

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-202-210

МЕТОД ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ С УШИРЕНИЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В. С. Глухов, П. К. Гаврилов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза, Россия

Аннотация. В статье рассматривается вопрос определения несущей способности свай по результатам статических испытаний. Авторами приведено обоснование необходимости совершенствования существующего подхода применительно к сваям в пробитых скважинах с уширением (СПСу). Для свай данного типа характерно проявление упругих деформаций основания, возникающих по мере завершения процесса втрамбовывания щебня и формирования уширенной пяты. Данный эффект становится особенно заметным во время статического нагружения, когда на начальных этапах фиксируется заметный скачок осадки. Авторами отмечается, что приведенный фактор оказывает значительное влияние на зависимость между осадкой и приложенной нагрузкой $S = f(F)$, что может привести к ошибочной интерпретации результатов статических испытаний свай.

Ключевые слова: сваи в пробитых скважинах, несущая способность, статические испытания, осадка, расчётно-допускаемая нагрузка, упругие деформации, грунтовое основание

METHOD OF ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF PILES IN PUNCHED HOLES WITH BROADENING USING STATIC TESTING RESULTS

V. S. Glukhov, P. K. Gavrilov

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

Annotation. The article discusses the issue of determining the bearing capacity of piles based on the results of static load tests. The authors provide a rationale for improving the existing approach in relation to piles in punched holes with broadening (SPSu). This type of pile is characterized by elastic deformation of the foundation, which occurs as the crushed stone is compacted and the expanded heel is formed. This effect becomes particularly noticeable during static loading, when a noticeable increase in settlement is observed in the initial stages. The authors note that this factor has a significant impact on the relationship between settlement and applied load $S=f(F)$, which can lead to incorrect interpretation of the results of pile's static load test.

Keywords: piles in punched holes, bearing capacity, static load test, settlement, design load, elastic deformations, ground base

Введение

В современной строительной практике широко применяются сваи заводского изготовления, погружаемые в грунт принудительными методами, а также буровые сваи, устраиваемые на площадке строительства в предварительно изготовленные скважины. Наиболее перспективным направлением

развития в области проектирования и устройства фундаментов считается разработка и внедрение в практику комбинированных свайных фундаментов, которые бы совмещали в себе основные преимущества классических вариантов свай.

Среди существующих технологий, наиболее полно удовлетворяющих этим требованиям, можно выделить сваи в пробитых скважинах с уширением (СПСу), технология устройства которых сопровождается вытеснением грунта. Данный тип свай объединяет в себе преимущества классических вариантов забивных и буронабивных свай, а также фундаментов, устраиваемых в вытрамбованных котлованах (ФВК).

Эффективность использования СПСу заключается в том, что в ходе пробивки скважины и формирования уширения создается уплотненный массив грунта. Околосвайная область грунтового основания обладает улучшенными прочностными характеристиками и сниженной сжимаемостью. Отсюда, образование уплотненной зоны в грунтовом основании в процессе устройства СПСу способствует увеличению их удельной несущей способности. Результаты ранее проведенных исследований позволяют рекомендовать использование свай данного типа в пылевато-глинистых грунтах с показателем текучести $0,2 \leq I_L \leq 0,5$, а также при устройстве фундаментов в просадочных и маловлажных песчаных грунтах [1].

Тем не менее, на текущий момент не существует достаточного систематизированного метода для оценки несущей способности свай данного типа на основе результатов статических испытаний. В частности, остается нерешенной проблема выбора единого подхода к обработке полученных данных. Требования, изложенные в отечественных и зарубежных нормативных документах для интерпретации результатов статических испытаний, содержат определенные противоречия, касающиеся свай, изготовленных с использованием технологии вытрамбовки [2, 3].

