

УДК (UDC) 624.131.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДОК
МОДЕЛЕЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙEXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF SETTLEMENT OF BORED
PILE MODELSМандровский К.П., Садовникова Я.С.
Mandrovskiy K.P., Sadovnikova Ya.S.Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (Москва, Россия)
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Целью статьи является проверка применимости к мелкомасштабным моделям свай общепринятой методики расчета значения осадки для свай, используемых при строительных работах. В статье рассмотрены и проанализированы существующие методики определения значения осадки свай. Дана краткая характеристика методов, использующих полуэмпирические зависимости, без учета закономерностей механики грунтов, инженерных методов расчета, опирающихся на принципы механики грунтов, а также численных методов расчета, базирующихся на принципах механики. Для решения задачи экспериментального определения значения осадки был проведен эксперимент на моделях буронабивных свай, выполненных в форме металлического стержня. Исследования были проведены в пучинистом мелкодисперсном суглинке, находящемся в мерзлом состоянии. В качестве материала для заливочного бетона были использованы гравий малых фракций, песок, цемент и соль. Контроль температуры на различных глубинах грунта осуществлялся метеостанцией с выносным датчиком при помощи специальной скважины для измерения температур. После приложения к моделям свай трёхступенчатой статической нагрузки были получены зависимости значения вертикальной осадки моделей свай от значения статической вдавливающей нагрузки. Затем был проведен теоретический расчет значений осадки для выбранных моделей свай по СП 24.13330.2011 и осуществлено сравнение полученных теоретических и экспериментальных значений.

Ключевые слова: модель сваи, осадка, статическая нагрузка, глубина погружения, грунт.

Дата получения статьи: 01.07.2025
Дата принятия к публикации: 03.09.2025
Дата публикации: 25.12.2025

Сведения об авторах:

Мандровский Константин Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент, кафедра «Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных

Abstract. The purpose of the article is to verify the applicability to small-scale pile models of the generally accepted methodology for calculating the precipitation value for piles used during construction work. The article discusses and analyzes the existing methods for determining the value of pile precipitation. A brief description of methods using semi-empirical dependencies is given, without taking into account the laws of soil mechanics, engineering calculation methods based on the principles of soil mechanics, as well as numerical calculation methods based on the principles of mechanics. To solve the problem of experimentally determining the precipitation value, an experiment was conducted on models of abrasive piles made in the form of a metal rod. The studies were carried out in deep, finely dispersed loam, which was in a frozen state. Gravel of small fractions, sand, cement and salt were used as the material for pouring concrete. Temperature control at various depths of the ground was carried out by a weather station with an external sensor using a special temperature measuring well. After applying a three-stage static load to the pile models, the dependences of the vertical draft value of the pile models on the value of the static pressure load were obtained. Then, a theoretical calculation of the precipitation values for the selected pile models was carried out according to SP 24.13330.2011 and a comparison of the obtained theoretical and experimental values was carried out.

Keywords: pile model, sediment, static load, immersion depth, soil.

Date of manuscript reception: 01.07.2025
Date of acceptance for publication: 03.09.2025
Date of publication: 25.12.2025

Authors' information:

Konstantin P. Mandrovskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department "Production and repair of automo-

машин», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: effectmash@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7180-424X>

Садовникова Яна Сергеевна – инженер, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: jana.sadovnikova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0069-6816>

biles and road construction machinery" at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: effectmash@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7180-424X>

Yana S. Sadovnikova – Engineer at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: jana.sadovnikova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0069-6816>

1. Введение

Существующие методы расчёта величины осадки свайных фундаментов можно разделить на группы, согласно предложению [1]. В данной классификации выделены основные методы:

- методы, использующие полуэмпирические зависимости, без учёта закономерностей механики грунтов;

- инженерные методы расчёта, опирающиеся на принципы механики грунтов;

- численные методы расчёта, базирующиеся на принципах механики грунтов.

Метод численных расчётов не всегда прост с позиции технической реализации и учёта особенностей инженерно-геологических условий зоны строительства. Эмпирические и полуэмпирические методы отличаются простотой реализации, но, вместе с тем, и некоторой отвлечённостью от физического смысла, особенно важного при учете индивидуальных особенностей и специфики инженерно-геологических условий конкретной местности.

