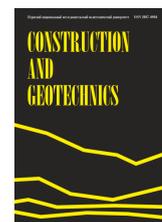




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 3, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.02

УДК 624.154

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ

Е.В. Кургузова^{1,2}, А.Л. Готман^{1,2,3}

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

² Подземпроект, Москва, Российская Федерация

³ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 23 мая 2024
Одобрена: 11 июня 2024
Принята к публикации:
27 сентября 2024

Ключевые слова:

буронабивная свая, горизонтальная нагрузка, схема деформирования, метод конечных элементов, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросу выбора расчетной схемы крупномасштабных горизонтально нагруженных буронабивных свай. Крупномасштабные сваи – длинные сваи большого диаметра. Представлен обзор подходов к определению расчетной схемы горизонтально нагруженной сваи. Определены факторы, оказывающие влияние на характер деформирования сваи, но не учтённые в существующих методиках. Для определения характера деформирования свай проведена серия опытов численного моделирования одиночных горизонтально нагруженных свай с различными комбинациями геометрических параметров сваи и грунтовых условий. Численное моделирование производилось в программном комплексе Plaxis 3D. В качестве модели грунта использовалась упруго-пластическая модель Кулона – Мора. По результатам численного моделирования получен критерий, позволяющий отнести работу сваи к одной из схем: жёсткой, гибкой или конечной жесткости. Даны определения этих схем деформирования с точки зрения поворота оси сваи вокруг точки нулевых перемещений, изгиба ствола, использования грунта и материала сваи.

© Кургузова Евгения Вадимовна – аспирант, инженер III категории, e-mail: e.kurguzova@marksgroup.ru.
Готман Альфред Леонидович – доктор технических наук, профессор, e-mail: gotmans@mail.ru.

Evgenia V. Kurguzova – Graduate Student, Engineer of the 3rd category, e-mail: e.kurguzova@marksgroup.ru.
Alfred L. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gotmans@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

TO THE QUESTION OF DETERMINING THE CALCULATION SCHEME OF THE LARGE-SCALE HORIZONTALLY LOADED BORED PILES

E.V. Kurguzova^{1,2}, A.L. Gotman^{1,2,3}

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

²Podzemproekt, Moscow, Russian Federation

³Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 23 May 2024
Approved: 11 June 2024
Accepted for publication:
27 September 2024

Keywords:

bored pile, horizontal load,
deformation scheme, finite element
method, numerical modeling.

ABSTRACT

The article is devoted to the issue of choosing a calculation scheme for large-scale horizontally loaded bored piles. Large-scale piles are long piles with large diameters. An overview of approaches to determining the calculation scheme of a horizontally loaded pile is presented. Factors that influence the nature of pile deformation, but are not taken into account in existing methods, have been identified. To determine the nature of pile deformation, a series of numerical modeling experiments was carried out on single horizontally loaded piles with various combinations of geometric parameters of the pile and soil conditions. Numerical modeling was carried out using the Plaxis 3D software package. The elastic-plastic Coulomb-Mohr model was used as a soil model. Based on the results of numerical modeling, a criterion was obtained that allows the operation of the pile to be classified into one of the schemes: rigid, flexible or finite rigidity. Definitions of these deformation schemes are given from the point of view of rotation of the pile axis around the point of zero displacement, bending of the trunk, use of soil and pile material.

Введение

Развитие промышленности, увеличение благосостояния и численности населения непосредственно приводят к интенсивному развитию инфраструктуры – строительству небоскрёбов, большепролетных промышленных и гражданских зданий и сооружений, транспортных магистралей. В связи с этим всё большее применение в строительстве находят свайные фундаменты, воспринимающие в том числе значительные горизонтальные и моментные нагрузки.

Для территорий большинства городов весьма характерным является сложное строение верхней части геологического разреза массива горных пород. На площадках со сложными грунтовыми условиями при строительстве зданий и сооружений с большими нагрузками на фундаменты наиболее эффективными являются крупноразмерные сваи большого диаметра и большой длины.

В ряде случаев устройство односвайных фундаментов из буронабивных свай большого диаметра является более технологически и экономически целесообразным решением, чем устройство кустовых свайных фундаментов. Экономическая выгода заключается в возможности максимального использования несущей способности сваи как по грунту, так и по материалу, которая достигается вариацией геометрических параметров сваи (диаметра и длины).

Однако для получения надежных результатов выбранная схема деформирования сваи, применяемая в расчетах, должна соответствовать фактической работе сваи в грунте.

Горизонтально нагруженная буронабивная свая в зависимости от геометрических характеристик (длины, поперечного сечения и грунтовых условий (модуля деформации)) будет работать как абсолютно жесткая, либо конечной жесткости, либо гибкая.