Основная часть

Согласно СП 24.13330.2021, «несущая способность сваи - предельное сопротивление основания одиночной сваи по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием». Это означает, что значения несущей способности, выявленные в соответствии с рекомендациями действующих норм, принимаются с определённым запасом при достижении «заранее заданного» перемещения сваи. Под «заранее заданным» перемещением понимается величина осадки S , определяемая в соответствии с пунктом 7.3.5 СП 24.13330.2021 [4]:

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

где $S_{u,mt}$ — предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания или сооружения, устанавливаемое согласно приложению Г СП 22.13330.2016; ζ — коэффициент перехода от предельного значения

средней осадки фундамента здания или сооружения $S_{u,mt}$ к осадке сваи, полученной при статических испытаниях с условной стабилизацией (затуханием) осадки, равный $\zeta = 0,2$.

Согласно действующим рекомендациям, несущая способность сваи определяется в соответствии со значением предельной средней осадкой здания $S_{u,mt}$. Это значение может варьироваться в пределах $S_{u,mt} = 100,0 \div 400,0$ мм для гражданских и промышленных сооружений. Таким образом, для одной и той же сваи в заданных грунтовых условиях может быть установлено несколько различных значений несущей способности, которые зависят от изменений в конструкции надземной части здания. Следует подчеркнуть, что принятый метод интерпретации результатов статических испытаний не учитывает размеры опытной сваи и не рассматривает процесс уплотнения или разуплотнения околосвайного грунтового массива, который происходит при устройстве СПСу.

С точки зрения ключевых принципов механики грунтов, наиболее целесообразно рассматривать несущую способность сваи как величину приложенного усилия, при которой происходит полное исчерпание прочности грунтового основания, то есть достижение момента «срыва» сваи. Это сопровождается постоянным и практически равномерным увеличением осадки опытной сваи без увеличения нагрузки. Данное условие в основном соответствует требованиям расчёта оснований по первой группе предельных состояний и не должно зависеть от предельных средних осадок $S_{u,mt}$, определяемых для сооружений с учётом конструктивных особенностей надземной части. Расчётно-допускаемая нагрузка, устанавливаемая на сваи на этапе проектирования, в большей степени отвечает условию обеспечения осадки, не превышающей $S_{u,mt}$, и определяется с учётом необходимой надёжности и устойчивости проектируемого сооружения.

Сваи, устраиваемые в пробитых скважинах с уширением по технологии вытрамбовки, характеризуются наличием упругих деформаций основания по мере завершения процесса втрамбовывания щебня в уширение [5]. Эта особенность становится очевидной во время статического нагружения, когда на начальных ступенях наблюдается значительный всплеск осадки. Указанный фактор существенно влияет на зависимость между осадкой и приложенной нагрузкой $S = f(F)$, что может привести к неверной интерпретации результатов статических испытаний свай. Предложенная в действующих нормативных документах методика анализа данных статических испытаний не учитывает деформативные свойства и геометрические параметры уширенного основания, что, безусловно, приводит к неточностям при оценке совместной работы испытываемой сваи в пробитой скважине с уширением и окружающего грунтового основания.

Предлагаемый метод оценки несущей способности СПСу основывается не на значениях допустимых проектных осадок, а на нагрузке, приводящей к потере сопротивления грунтового основания, которую характеризует «срыв» сваи или максимальная нагрузка $F_{\max}$, которую необходимо достигнуть в процессе испытания. При этом $F_{\max}$ определяется как $1,4F_d$, где F_d — несущая способность сваи, установленная на этапе проектирования с использованием табличных значений R и f_i (п. 7.2.10 СП 24.13330.2021) или по результатам статического зондирования. С учетом допустимых осадок $S_{u,mt}$ для зданий и сооружений назначается расчётно-допускаемая нагрузка, которая вычисляется из условия $N_{p.d.} = F_d/1,2$. В то же время перемещение опытной сваи должно соответствовать осадке $S \leq S_{u,mt} \cdot \zeta$. Рассматриваются три типичных случая (рис. 1).

