

## 05.23.02 ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

### Оценка несущей способности свай при испытании статической нагрузкой

УДК 624.154.5

**Глухов В.С.**

Канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Геотехника и дорожное строительство», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (г. Пенза); e-mail: info@novotech.ru

**Гаврилов П.К.**

Аспирант кафедры «Геотехника и дорожное строительство», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (г. Пенза); e-mail: pavel.gavrilov58@yandex.ru

Статья получена: 10.11.2020. Рассмотрена: 13.11.2020. Одобрена: 05.12.2020. Опубликовано онлайн: 30.12.2020. ©РИОР

**Аннотация.** Целью настоящего исследования является оценка несущей способности буронабивных свай с уширением (БНСу), сформированным раскатыванием щебня. Проведена серия статических испытаний БНСу согласно требованиям действующей нормативной документации, осуществлен анализ полученных результатов. На основании проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о целесообразности учёта нормативных значений осадок при определении несущей способности свай по грунту. Выполнено сопоставление результатов натуральных испытаний с расчётными значениями, определенными в соответствии с рекомендациями СП 24.13330.2011. Отмечено, что за критерий фактической несущей способ-

ности следует принимать нагрузку, соответствующую моменту «срыва» свай.

**Ключевые слова:** буронабивная свая с уширением, раскатка, несущая способность, статические испытания, предельное сопротивление, осадка.

В настоящее время при устройстве фундаментов современных зданий и сооружений значительное распространение получили варианты оснований с использованием свай как наиболее надежное решение при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях городских агломераций. Применение свайных вариантов фундаментов позволяет обеспечить требуемую надежность и долговечность надземных конструкций [1].

#### ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF PILES DURING STATIC LOAD TEST

**Glukhov V.S.**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Geotechnics and Road Construction, Penza State University of Architecture and Construction, Penza; e-mail: info@novotech.ru

**Gavrilov P.K.**

Postgraduate Student, Department of Geotechnics and Road Construction, Penza State University of Architecture and Construction, Penza; e-mail: pavel.gavrilov58@yandex.ru

**Manuscript received:** 10.11.2020. **Revised:** 13.11.2020. **Accepted:** 05.12.2020. **Published online:** 30.12.2020. ©РИОР

**Abstract.** The purpose of this research is to estimate the bearing capacity of bored piles with broadening, formed by stone rolling.

A series of static tests of the existing piles was performed in accordance with the requirements of the current regulatory documentation, the analysis of the obtained results was carried out. According to this experimental researches, was made a conclusion about the advisable to take into account the standard values of settlements at the determining of the bearing capacity of piles by ground. The results of field tests were compared with the calculated values, determined by calculation with the recommendations of SP 24.13330.2011. Noted, that the value of load, corresponding to the moment of the pile «failure», should be taken as a criterion of the factual bearing capacity.

**Keywords:** bored piles with broadening, expansion, bearing capacity, static tests, critical resistance, settlement.

Несущая способность свай является одним из наиболее важных критериев при оценке эффективности используемых инженерных решений. С практической точки зрения определение несущей способности свай еще до начала выполнения работ по устройству последних считается наиболее важным вопросом, решение которого является необходимым условием надежности при устройстве рассматриваемых фундаментов и обеспечения максимального использования несущей способности грунтов основания. Таким образом, совершенствование традиционных методик определения несущей способности свай имеет особую важность в современном геотехническом проектировании, что обуславливает актуальность дальнейшего исследования данного вопроса.

Применение основных положений строительных нормативов, теории упругости, механики грунтов и метода конечных элементов строительной механики позволяет спрогнозировать совместную работу свай и окружающего грунтового массива еще на стадии проектирования. В то же время все результаты, полученные при выполнении численных расчетов, требуют апробации путём проведения экспериментальных исследований с учётом реальных условий площадки строительства. С этой целью в геотехническом строительстве применяют полевые испытания грунтов натурными или эталонными сваями.

