eccpf.ru)

**Дмитрий Евгеньевич Разводовский**, канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: [79165206707@yandex.ru](mailto:79165206707@yandex.ru)

**Dmitry E. Razvodovsky**, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Scientific Director of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [79165206707@yandex.ru](mailto:79165206707@yandex.ru)

**Андрей Викторович Скориков**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: [andr-stab@mail.ru](mailto:andr-stab@mail.ru)

**Andrey V. Skorikov**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Calculation Methods for Underground Structures and Geotechnical Prediction of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [andr-stab@mail.ru](mailto:andr-stab@mail.ru)

**Александра Андреевна Брыксина**✉, старший научный сотрудник лаборатории методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: [chepurnova@eccpf.ru](mailto:chepurnova@eccpf.ru)

тел.: +7 (916) 339-38-00

**Aleksandra A. Bryksina**✉, Senior Researcher of the Laboratory of Calculation Methods for Underground Structures and Geotechnical Prediction of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [chepurnova@eccpf.ru](mailto:chepurnova@eccpf.ru)

tel.: +7 (916) 339-38-00

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author