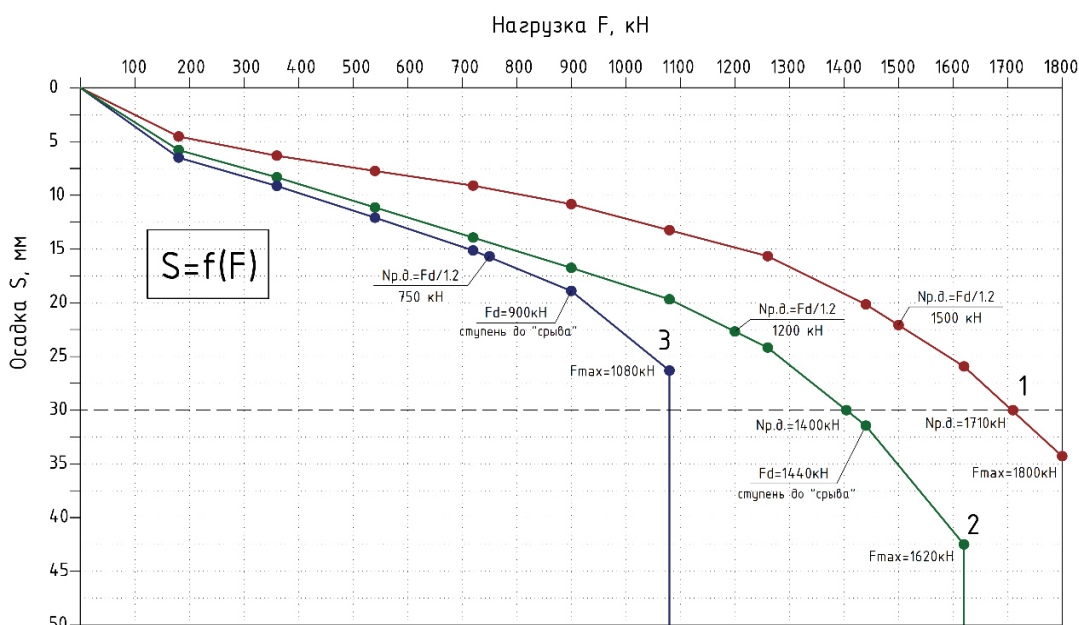


Рис. 1. Интерпретация результатов статических испытаний свай в пробитых скважинах с уширением (три характерных случая)

Случай 1. В ходе статического нагружения опытной СПСу при достижении $F_{\max} = 1,4F_d$ «срыв» сваи не был достигнут. График зависимости «осадка-нагрузка» имеет вид монотонно убывающей кривой. Окончательная осадка на последней ступени нагружения при $F_{\max}$ больше заданного перемещения $S = \zeta \cdot S_{u,mt}$. За несущую способность принимаем максимальное действующее усилие при испытании $F_{\max} = 1,4F_d$ (1800,0 кН в примере). В случае, если значение расчётно-допускаемой нагрузки $N_{p.d.} = F_{\max}/1,2$ (1500,0 кН) меньше усилия, соответствующего осадке $S = \zeta \cdot S_{u,mt}$ (1710,0 кН), за величину $N_{p.d.}$ принимаем наибольшее из значений на графике $S=f(F)$.

Случай 2. При выполнении статических испытаний опытная СПСу доведена до «срыва» при нагрузке 1620,0 кН. В данном случае предлагается за величину несущей способности принять ступень F_n , предшествующую

«срыву», т. е. $F_d = 1440,0$ кН. Расчётно-допускаемую нагрузку следует назначить из условия $N_{p.d} = F_d/1,2 = 1200,0$ кН, если при значении F_d перемещение на графике «осадка-нагрузка» $S \leq \zeta \cdot S_{u,mt}$. В случае, когда значению F_d соответствует перемещение $S > S_{u,mt} \cdot \zeta$ на графике $S = f(F)$, за расчётно-допускаемую нагрузку по результатам испытаний следует принять усилие, соответствующее перемещению $S = \zeta \cdot S_{u,mt}$ (1400,0 кН).