Очевидно, что метод численных расчётов отличается повышенной точностью результатов и в перспективе будет наращивать популярность параллельно с усовершенствованием вычислительных программных средств и комплексов. На данный момент особую актуальность приобрела проблема сопоставления теоретических результатов расчёта и данных, полученных в ходе полевых и экспериментальных исследований. В отечественной практике проектирования свайных фундаментов накоплено недостаточно материалов для сравнения

результатов численного моделирования с реальными величинами деформаций в свайных фундаментах в процессе строительства и во время его эксплуатации. Это подтверждает необходимость углублённого изучения и совершенствования действующих методик расчёта свай [2].

2. Постановка задачи

В данной статье рассмотрены модели буронабивных свай. Расчётная несущая способность оснований буронабивных свай определяется согласно эмпирической методике [3], а также согласно методике проведения полевых испытаний свай по ГОСТ 5686-2012 [4]. По результатам испытания буронабивной сваи (диаметр 216 мм, длина 3175 мм) осевыми вдавливающими статическими нагрузками получен расчётный график нелинейной деформации основания сваи, совершенно соответствующий экспериментальному [5].

Буронабивные сваи, несмотря на их преимущества, характеризуются и рядом недостатков, таких, как технологическая сложность их устройства и контроля качества, повышенный расхода бетона (по сравнению с забивными сваям) при изготовлении свай [6].

Бесспорно, что при проектировании свайных фундаментов прогнозирование величины осадки свай имеет первостепенное значение. В труде [7] получено полуаналитическое решение для процесса долговременной осадки одиночной сваи в вязкоупругом грунте основания. Для вертикально нагруженной висячей сваи в слоистом грунте основания была разработана модель, позволяющая определять осадку одиночной сваи с

предварительным выравнением слоя грунта. При этом он делится на несколько более мелких и тонких слоев, которые рассматриваются как однородная основа. После того, как система «грунт-свая» разделён на отдельные тонкослойные элементы, с использованием принципа виртуальных перемещений рассчитываются матрицы жёсткости для грунтового элемента и сваи. Вертикальное смещение системы «грунт-свая» может быть получено путём решения матричного уравнения. В то же время следует отметить, что в представленной модели существуют определенные ограничения, такие как сложность рассмотрения сваи после того, как грунт вокруг нее перейдет в стадию пластификации [8]. В статье [9] рассмотрен аналитический метод прогнозирования осадки группы свай и одиночной сваи конической формы при приложенных к ним статических осевых сжимающих нагрузок. Аналитический метод прогнозирования осадки вертикально нагруженной сваи и групп свай рассмотрен в работе [10].

В работе [11] представлено решение краевой задачи о взаимодействии длинной несжимаемой сваи с окружающим и подстилающим грунтами в упруго-вязкой постановке с учётом фактора упрочнения грунта, базирующееся на модели Максвелла, а также на основе реологической модели А.З. Тер-Мартirosяна.

Наиболее глубоко вопрос об осадке свай был изучен А.А. Бартоломеем. По данным [12], величина краткосрочной осадки одиночной сваи не превышает 2...3 мм, а величина стабилизированной осадки одиночной сваи в глинах составляет от 6 до 12 мм. В работах [13, 14] доказано, что при изучении и прогнозировании работы одиночных забивных свай следует учитывать наличие зоны уплотнения в грунтах околосвайного пространства.

На данный момент учет изменения характеристик грунта в зоне уплотнения вокруг забивной сваи при численных и аналитических расчетах осадки сваи не ведётся.

Основная методика расчета осадок свай

содержится в СП 24.13330.2011.

Порядок расчёта осадки сваи и группы свай при известном распределении нагрузок между сваями также изложен в работе [15].

Совершенствование методов расчёта свайных фундаментов по всем критериям работоспособности происходит постоянно. На обоснованность внесения поправок в редакции СНиПов и СП, в том числе СП 24.13330.2011, указывают авторы статьи [16], в которой приводится информация, направленная на дальнейшее совершенствование расчётов по осадке фундаментов [17].

Для реальных свай значение несущей способности может 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 составляет 20...40 мм. Контрольная осадка 20 мм, соответствующая эксплуатационной пригодности одиночной сваи, наиболее часто применяется за рубежом и в отечественной практике - для скальных грунтов. В соответствии с требованиями СП 24 значение контрольной осадки принимается не более 40 мм [18].