Известно, что среди всех методов определения несущей способности свай наиболее достоверные результаты дают статические испытания свай вдавливающей нагрузкой, выполненные согласно ГОСТ 5686-2012. Данный способ нашел свое применение на различных этапах строительства — как на стадии выполнения изысканий, до начала рабочего проектирования, так и в процессе массового устройства свай.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в действующих нормативных документах, для фундаментов зданий и сооружений (кроме мостов и гидротехнических сооружений) за частное значение предельного сопротивления свай  $F_u$  действующему усилию следует принимать такую нагрузку, при которой испытываемая свая получит осадку, значение которой определяется по формуле:

$$S = \zeta \cdot S_{u,mi}, \quad (1)$$

где  $S_{u,mi}$  — предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания, принимаемое согласно СП 22.13330.2016;

$\zeta$  — коэффициент перехода от предельного значения средней осадки фундамента здания или сооружения к осадке свай, полученной при статических испытаниях с условной стабилизацией (затуханием) осадки, и составляет 0,2 (согласно п. 7.3.5. СП 24.13330.2011).

По мнению авторов, действующие нормативные рекомендации определения несущей способности грунтов с использованием зависимости «нагрузка-осадка» не отражают реальные особенности грунтовых условий и современных технологий. Применение традиционного подхода не даёт возможность определить действительную несущую способность свай.

Анализ вышеуказанных зависимостей, выявленных при многочисленных испытаниях свай в различных грунтовых условиях строительных площадок, показывает, что зачастую полученное значение частного сопротивления с учётом  $S_{u,mi}$  не характеризует предельную работу свай в стадии исчерпания предельного состояния грунтового основания. Действительно же величина несущей способности свай должна соответствовать такому значению приложенного усилия, при котором имеет место «срыв» свай — явление, характеризующееся постоянным нарастанием перемещений свай без увеличения нагрузки [2]. В соответствии с выполненными наблюдениями можно сделать вывод, что «несущая способность» не может быть определена как величина, зависящая от предельно допускаемых значений осадок для проектируемого здания или сооружения, приводимых в действующих нормативных документах. При таком подходе «несущая способность» зависит не столько от грунтовых условий свай, а в большей степени от конструктивных особенностей надземной части объекта.

С целью совершенствования традиционной методики оценки фактической несущей способности свай авторами настоящей статьи проведены статические испытания свай на площадке строительства, расположенной в г. Тольятти Самарской области. На данном объекте было выполнено устройство буронабивных свай с

уширением (БНСу), сформированным путём раскатки щебня с использованием поступательно-вращающегося наконечника рабочего органа буровой установки. Применение данной технологии позволяет обеспечить повышение сопротивления грунта под уширением вследствие формирования уплотненной зоны, в пределах которой увеличивается прочность и снижается деформативность грунтового основания [3].

Опытные БНСу представляют собой сваи с длиной ствола  $L = 6,5$  м, диаметром  $d = 0,6$  м и с уширением  $D_y = 1,0$  м. Материал свай — бетон  $B20 W6$ , объем щебня в уширении  $V_{щ} = 1,0$  м<sup>3</sup>.

Геологическое строение исследуемого участка характеризуется развитием мощной толщи аллювиальных отложений среднего звена ( $aQII$ ), представленных в основном суглинками и песками, перекрытых с поверхности насыпными грунтами. Условия залегания грунтов показаны на инженерно-геологическом разрезе (рис. 1), где выделено два элемента (ИГЭ):

- $tQIV$  ИГЭ 1 — насыпной грунт: суглинок, перемешанный с почвой суглинистой, включениями дресвы, щебня, строительного мусора. Встречен во всех скважинах. Мощность слоя — 2,0–3,0 м;
- $aQII$  ИГЭ 2 — суглинок желтовато-коричневый твёрдой и полутвёрдой консистенции. Вскрыт всеми скважинами. Подстилает насыпные грунты ИГЭ 1 на глубинах 2,0–3,0 м, максимальная вскрытая мощность слоя — 8,0 м.