Случай 3

По результатам полевых статических испытаний зафиксирован «срыв» свай до достижения предварительно заданной осадки $S = \zeta \cdot S_{u,mt}$. В данном случае за величину несущей способности принимаем ступень нагрузки F_d , предшествующей усилию «срыва». При этом

$$N_{p.d} = F_d/1,2 = 900,0/1,2 = 750,0 \text{ кН.}$$

Таким образом, описанные выше подходы дают возможность проанализировать зависимости $S = f(F)$ и отказаться от «заранее установленной осадки» S при оценке несущей способности СПСу, и учесть данный параметр при установлении расчетно-допустимой нагрузки $N_{p.d}$.

Ввиду того, что начальный участок кривой $S = f(F)$ для СПСу в большинстве случаев имеет заметный «провал», связанный с технологическими особенностями изготовления свай в пробитых скважинах с уширением, необходимо произвести учёт данных перемещений путём внедрения дополнительного параметра. Отсюда выражение для расчёта осадки можно представить в виде:

$$S = \zeta \cdot S_{u,mt} - \Delta, \quad (2)$$

где Δ — начальные перемещения, зафиксированные при проведении испытаний (рис. 2).

Выражение для определения зафиксированного перемещения Δ , мм, полученного в ходе начального этапа нагружения СПСу, может быть описано в виде зависимости:

$$\Delta = \frac{N_1 \cdot 0,75 h_{yш}}{E_{yш} \cdot A_{yш}}, \quad (3)$$

где N_1 — величина нагрузки на начальной ступени нагружения, при которой зафиксирован «провал» графика на начальном этапе, кН; $h_{yш}$ — высота уширения, м; $A_{yш}$ — площадь поперечного сечения уширения, принимаемая согласно рекомендациям п. 2.31 «Руководства по проектированию и устройству фундаментов в вытрамбованных котлованах»; $E_{yш}$ — модуль деформации уширенной пяты, принимаемый равным 50,0 МПа из рекомендаций, что максимальное значение модуля деформации материала армированных свай, в том числе устраиваемых из жесткой бетонной смеси, следует принимать в пределах $E_a \leq 100,0$ МПа. Размеры уширения СПСу рекомендуется определять в соответствии с рекомендациями для ФВК, учитывающими форму уширения и характеристики грунтового основания.

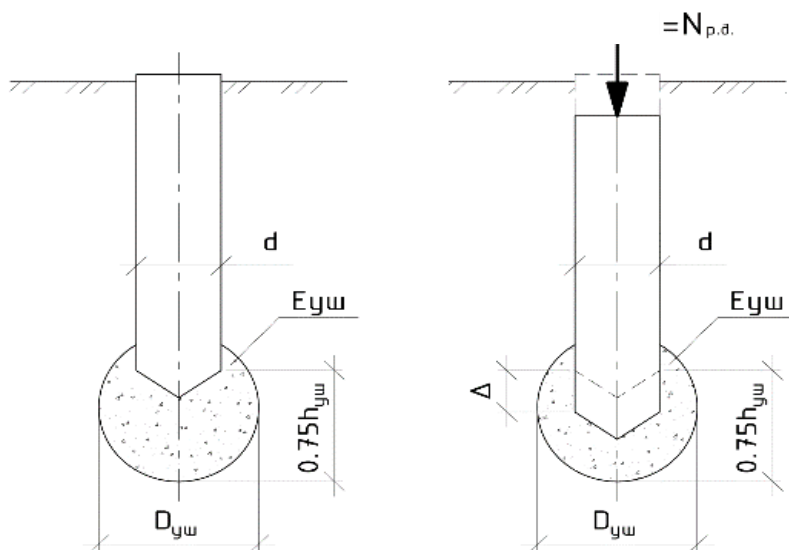


Рис. 2. Схема возникновения начальных деформаций в ходе статических испытаний опытной сваи в пробитой скважине с уширением