За критическую принимается такая нагрузка, при которой происходит срыв или оседание сваи без увеличения нагрузки и достигается общая осадка сваи не менее 80 – 100 мм. Расчет осадок отдельно стоящих свай-стоек, а также свайных фундаментов, состоящих из свай-стоек, по осадкам не производится. Величина возможной осадки таких свай и фундаментов принимается равной осадке свай или свай-оболочек, определяемых при действующих нагрузках по графику статических испытаний [19].

Величина осадки сваи в пластичномёрзлых грунтах может быть определена по методике [20]:

$$S = \left(\frac{\chi}{a_0 l^{2-m}} \right)^{\frac{1}{m}} \left\{ T \sum_{i=1}^n \left[\frac{N_i}{R_{cm}^i} \right]^{\frac{1}{m\alpha}} \right\},$$

где l – длина сваи, измеренная от верхней поверхности вечномёрзлых грунтов, м; T – средняя продолжительность месяца, равная

730 ч; n – число месяцев за расчётный период; χ – коэффициент, определяемый в зависимости от значения m и отношения длины сваи к ее приведённому диаметру; m , α , $a_0, r^{m\alpha}$ – осреднённые значения реологических характеристик деформируемости мёрзлого грунта; N , \bar{R}_{cm} – расчётная вертикальная нагрузка на сваю от здания или сооружения, H , и средневзвешенное по длине сваи значение расчётного сопротивления мёрзлых грунтов сдвигу по боковой поверхности сваи в середине i -го месяца с начала загрузки сваи, Pa , соответственно.

Приведённый диаметр d сваи определяется по формуле:

$$d = \frac{u}{\pi},$$

где u – периметр поперечного сечения сваи, м.

Для предварительных расчётов при однородных основаниях указанные характеристики допускается определять по таблице, представленной в (табл.1) [20].

Таблица 1

Значения осреднённых параметров реологических характеристик деформируемости мёрзлого грунта

Грунты	$a_0, r^{m\alpha}$	m	α
Песчаные	3,5	0,32	0,31
Глинистые	8,3	0,55	0,50

Целью данной статьи является сравнение результатов замера фактической осадки модели сваи с теоретическими расчётами, проведёнными согласно СП 24.13330.2011.

В СП 24.13330.2011 осадка s одиночной сваи определяется по формуле:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 l},$$

где N – вертикальная нагрузка на сваю, МН; l – длина сваи, м; G_1 – модуль сдвига грунта, прорезаемого свайей; МПа; ν_1 – коэффициент Пуассона для грунта, прорезаемого свайей; G_2 , ν_2 – модуль сдвига, МПа, и коэффициент Пуассона для грунта, на который опирается свая и который рассматривается как линейно-деформируемое основание; β – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + \frac{1 - (\beta' / \alpha')}{\chi},$$

где $\beta' = 0,17 \ln(k_v G_1 l / G_2 d)$ – коэффициент, соответствующий абсолютно жёсткой свайе; $\alpha' = 0,17 \ln(k_{v1} l / d)$ – коэффициент для однородного основания с характеристиками G_1 и ν_1 ; $\chi = EA / G_1 l^2$ – относительная жёсткость сваи, EA – жёсткость ствола сваи на сжатие, МН; $\lambda_1 = \frac{2,12 \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \chi^{3/4}}$ – параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола.

Коэффициенты k_{v1} и k_{v2} определяются по формуле:

$$k_v = 2,82 - 3,78 \nu + 2,18 \nu^2,$$

соответственно, при $\nu = (\nu_1 + \nu_2) / 2$ и при $\nu = \nu_1$.

Осуществим сравнение значений осадки одиночной сваи, полученных расчётным (по СП 24.13330.2011) и экспериментальным путями.

Для реализации цели был проведен эксперимент на изготовленных модельных сваях.

3. Эксперимент на модельных сваях

В эксперименте задействована модель буронабивной сваи (рис. 1) в форме металлического стержня (профильная труба квадратного сечения) с последующей заливкой бетоном.



