

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 624.154

DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.1

## Расчет несущей способности свай-стоек с учетом трения-сцепления на поверхности сваи

В.С. Уткин

*Вологодский государственный университет (ВоГУ), 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Недостатком существующего расчета сваи-стойки по несущей способности грунта основания является неучет в ее работе грунта основания выше скального или малосжимаемого слоя грунта во всех случаях в соответствии с СП 24.13330.2011. Однако учет несущей способности этого слоя грунта в работе сваи-стойки на восприятие нагрузки (с учетом веса сваи) может существенно повысить ее расчетную несущую способность по критерию несущей способности грунта основания в комплексе с работой грунта под нижним концом сваи и повысить расчетную надежность сваи-стойки по несущей способности грунта основания. Цель исследования — повышение достоверности результатов расчета несущей способности свай-стоек в грунте основания, выявление существующего резерва несущей способности сваи-стойки по критерию несущей способности грунта основания благодаря учету сил трения – сцепления на боковой поверхности сваи.

**Материалы и методы.** Объект исследования — сваи-стойки из любых применяемых материалов. Методы расчетов свай-стоек построены на основе информации о значениях сил трения – сцепления и их распределения по длине сваи в расчетной модели предельного состояния по несущей способности грунта основания.

**Результаты.** Представлена расчетная формула предельной нагрузки при сжатии сваи-стойки в грунте основания по несущей способности грунта основания фундамента и формула коэффициента запаса сваи по несущей способности грунта основания. Расчет несущей способности сваи по прочности материала приведен в ссылках на литературу.

**Выводы.** Разработан метод расчета несущей способности свай-стоек по несущей способности грунта основания под нижним концом сваи и грунта по ее длине, который может найти применение и для расчетов несущей способности щелевых фундаментов глубокого заложения. Приведена количественная оценка сваи-стойки на стадии проектирования объекта со свайным основанием, сделаны предпосылки для дальнейших исследований работы свай-стоек и разработки норм проектирования различных свай по материалу, работе, способам погружения в грунт и т.д.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** свая-стойка, скальный грунт, грунт выше скального, несущая способность по грунту, работа сваи в грунте, расчет несущей способности, предельная несущая способность, предельная нагрузка, коэффициент запаса

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Уткин В.С. Расчет несущей способности свай-стоек с учетом трения-сцепления на поверхности сваи // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.1

## Bearing strength calculation of end-bearing piles under recognition of cohesive friction on the pile surface

Vladimir S. Utkin

*Vologda State University (VSU), 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** It is a drawback of the existing end-bearing pile design method for soil base bearing capacity that the latter is not taken into account in the assessment of the foundation soil action above the rock or a low-compression soil layer in all cases in accordance with the Building Code 24.13330.2011. However, taking into account the bearing capacity of this layer of the soil base in the load accommodation by the end-bearing pile (under recognition of the pile weight) could increase its calculated bearing capacity by the respective value of the soil base bearing capacity in combination with the soil support action under the pile's lower end. The objective of the research is improving the trustworthiness of the calculation result of

the bearing strength of end-bearing piles in the soil base, identifying the pile's bearing strength reserve by taking in account the additional soil base bearing capacity due to the cohesive friction on the side surface of the pile.

**Materials and methods.** The object of the research are piles of any applicable materials. The methods of calculation of the end-bearing piles are based on on cohesive friction values and their distribution along the pile length in a limit state calculation model in terms of the soil base bearing capacity.

**Results.** The paper presents the equation of the ultimate compression load of the end-bearing pile in terms of the foundation base soil bearing capacity and the formula for the base soil bearing capacity reserve factor of the pile. The calculation of the pile bearing strength in terms of the material strength is referenced in the bibliography.

**Conclusions.** A calculation method of end-bearing piles bearing strength was developed based both on the bearing capacity of soil base under the pile lower end and the additional soil bearing capacity along the flanks of the pile. The method could be applied also for calculations of the bearing strength of deep slot-type foundations. A quantitative assessment of the end-bearing pile on the design stage of a building with a pile foundation is given, prerequisite is made for further studies of the action of end-bearing piles and development of design codes for various piles in terms of material, type of support action, methods of immersion in the soil, etc.