За критерий оценки расчётно-допускаемой нагрузки на сваю в пробитой скважине с уширением по результатам статических испытаний следует принимать величину осадки опытной сваи S , определяемую по формуле:

$$S = \zeta \cdot S_{u,mt} - \frac{N_1 \cdot 0,75h_{уш}}{E_{уш} \cdot A_{уш}}. \quad (4)$$

В случае, когда осадка, полученная по формуле (4), меньше величины окончательного перемещения опытной сваи по результатам испытаний, за критерий определения расчётно-допускаемой нагрузки следует принимать осадку, полученную по формуле (1).

Для проверки возможности использования описанного подхода к определению несущей способности и расчётно-допускаемой нагрузки свай в пробитых скважинах с уширением была проведена обработка ранее полученных данных статических испытаний, выполненных на площадке строительства цементного завода, расположенного в республике Мордовия (рис. 3).



Рис. 3. Выполнение работ по устройству и испытанию опытных СПСу на площадке строительства цементного завода (респ. Мордовия)

Полевые статические испытания грунтов производились согласно ГОСТ 5686-2020. Испытаниям была подвержена опытная свая СПСу-1 длиной $l = 7,0$ м, диаметр сваи $d = 0,63$ м, материал свай — бетон В20 W6, объем втрамбованного щебня в уровне пяты сваи $V_{щ} = 1,7$ м³. Расчётно-допускаемая нагрузка на сваю согласно проекту $N_{p.d.} = 2470,0$ кН.

Результаты определения $N_{p.d.}$ и F_d для опытных свай, испытанных на строительной площадке № 1, с учётом начальных перемещений Δ по предложенному подходу представлены в виде графиков на рис. 4 и табл. 1, 2.