Подземные воды скважинами, пройденными до глубины 10,0 м, не вскрыты. Опасных физико-геологических процессов в районе строительства и прилегающих участков не выявлено. Физико-механические характеристики грунтов сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-механические характеристики грунтов**

№ ИГЭ	Название	$E$	$\phi$	$C$	$I_L$	$\gamma$
		МПа	град.	кПа	д.е.	т/м <sup>3</sup>
1	Насыпной грунт	—	—	—	0,14	1,92
2	Суглинок твёрдый и полутвёрдый, слабопросадочный	8,0	19,0	26,0	0,15	1,90
3	Супесь пластичная	22,0	24,0	13,0	0,18	1,95

На основании данных инженерно-геологических изысканий на стадии проектирования

произведена оценка несущей способности свай согласно методике, изложенной в п. 7.2.6 СП 24.13330.2011. Так, нормативная несущая способность БНСу составила  $F_{d,норм} = 42,0$  тс, при этом расчётно-допускаемая нагрузка  $N_{р.д}^{норм} = 30,0$  тс.

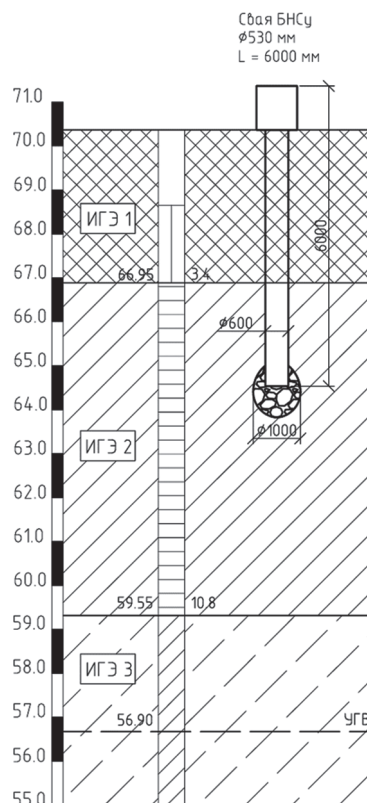


Рис. 1. Обобщенный инженерно-геологический разрез строительной площадки в месте проведения эксперимента

Несмотря на существенные преимущества применения технологии раскатки при устройстве скважин, данный метод устройства набивных свай не имеет достаточной нормативной базы для проектирования. В частности, в формуле (7.11) СП 24.13330.2011 не учитывается влияние уплотненного в результате раскатки грунта в околоствойном пространстве. Таким образом, фактические значения несущей способности свай могут быть занижены ввиду не использования прочностных характеристик грунта  $C$  и  $\phi$ , увеличивающихся в процессе формирования скважин [4].

Статические испытания свай производились в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2012. Передача нагрузки осуществлялась при помощи гидравлической системы, включающей в себя

насосную станцию марки НРГ-7160 и гидравлический домкрат марки ДГ200П150 грузоподъемностью до 200,0 тс (рис. 2). Контроль за величиной давления в системе выполнялся при помощи манометра с ценой деления 10,0 бар. В качестве опорной конструкции, воспринимающей вертикальную нагрузку отпора, применен испытательный стенд в виде стальной фермы, закрепленной к анкерным сваям. Для наблюдения за ходом развития осадок опытных свай использовалась реперная система с прогибомерами с ценой деления 0,1 мм. Принимая во внимание инженерно-геологические особенности площадки строительства, а также требования п. 6.8 ГОСТ 5686-2012, выполнялось замачивание основания свай. Данная процедура проводилась перед началом статического испытания и продолжалась вплоть до окончания последних. Замачивание грунта выполнялось через специальные траншеи, заполненные щебнем, устраиваемые по периметру испытываемой сваи на расстоянии 1,0 м от боковой поверхности.



Рис. 2. Общий вид испытательного стенда

На основании результатов предварительной оценки несущей способности свай была подготовлена программа испытаний, согласно которой максимальная нагрузка в ходе опыта составила 47,0 тс. При этом первые три ступени приняты равными 9,0 тс, последующие — 4,5 тс.