**KEYWORDS:** end-bearing pile, rock, soil above the rock, soil bearing capacity, pile action in the soil, bearing strength calculation, ultimate bearing strength, load limit, reserve factor

**FOR CITATION:** Utkin V.S. Bearing strength calculation of end-bearing piles under recognition of cohesive friction on the pile surface. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(2):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.1 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями Межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» необходимо проводить расчеты конструкций по надежности (безопасности эксплуатации) и несущей способности для недопущения в них превышения предельных состояний (п. 3.1.1) и обеспечения безопасной эксплуатации. В число таких элементов входят сваи-стойки. По СП 24.13330.2011 сваи-стойки рассчитываются по прочности материала сваи при их сжатии эксплуатационной нагрузкой и по несущей способности грунта под нижним концом сваи. Влияние грунта основания, расположенного выше нижнего конца сваи, на несущую способность сваи-стойки по СП 24.13330.2011 и другим нормам не учитывается. Это можно объяснить тем, что перемещение сваи, упирающейся в скальный или малосжимаемый грунт, практически равно нулю, поэтому нет движения сваи и, следовательно, якобы нет воздействия сил трения на сваю. В действительности силы трения возникают не только при движении сваи, но и при отсутствии механического перемещения сваи как целого, а именно в результате микроперемещений (деформаций) поверхностных слоев сваи, находящихся в контакте с грунтом основания [1–7]. Второй, более объективной причиной неучета работы грунта в работе сваи-стойки может быть оправдано то, что на нижнем конце сваи возникают отрицательные силы трения – сцепления  $f_{отр}(x)$  на поверхности сваи в результате ее деформирования, вызванного силой реакции в нижнем опорном конце сваи  $\sigma_{гр}A$  или  $RA$ , направленной вверх. В этом слу-

чае отрицательные силы трения – сцепления  $f_{отр}(x)$  от реакции  $\sigma_{гр}A$  или  $RA$  будут направлены вниз сваи, т.е. противоположно направлению сил трения – сцепления  $f(x)$  от нагрузки в верхнем конце сваи и будут снижать ее положительную роль в работе сваи. Однако роль и значение отрицательных сил трения – сцепления в работе свай-стоек пока не выявлены.

Учет работы грунта основания в сваях-стойках при расчете несущей способности по критерию несущей способности грунта основания и снижение отрицательных сил трения  $f_{отр}(x)$  представляют практический интерес, так как возможны использование резерва несущей способности грунта основания и экономический эффект при устройстве свайного основания.

Изучению влияния сил трения – сцепления на поверхности свай посвящены работы [8–10]. Расчет свай-стоек без учета работы верхнего слоя грунта основания рассмотрен в трудах [11, 12].

Метод расчета несущей способности свай-стоек в основаниях фундаментов приведен по СП 24.13330.2011 «Свайные основания», однако без учета несущей способности грунта основания выше скального или малосжимаемого грунта. В последнее время предложены новые расчетные схемы работы свай и свай-стоек в грунте оснований, в которых учитывается новый подход к описанию работы свай под нагрузкой в грунте основания в состоянии их покоя, а не «срыва» [2–4]. Этому вопросу посвящены статьи [13–15]. В публикации [16] продемонстрированы результаты наблюдений за боковыми силами трения свай при различных силах нагружения. На основе проведенных экспериментальных исследований [17] выявлен механизм тре-

ния на поверхности сваи, находящейся в грунте под нагрузкой. В свете обсуждаемой в статье проблемы представляют интерес работы [18–20].

В книге [21] рассмотрена работа сваи в грунте основания с учетом деформации сжатия ствола сваи, что нашло отражение в настоящей статье, где источником сил трения принято микроперемещение (деформация) поверхностных слоев сваи, находящихся в контакте с грунтом основания.

Подводя итог, можно отметить ограниченность исследований по разработке методов расчета несущей способности свай-стоек с учетом несущей способности грунта основания выше скального, необходимость использования резерва несущей способности свай за счет учета работы грунта выше скального и разработку методов расчета свай-стоек по несущей способности грунта выше скального, что повысит их надежность и приведет в некоторых случаях (при большой длине сваи) к экономическому эффекту.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки метода расчета несущей способности сваи-стойки с учетом работы грунта, расположенного выше скального или малосжимаемого, предварительно рассмотрим работу сваи-стойки в грунте основания. В отличие от существующего представления работы сваи-стойки по СП 24.13330.2011 на практике могут реализовываться [22–24] различные варианты функционирования сваи-стойки в грунте основания после ее забивки (погружения в грунт) до скального или малосжимаемого грунта, представленные на рис. 1, после их нагружения различной по значению силой  $F$ .