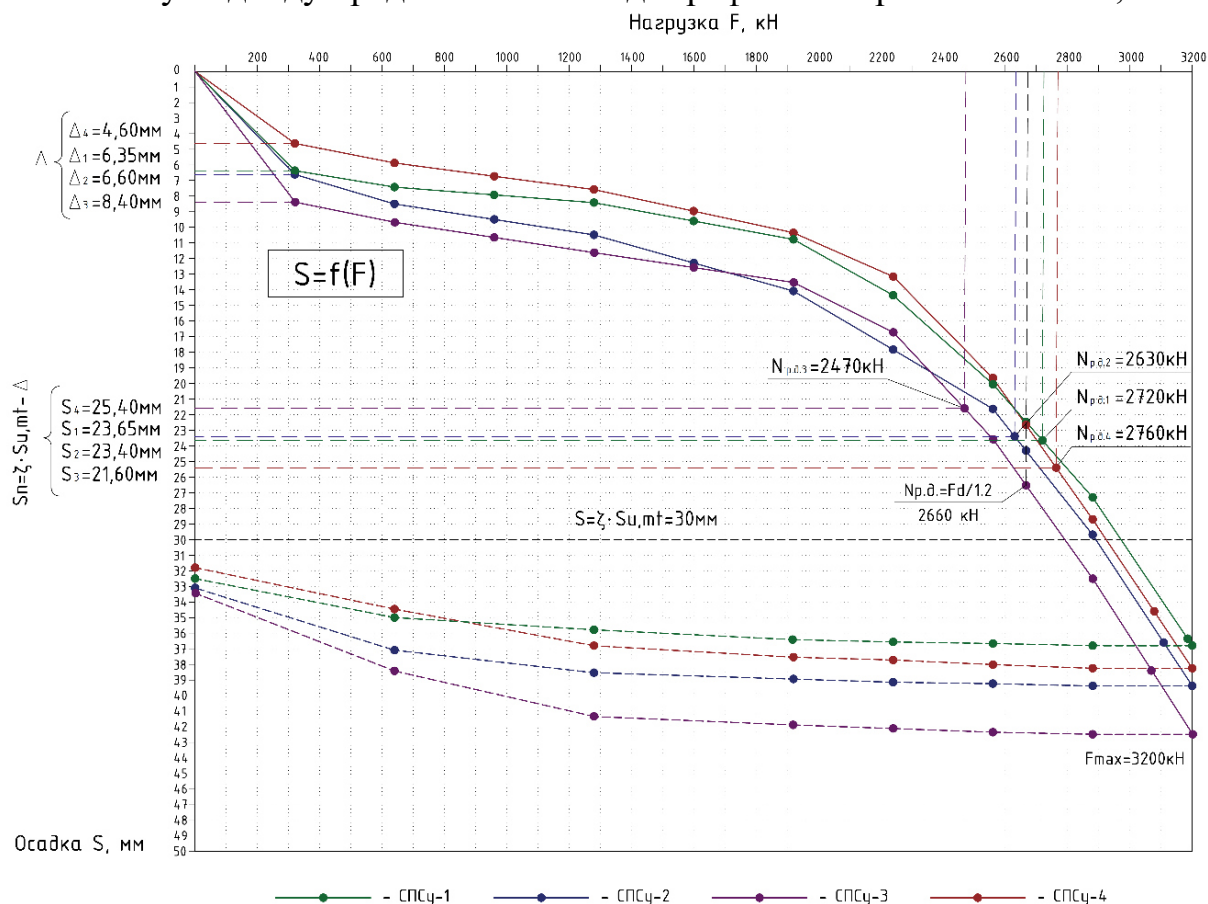


Рис. 4. Графики зависимости $S=f(P)$ по результатам статических испытаний опытных свай. Применение рекомендаций при оценке несущей способности СПСу

Таблица 1. Сравнение величин первоначальной осадки СПСу Δ по графику $S = f(F)$ и по формуле (3)

Свая	Характеристики уширения СПСу			Первичная осадка СПСу при N_I		
	$h_{уш}$, М	$A_{уш}$, М ²	$E_{уш}$, МПа	$\Delta = \frac{N_I \cdot 0,75h_{уш}}{E_{уш} \cdot A_{уш}}$	Δ по графику $S = f(F)$	Сходимость, %
СПСу-1	1,2	1,13	50,0	5,10	6,35	80,3
СПСу-2	1,2	1,13	50,0	5,10	6,60	77,3
СПСу-3	1,2	1,13	50,0	5,10	8,40	60,7
СПСу-4	1,2	1,13	50,0	5,10	4,60	90,2

Таблица 2. Определение F_d и $N_{p.d.}$ для СПСу с учётом рекомендаций

	Осадка испытываемой сваи		Зафиксированная нагрузка			
	S , мм	Δ , мм	F_d , кН	$N_{p.d.} = F_d/1,2$	$N_{p.d.}$, кН, при $S = \zeta \cdot S_{u,mt} - \Delta$	Разница полу- ченных значений $N_{p.d.}$, %
СПСу-1	30,0	6,35	3200,0	2660,0	2720,0	2,3
СПСу-2		6,60	3200,0		2630,0	1,1
СПСу-3		8,40	3200,0		2470,0	7,1
СПСу-4		4,60	3200,0		2760,0	3,8

Относительная сходимость представленных графиков $S = f(F)$ обусловлена также однородностью грунтовых условий строительной площадки, состоящей из суглинка и глины полутвердой консистенции с показателем текучести I_L в диапазоне от 0,2 до 0,5. Работы по уплотнению скважин и формированию уширений проводились до достижения проектного значения «отказа», что обеспечивало предварительный контроль несущей способности устанавливаемых свай [6].