Рис. 1. Модель сваи

Модель 1 сваи имеет длину 100 см и диаметр 40 мм, глубина погружения составляет 82 см. Модель 2 сваи имеет диаметр 40 мм и глубину погружения 90 см.

Исследование проведено в пучинистом мелкодисперсном суглинке, находящемся в мёрзлом состоянии. Контроль температуры на различных глубинах грунта осуществлялся метеостанцией с выносным датчиком при помощи специальной скважины для измерения температуры.

В качестве материала для заливочного бетона были использованы гравий малых фракций, песок, цемент и соль.

При подсыпке дна скважин использован отсев от песка.

В ходе исследования были произведены предварительные эксперименты по испытанию моделей буронабивных свай и измерению их вертикальной осадки в зависимости от величины статической нагрузки.

Схема нагружения представляется собой приложение трёхступенчатой статической нагрузки в 350 кг, 410 кг и 500 кг.

Измерения вертикальных смещений моделей свай осуществлялись в дневное время электронным штангенциркулем с дискретностью 0,01 мм.

Полученный график зависимости вертикальной осадки модели 1 свай от значения статической вдавливающей нагрузки показан на рис. 2.

Зависимости, полученные для модели 2 свай, представлены на рис. 3.

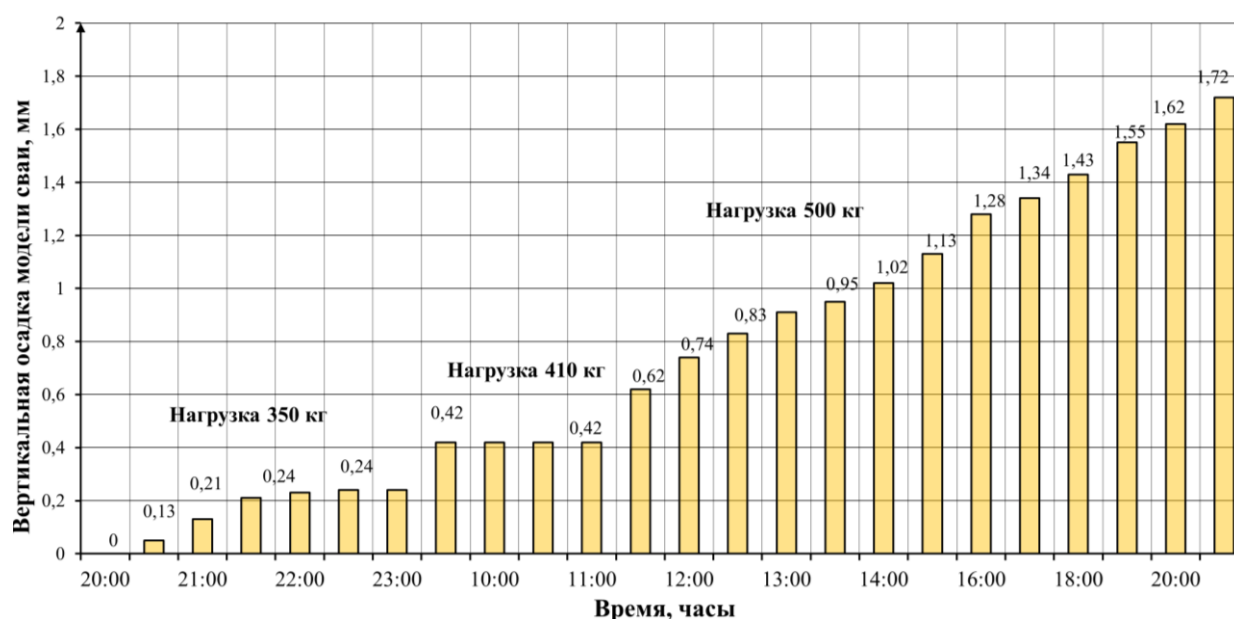


Рис. 2. График зависимости вертикальной осадки модели 1 свай от значения статической вдавливающей нагрузки