Переход к следующему этапу нагружения осуществлялся при достижении условной стабилизации перемещения сваи, при которой её осадка за отведенный интервал наблюдений не превышала 0,1 мм [5]. В целях доведения опытных свай до «срыва» допускалась передача дополнительной нагрузки.



Рис. 3. Установка гидравлического домкрата и реперной системы

Результаты экспериментальных исследований сведены в таблицы отсчетов вертикальных перемещений свай (табл. 2, 3), на основании которых построены графики зависимости осадки свай от нагрузки (рис. 4).

Таблица 2

#### Измерения перемещения сваи БНСу-1

Ступень нагрузки	Нагрузка, тс	Давление, бар	Осадка от ступени нагрузки, мм	Общая осадка, мм
1	9,0	31,8	0,31	0,31
2	18,0	63,5	1,18	1,49
3	27,0	95,3	3,11	4,29
4	31,5	111,1	3,72	6,83
5	36,0	127,0	3,65	10,48
6	40,5	143,0	5,32	15,80
7	45,0	158,9	8,79	24,59
8	47,0	165,91	6,68	31,27

Таблица 3

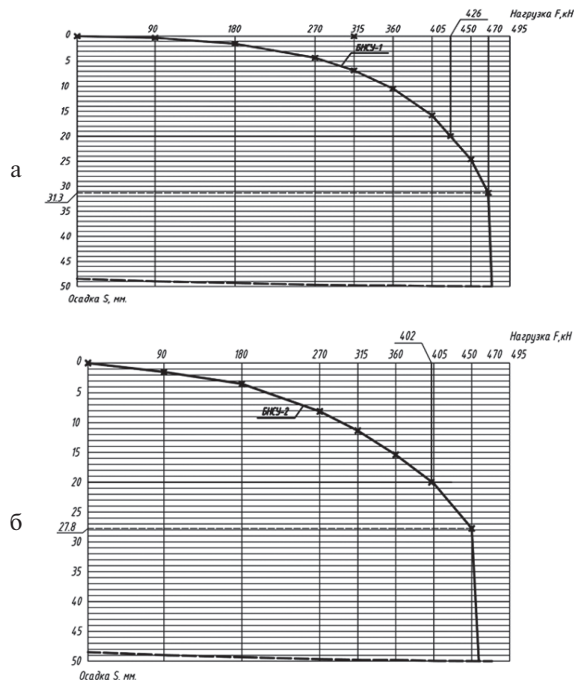
**Измерения перемещения сваи БНСУ-2**

Ступень нагрузки	Нагрузка, тс	Давление, бар	Осадка от ступени нагрузки, мм	Общая осадка, мм
1	9,0	31,8	1,50	1,50
2	18,0	63,5	5,24	3,49
3	27,0	95,3	4,64	8,12
4	31,5	111,1	3,21	11,33
5	36,0	127,0	4,06	15,39
6	40,5	143,0	4,76	20,15
7	45,0	158,9	7,55	27,70

Для производственных и гражданских зданий с железобетонным каркасом предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания  $S_{u,ml} = 100,0$  мм. Таким образом, по формуле (1):

$$S = 0,2 \cdot 100,0 = 20 \text{ мм.}$$

На основе графиков, представленных на рис. 4, можно сделать вывод о том, что фактическое значение осадки  $S = 20,0$  мм для сваи БНСУ-1 соответствует несущей способности  $F_d^{ct} = 426,0$  кН (42,6 тс), а для сваи БНСУ-2 — 402,0 кН (40,2 тс).