При анализе полученных графиков $S = f(F)$ интерес вызывает начальный этап нагружения испытываемых свай, который характеризуется заметным ростом осадки в диапазоне $\Delta = 4,60 \dots 8,40$ мм при сравнительно небольшой действующей нагрузке $N_I = 320,0$ кН. При последующем увеличении приложенного усилия скорость изменения осадки уменьшается более чем в четыре раза относительно начальной величины перемещения на первом этапе нагружения. Предлагаемый подход к определению начальной осадки Δ с использованием заданной величины $E_{уш} = 50,0$ МПа позволяет добиться достаточно высокого уровня сходимости значений начальной осадки с данными, полученными в ходе полевых испытаний (табл. 1).

Согласно результатам, приведенным на рис. 4 и в табл. 1, учёт начальных перемещений Δ по формуле (3) позволяет назначить на опытную сваю расчётно-допускаемую нагрузку, близкую к величине $N_{p.d.} = F_d/1,2$ (табл. 2).

Заключение

Предложен новый подход для интерпретации результатов статических испытаний свай в пробитых скважинах с уширением. В основу оценки несущей способности сваи положены не значения допустимых осадок, принимаемые в проектах, а обуславливающая исчерпание прочности грунтового основания нагрузка F_d , характеризующаяся «срывом» или максимальном усилием F_{max} , которого следует достичь в ходе испытания. Расчётно-допускаемая нагрузка $N_{p.d.}$ принимается максимальной из двух полученных значений: 1) $N_{p.d.} = F_d/1,2$; 2) $N_{p.d.}$, соответствующая на графике $S = f(F)$ осадке $S = \zeta \cdot S_{u,mt} - \Delta$, где Δ — начальные перемещения испытываемой сваи на первой ступени нагружения.

Применение вышеизложенного подхода на примере результатов статических испытаний, выполненных на опытной строительной площадке, позволило назначить величину несущей способности опытных СПСу, соответствующую максимальной нагрузке при испытании $F_{\max}$. При этом расчётно-допускаемая нагрузка $N_{p.d.}$, назначенная на сваи по вышеописанному подходу с учётом $S_{u,mt}$, обеспечивает довольно точную сходимость с величиной $N_{p.d.}$, заданной согласно СП 24.13330.2021. Описанный метод позволяет предварительно оценить начальные перемещения Δ с уровнем сходимости полученных результатов до 90 % по сравнению с фактическим перемещением свай, полученным в ходе статических испытаний.

Список источников

1. Глухов, В. С. Сравнение методов определения несущей способности свай в пробитых скважинах с уширением по результатам статических испытаний / В. С. Глухов, П. К. Гаврилов // Construction and geotechnics. – 2023. – Т. 14. – № 1. – С. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.01.
2. Глухов, В. С. Оценка интерпретационных методов определения несущей способности свай по данным статических испытаний / В. С. Глухов, П. К. Гаврилов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Материалы науч.-техн. конф., Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 года. – Новочеркасск, 2022. – С. 229-241.
3. Белых, А. Н. Оценка несущей способности свай по результатам статических испытаний. Метод Дэвиссона / Б. А. Нелых, И. А. Астахов, А. А. Евдокимов // Перспективы науки. – 2021. – № 4(139). – С. 231-233.
4. Полищук, А. И. Статические испытания баретт с промежуточной разгрузкой и последующим повторным нагружением / П. А. Иолищук, О. А. Шмидт // Изв. вузов. Строительство. – 2025. – № 1(793). – С. 18-27. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-793-1-18-27.
5. Моргунов, В. Н. Моделирование и оптимизация фундаментов в вытрамбованных котлованах / В. Н. Моргунов. – Новочеркасск.: ООО «Лик», 2024. – 164 с.
6. Нямдорж, С. Испытание фундаментов в вытрамбованных котлованах / С. Нямдорж // Качество. Технологии. инновации: Материалы VII междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 13–15 февраля 2024 года. – Новосибирск, 2024. – С. 409-417.

© Глухов В. С., Гаврилов П. К., 2026