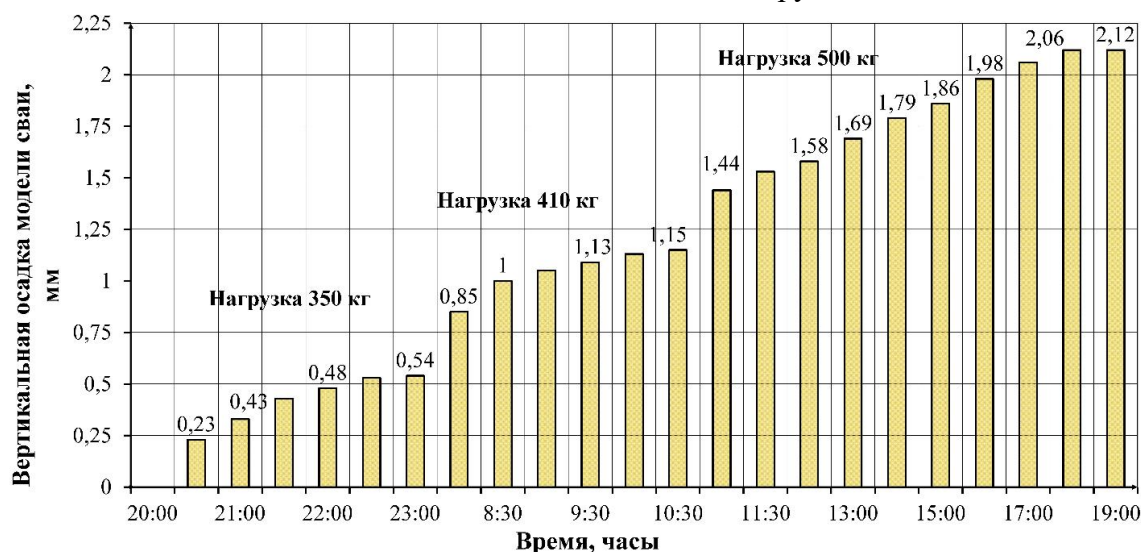


Рис. 3. График зависимости вертикальной осадки модели 2 свай от значения статической вдавливающей нагрузки

4. Теоретическое определения осадки моделей свай

Осадка одиночной сваи определяется по методике СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-84.

Итоги расчета осадки (мм) при разной величине приложенной нагрузки представлены в табл. 2.

Модуль деформации грунта, принимаемый осреднённым для грунта в пределах длины сваи, $E_0=14$ МПа, модуль упругости бетона на сжатие $E_b=30000$ МПа.

Таблица 2

Расчётные и экспериментальные значения осадки (в мм) моделей свай при различных статических нагрузках

Нагрузка, кг	350	410	500
№ модели сваи			
Модель 1	Расчётные значения		
	0,511	0,599	0,73
	Экспериментальные значения		
	0,210	0,420	1,1
Модель 2	Расчётные значения		
	0,482	0,566	0,690
	Экспериментальные значения		
	0,270	0,300	0,680

5. Результаты и их анализ

Результаты, ранее полученные исследователями, свидетельствуют о том, что осадка свай может составлять 0,19 % от длины сваи (осадка сваи 18,3 м составила 34 мм) [21], 0,065% от длины сваи (осадка сваи длиной 1 м составила 0,65 мм), 0,03% (осадка сваи длиной 1,5 м составила 0,4 мм) [22] и 0,081 % от длины сваи (при длине сваи 16 см осадка составила 0,13 мм) [23].

В рассматриваемом случае осадка составляет от 0,021% до 0,11 % от длины модели 1 сваи и от 0,027 % до 0,68 % от длины модели 2 сваи.

Результаты, полученные авторами на мелкомасштабных моделях свай, хорошо согласуются с имеющимися данными,

представленными для свай длиной от 0,16 см до 18,3 м.

Сравним полученные на рис. 2, рис. 3 и в табл. 2 результаты значений осадки моделей свай.

Экспериментальные значения осадки моделей свай при разных ступенях нагрузки: 0,21, 0,42, 1,1 мм – для модели 1; 0,27, 0,3, 0,68 мм – для модели 2.

При нагрузке 500 кг экспериментальная величина осадки превышает теоретическое значение в 1,5 раза для модели 1.

Для модели 1 сваи значение нагрузок 350 кг и 410 кг вызывает осадки, не превышающие теоретические значения, рассчитанные по СП 24.13330.2011.

По результатам расчёта, выполненного по СП 25.13330.2020, для модели 1 сваи несущая способность сваи составила 4,9386 кН, для модели 2 – 5,3407 кН.