**Рис. 4.** График зависимости осадки  $S$  (мм) от нагрузки  $F$  (кН) при испытании свай: а) БНСУ-1; б) БНСУ-2

Таблица 4

**Сравнение полученных результатов**

Критерий наблюдения	БНСУ-1		БНСУ-2	
	$F_d^{ct}$ , кН	$N_{p.d.}$ , кН	$F_d$ , кН	$N_{p.d.}$ , кН
Расчётный метод (методика СП 24.13330.2011)	420,0	300,0	420,0	300,0
Нагрузка, соответствующая $S = 100 \times 0,2 = 20$ мм ( $F = f(S)$ )	426,0	355,0	402,0	335,0
Нагрузка, соответствующая моменту «срыва» ( $F_{кр}$ )	470,0	392,0	450,0	375,0

Проведение полевых экспериментальных исследований позволило подтвердить величину расчётно-допускаемой нагрузки на сваи, принятую на стадии проектирования, что свидетельствует об эффективности выбранных проектных решений. Анализ полученных результатов (табл. 4) позволяет утверждать, что фактическое значение несущей способности БНСУ, при котором происходит «срыв» сваи, больше частного сопротивления, соответствующего нормативной осадке  $S = 20,0$  мм. Разность между критической нагрузкой на буронабивную сваю и значением несущей способности, выявленным по стандартной методике, составляет 10÷12%, что является реальной величиной возможности повышения несущей способности оснований буронабивных свай в заданных условиях площадки строительства, выявленной натурными испытаниями.

Несмотря на достаточно высокую сходимость полученных результатов, выявлена необходимость совершенствования методики определения несущей способности свай, которая учитывала бы особенности изготовления свай по технологии раскатывания. Практическое применение результатов настоящей работы позволяет считать, что дальнейшие исследования в указанной области являются перспективными для изучения, учитывая широкое применение свайных фундаментов в качестве оснований зданий.

## Литература

1. *Гайдо А.Н.* Анализ результатов определения несущей способности грунтов [Текст] / А.Н. Гайдо, Г.В. Левинтов // *Вестник гражданских инженеров*. – 2013. – № 2. – С. 117–124.
2. *Гольдфельд И.З.* Долевая работа вертикально нагруженной сваи при статических испытаниях грунтов [Текст] / И.З. Гольдфельд // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации*. – 2018. – С. 469–481.
3. *Глухов В.С.* Исследование влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку [Текст] / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2011. – № 5-2. – С. 351а–354.
4. *Ланис А.Л.* Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатной скважине [Текст] / А.Л. Ланис, В.С. Воробьев, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2017. – № 9. – С. 31–40.
5. *Глухов В.С.* Рекомендации по определению несущей способности свай при погружении вдавливанием [Текст] / В.С. Глухов, Ю.С. Вишнякова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – № 3. – С. 107–112.

## References

1. Gajdo A.N., Levintov G.V. Analiz rezul'tatov opredelenija nesushhej sposobnosti gruntov [Analysis of the results of determining the bearing capacity of soils]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2013, I. 2, pp. 117–124.
2. Gol'dfel'd I.Z. Dolevaja rabota vertikal'no nagruzhennoj svai pri staticheskikh ispytaniyah gruntov [Shared work of a vertically loaded pile during static soil testing]. *Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii* [Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation]. 2018, pp. 469–481.
3. Gluhov V.S., Hranina O.V., Gluhova M.V. Issledovanie vlijanija ushirenija svaj v probityh skvazhinah na osadku [Investigation of the effect of pile broadening in drilled wells on settlement]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the South-West State University]. 2011, I. 5-2, pp. 351–354.
4. Lanis A.L., Vorob'ev V.S., Razuvaev D.A., Lomov P.O. Opredelenie nesushhej sposobnosti nabivnoj svai po gruntu, vypolnennoj v raskatnoj skvazhine [Determination of the bearing capacity of a rammed pile on the ground made in a rolling well]. *Izvestija Vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [Izvestiya vysshikh educational institutions. Construction]. 2017, I. 9, pp. 31–40.
5. Gluhov V.S., Vishnjakova Ju.S. Rekomendacii po opredeleniju nesushhej sposobnosti svaj pri pogruzhении vдавливаниem [Recommendations for determining the bearing capacity of piles during indentation]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction.]. 2019, I. 3, pp. 107–112.