Вариант по рис. 1, *a* соответствует малой нагрузке  $F_1$  или большой длине сваи, а также при глубоко залегании скального грунта. Участок сваи длиной  $(H - h)$  по варианту 1, *a* в расчетах по несущей способности грунта основания является резервным элементом. Использование такой сваи неэффективно по расходу материала сваи. Вариант по схеме (рис. 1, *b*) нагружен силой  $F > F_1$ , но меньше предельной нагрузки  $N_d$ , как показано на схеме (рис. 1, *c*) при полном использовании несущей способности грунта основания. Нагрузка на сваю по рис. 1, *b* определяется из условия равновесия сил по схеме (рис. 1, *b*) по формуле:

$$F = \sigma_{\text{гр}} A + u \int_0^h f(x) dx - u \int_h^H f_{\text{отр}}(x) dx. \quad (1)$$

Отрицательные силы трения – сцепления  $f_{\text{отр}}(x)$  возникают вследствие деформаций материала сваи от силы  $\sigma_{\text{гр}} A$ . При защите сваи в нижнем конце от воздействия силы  $f_{\text{отр}}(x)$ , например при изоляции нижней части сваи от грунта основания, на участке длиной  $H - h$ , формула (1) представится в виде:

$$F = \sigma_{\text{гр}} A + u \int_0^h f(x) dx. \quad (2)$$

В дальнейшем в данной работе будем рассматривать расчет несущей способности сваи, мерой которой будет значение предельной нагрузки  $N_d$  по варианту расчетной схемы рис. 1, *c*, которая формируется из схемы рис. 1, *b* в результате возрастания нагрузки  $F$ , без учета  $f_{\text{отр}}(x)$ .

В формуле (2) напряжение  $\sigma_{\text{гр}}$  в скальном или малосжимаемом грунте основания под нижним концом сваи можно определить по результатам испытаний грунта (например по методу, рассмотренному в статьях [23, 25]) или по испытаниям пробной сваи

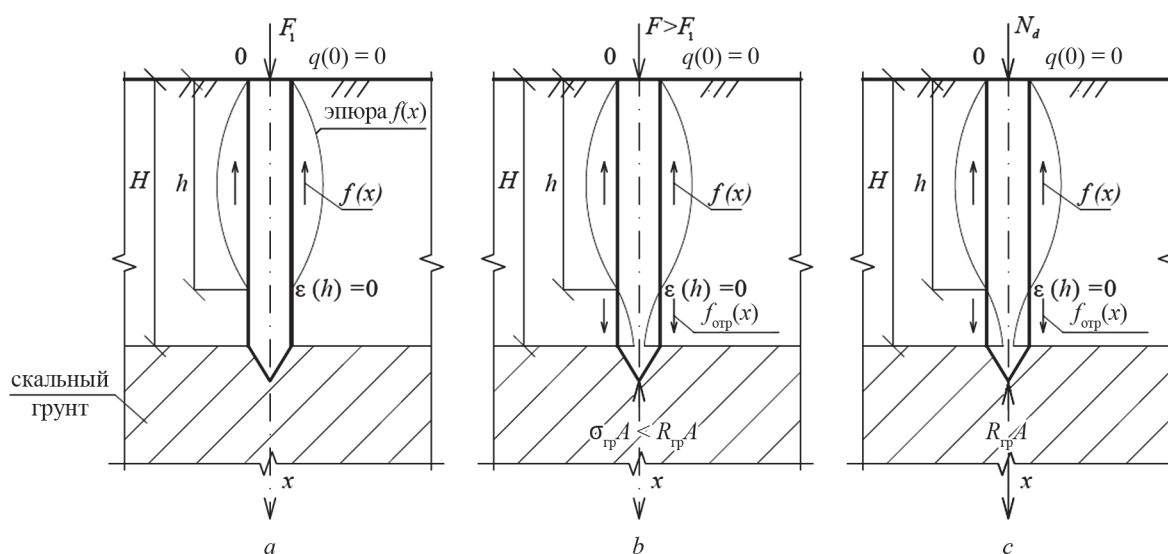


Рис. 1. Варианты работы сваи-стойки в грунте основания:  $F$  — расчетная нагрузка (с учетом веса сваи);  $N_d$  — предельная нагрузка по несущей способности грунта основания;  $f_{\text{отр}}(x)$  — отрицательные силы трения–сцепления