Таким образом, для модели 1 объяснимо полученное в ходе эксперимента превышение рассчитанного (теоретического) значения осадки при нагрузке 500 кг.

Для модели 2 все приложенные в ходе эксперимента нагрузки не приводят к превышению допускаемой величины теоретического значения осадки.

6. Заключение

Экспериментальные исследования моделей буронабивных свай в пучинистом мелкодисперсном суглинке, находящемся в мёрзлом состоянии, продемонстрировали, что значения осадок составляет от 0,021% до 0,11 % от длины модели 1 сваи и от 0,027 % до 0,68 % от длины модели 2 сваи.

Значения осадок моделей при различных ступенях приложенной статической нагрузки (350 кг, 410 кг) не превышают теоретические значения, рассчитанные по СП 24.13330.2011. Это подтверждает работоспособность для мелкомасштабных моделей свай методики расчёта осадки, изложенной в СП 24.13330.2011. При сопоставлении теоретических и экспериментальных данных о значении осадки модели сваи важно принимать во внимание значение несущей

способности сваи. Для модели 1 сваи несущая способность составила 4,9386 кН, а для модели 2 – 5,3407 кН. Таким образом, для модели 1 объяснимо превышение в 1,5 раза

экспериментально полученного значения осадки по сравнению с теоретическим при нагрузке 500 кг.

Список литературы

1. Poulos H.G. Pile behavior - theory and application // *Geotechnique*. 1989. Vol. 39. No. 3. P. 365-415.
2. Харичкин А.И. Взаимодействие забивных железобетонных свай в составе свайного поля между собой и с грунтом: дисс. ... канд. техн. наук. М.: АО «НИЦ Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсеева, 2021. 170 с.
3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. М.: Институт ОАО «НИЦ» «Строительство» (НИИОСП им. Герсеева), 2011. 85 с.
4. ГОСТ 5686-2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. М.: Стандартинформ, 2014. 42 с.
5. Борозенец Л.М., Ушакова Е.А. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности основания буровых свай // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2016. Т. 16. № 2. С. 5-10. DOI: 10.14529/build160201.
6. Солонов Г. Г., Печеникин А. В., Артеменко М. О. Преимущества и недостатки буронабивных свай // Сб. ст. V междунар. научно-практ. конф. «Европейские научные исследования». Пенза: Изд-во «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. С. 200-201.
7. Li X.-M., Zhang Q.-Q., Liu S.-W. Semi-analytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils // *International Journal of Geomechanics*. 2021. Vol. 21, iss. 2. No. 0001906. DOI: 10.1061/(ASCE) GM.1943-5622.0001906.
8. Liu Q.-J., Wang J.-B., Ma J.-J., Gao W.-H. Vertically-loaded single floating pile in layered soils by thin annulus element method // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 41, No. 4. Pp. 748-754. DOI:

References

1. Poulos H.G. Pile behavior - theory and application. *Geotechnique*, 1989, Vol. 39, No. 3, pp. 365-415.
2. Kharichkin A.I. Interaction of driven reinforced concrete piles in a pile field with each other and with the soil. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow. 2021. 170 p. (In Russian).
3. SP 24.13330.2011. *Svaynyye fundamenty* [Pile foundations]. Moscow, OAO "NITs Stroitelstvo", 2011. 85 p. (In Russian).
4. GOST 5686-2012. *Soils. Field test methods with pile*. Moscow, Standartinform, 2014. 42 p. (In Russian)
5. Boroznets L.M., Ushakova Y.A. *Ekspperimentalno-teoreticheskoye issledovaniye nesushchey sposobnosti osnovaniya burovyykh svay* [Experimental and theoretical study of the bearing capacity of the foundation of bored piles]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Stroitel'stvo i arkhitektura"*, 2016, Vol. 16, No. 2, pp. 5-10. DOI: 10.14529/build160201 (In Russian).
6. Solonov G. G., Pechenikin A. V., Artemenko M. O. Advantages and disadvantages of bored piles. *Sbornik statey. V mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Yevropeyskiye nauchnyye issledovaniya"* In: V international. scientific-practical. conf. "European scientific research". Penza, 2020, pp. 200-201. (In Russian).
7. Li X.-M., Zhang Q.-Q., Liu S.-W. Semi-analytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils. *International Journal of Geomechanics*, 2021, Vol. 21, iss. 2, No. 0001906. DOI: 10.1061/(ASCE) GM.1943-5622.0001906.
8. Liu Q.-J., Wang J.-B., Ma J.-J., Gao W.-H. Vertically-loaded single floating pile in layered soils by thin annulus element method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, Vol. 41, iss. 4, pp. 748-754. DOI: 10.11779/CJGE201904019.
9. Li Y., Li W. Load-displacement behav-

10.11779/CJGE201904019.

9. Li Y., Li W. Load-displacement behaviour of tapered piles: theoretical modelling and analysis // *Geomechanics and Engineering*. 2021. Vol. 26, No. 1. Pp. 1-11. DOI: 10.12989/gae.2021.26.1.001.

10. Xia Z.-Q., Zou J.-F. Simplified approach for settlement analysis of vertically loaded pile // *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. Vol. 143, No. 11. No. 04017124. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001334.

11. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю. Осадка и длительная несущая способность свай с учетом реологических свойств грунтов // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13. № 1. С. 5-15.

12. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 384 с.

13. Randolph M., Carter J., Wroth C. Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation // *Geotechnique*. 1979. No. 29. P. 361-393. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361.

14. Sheil B., McCabe B. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay // *Computers and Geotechnics*. 2016. No. 75. Pp. 145-158. DOI:10.1016/j.compgeo.2016.02.001.

15. Полещук Е. В., Нудный С. А. Расчет осадок свайного фундамента с учетом мирового и отечественного опыта строительства // Материалы 73-й студ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы геотехники, экологии и защиты населения в чрезвычайных ситуациях». Секция «Геотехника и экология в строительстве»: 28 апреля 2017. Минск: Изд-во БНТУ, 2017. С. 49-53 [Электронный ресурс]. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/35987/49-53.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 04.06.2025).

16. Баданин А.Н., Нурумбаева Л.М. Особенности расчета фундаментов по II группе предельных состояний // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 4 (9). С. 36-41.

+ our of tapered piles: theoretical modelling and
+ analysis. *Geomechanics and Engineering*,
+ 2021, Vol. 26, iss. 1, pp. 1-11. DOI:
+ 10.12989/gae.2021.26.1.001.

10. Xia Z.-Q., Zou J.-F. Simplified approach for settlement analysis of vertically loaded pile. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, Vol. 143, iss. 11, No. 04017124. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001334

11. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Yu. *Osadka i dlitel'naya nesushchaya sposobnost' svai s uchetom reologicheskikh svoystv gruntov* [Settlement and long-term bearing capacity of piles taking into account the rheological properties of soils]. *Construction and Geotechnics*, 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 5-15.

12. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. *Prognoz osadok svaynykh fundamentov* [Forecast of settlement of pile foundations]. Moscow, Stroyizdat, 1994. 384 p. (In Russian).

13. Randolph M., Carter J., Wroth C. Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation. *Geotechnique*, 1979, No. 29, pp. 361-393.

†† DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361.

14. Sheil B., McCabe B. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay. *Computers and Geotechnics*, 2016, No. 75, pp. 145-158. DOI:10.1016/j.compgeo.2016.02.001.

15. Poleshchuk E. V., Nudnyy S. A. Calculation of pile foundation settlements taking into account world and domestic construction experience). *Materialy 73-y stud. nauchno-tekhn. konf. "Aktualnyye problemy geotekhniki, ekologii i zashchity naseleniya v chrezvychaynykh situatsiyakh". Sektsiya "Geotekhnika i ekologiya v stroitel'stve"* [Proceedings of the 73rd student scientific and technical conference "Current issues of geotechnics, ecology and protection of the population in emergency situations". Section "Geotechnics and ecology in construction"]. Minsk, 2017, pp. 49-53. Available at:

✦ https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/35987_49-53.pdf?sequence=1&isAllowed=y
✦ (In Russian).

16. Badanin A.N., Nurumbaeva L.M. *Oso-*

17. Уткин В.С., Сушев Л.А., Соловьев С.А. Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке // Вестник МГСУ. 2021. Т.16. Вып.3. С.331-339.
18. Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В., Брыксина А.А. Оценка несущей способности свай в скальных грунтах, переслаиваемых дисперсными грунтами, на действие вертикальной нагрузки // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 34. № 3. С. 7-25. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-7-25.
19. Указания по проектированию, устройству и приемке фундаментов из буронабивных свай РСН 263-74. Киев: Научно-исследовательский институт строительного производства Госстроя УССР /НИИСП/, 1974. 138 с.
20. Рекомендации по расчету осадок свай в пластичномерзлых грунтах. М.: Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсеванова ГОССТРОЯ СССР, 1983. 14 с.
21. Борозенец Л.М. Расчетное исследование предельной несущей способности и нелинейной деформации основания опытной буронабивной свай // Сб. научн. тр. междунар. научно-техн. конференции «Геотехника Беларуси: наука и практика». Минск: Изд-во БНТУ, 2013. С. 195-203.
22. Сороко Р.А. Исследование работы моделей свайных фундаментов из буронабивных свай в глинистых грунтах. 2018. С. 354-362. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/48604> (дата обращения 05.01.2025).
23. Ляшенко П.А., Гохаев Д.В., Шмидт О.А. Исследование на модели развития осадки буронабивной свай // Науч. журнал Кубан. гос. аграр. ун-та: сетевой журнал. 2013. № 90 (06). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/09.pdf> (дата обращения 05.01.2025).
- † *bennosti rascheta fundamentov po II gruppe predelnykh sostoyaniy* [Features of calculation of foundations for group II of limit states]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*, 2013, No. 4 (9), pp. 36-41. (In Russian).
- † 17. Utkin V.S., Sushev L.A., Soloviev S.A. *Sovershenstvovaniye metodov rascheta svaynykh fundamentov po osadke* [Improving the methods for calculating pile foundations by settlement]. *Bulletin of MGSU*, 2021, Vol.16, Issue 3, pp.331-339. (In Russian).
- † 18. Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Bryksina A.A. *Otsenka nesushchey sposobnosti svai v skal'nykh gruntakh, pereslaivayemykh dispersnymi gruntami, na deystviye vertikal'noy nagruzki* [Assessment of the bearing capacity of a pile in rocky soils interbedded with dispersed soils under vertical load]. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo»*, 2022, Vol. 34, No. 3, pp. 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).
- † 19. *Ukazaniya po proyektirovaniyu, ustroystvu i priyemke fundamentov iz buronabivnykh svay RSN 263-74* [Guidelines for the design, construction and acceptance of foundations from bored piles RSN 263-74]. Kyiv, Nauchno-issledovatel'skiy institut stroitel'nogo proizvodstva Gosstroya USSR /NIISTS/, 1974. 138 p. (In Russian).
- † 20. *Rekomendatsii po raschetu osadok svay v plastichnomerzlykh gruntakh* [Recommendations for calculating pile settlements in plastically frozen soils]. Moscow, Nauchno-issledovatel'skiy institut osnovaniy i podzemnykh sooruzheniy imeni N. M. Gershevanyova GOSSTROYA SSSR, 1983. 14 p.
- † 21. Borozenets L.M. Calculation study of the ultimate bearing capacity and nonlinear deformation of the base of an experimental bored pile. In: *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. kon-ferentsii "Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika"* [Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference "Geotechnics of Belarus: science and practice"]. Minsk, 2013, pp. 234-251. (In Russian).
- † 22. Soroko R.A. *Issledovaniye raboty modely svaynykh fundamentov iz buronabivnykh svay v glinistykh gruntakh* (Study of the per-

- ‡ performance of pile foundation models made of
‡ bored piles in clay soils), 2018, pp. 354-362.
‡ Available at:
‡ <https://rep.bntu.by/handle/data/48604> (In Rus-
‡ sian).
‡ 23. Lyashenko P.A., Gokhaev D.V.,
‡ Schmidt O.A. *Issledovaniye na modeli razviti-*
‡ *ya osadki buronabivnoy svai* (Research on the
‡ model of development of settlement of bored
‡ piles). Nauch. zhurnal Kuban. gos. agrar. un-ta:
‡ setevoy zhurnal, 2013, No. 90 (06). Available
‡ at: <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/09.pdf> (In
‡ Russian).
‡