Для жесткой схемы работы горизонтально нагруженной сваи характерен поворот оси сваи вокруг точки нулевых перемещений без изгиба оси сваи. Разрушение системы «свая –

грунт» происходит за счет потери несущей способности грунта основания. При этом материал самой сваи остается, как правило, недоиспользованным.

Гибкая схема работы сваи предполагает изгиб оси сваи без поворота, т.е. перемещения нижнего конца сваи принимаются незначительными по сравнению с перемещениями верхнего конца. Исчерпание несущей способности в данном случае происходит при достижении критических изгибающих моментов с последующим разрушением ствола сваи.

Схема работы сваи конечной жесткости носит в себе отличительные признаки как гибкой, так и жесткой схем. У свай, деформирующихся по этой схеме, присутствует как поворот оси сваи вокруг точки нулевых перемещений, так и значительный изгиб ствола, а перемещение нижнего конца сваи затухает до нуля на определенной глубине. Таким образом, грунт и материал сваи активно вовлечены в работу.

Существует ряд различных подходов к определению расчетной схемы горизонтально нагруженной сваи. Так, например, в 1946 г. В.Г. Березанцев [1] предложил подразделять сваи на жесткие и гибкие в зависимости от отношения длины сваи в грунте к диаметру сваи (или стороне квадратного сечения сваи). Очевидным недостатком данного деления является неучет грунтовых условий и материала сваи. Схемы работы сваи в слабых и плотных грунтах различаются [2].

В 1976 г. А.С. Бусловым [3] предложен показатель λl , который вычисляется по формуле

$$\lambda l = 0,635l[1,54cd / (1 + \nu)EI]^{1/4}, \quad (1)$$

где c – коэффициент постели грунта; ν – коэффициент Пуассона грунта; EI – жесткость поперечного сечения сваи на изгиб.

При $\lambda l \leq 1,5$ – короткая жесткая свая; при $1,5 < \lambda l < 2,5$ – короткая гибкая свая; при $\lambda l \geq 2,5$ – длинная гибкая свая.

В 1992 г. в результате анализа методом конечных элементов, проведенного Картером и Кулхави [4], было установлено, что горизонтальное перемещение и угол поворота головы сваи в значительной степени зависят от соотношения E_e/G^* и отношения длины сваи к диаметру. Гибкая свая – это такая свая, для которой выполняется следующее условие:

$$\frac{L}{D} \geq \left(\frac{E_e}{G^*} \right)^{\frac{2}{7}}, \quad (2)$$

где E_e – эффективный модуль упругости сваи; D – диаметр сваи; G^* – эквивалентный модуль сдвига массива.

Формулы для определения E_e и G^* представлены в [4].

Свая будет работать по жесткой схеме, если выполняется условие

$$\frac{L}{D} \leq 0,05 \left(\frac{E_e}{G^*} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

А.З. Гайсин [5] записал зависимость определения гибкости буронабивных свай в виде

$$\omega = l \sqrt{\frac{16E_0}{\pi(1-\mu^2)Ed^5}}, \quad (4)$$

где E_0 – модуль деформации грунта; μ – коэффициент Пуассона; d – размер поперечного сечения (диаметр) сваи.

В существующей в нашей стране методике, представленной в СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты», принята расчетная схема сваи с линейно возрастающим по глубине коэффициентом постели, т.е. без учета многослойности основания. Такой подход приемлем для свай с небольшим поперечным сечением – порядка (30 × 30, 40 × 40 см), так как рабочая длина в грунте для таких свай составляет не более 3–4 м. Для свай с большим поперечным сечением, обладающих большой изгибной жесткостью, рабочая длина сваи может составлять до 15 м и более. Поэтому для таких свай необходимо учитывать многослойность грунтового основания.

Методика расчета горизонтально нагруженных крупномасштабных буронабивных свай без учета изгибной жесткости (по «жесткой» схеме) с учетом многослойности основания представлена в работах [6, 7]. В этой связи с целью выбора правильной расчетной схемы для расчета свай любых размеров актуальным является вопрос определения схемы работы горизонтально нагруженной сваи в грунте как «жесткой» или «гибкой».

Численные исследования характера деформирования свай

Для определения критерия, позволяющего отнести работу сваи к одной из схем – жёсткой, гибкой или конечной жесткости, проведены численные исследования характера деформирования горизонтально нагруженных свай в рамках метода конечных элементов с использованием современного компьютерного комплекса геотехнических расчетов PLAXIS 3D. В качестве модели грунта использовалась упруго-пластическая модель Кулона – Мора.

Исследования проводились на различные комбинации геометрических параметров сваи и грунтовых условий.

Рассмотрены глинистые грунты с коэффициентом Пуассона $\mu = 0,42$ и модулем деформации $E = 5, 15, 30$ МПа. Диаметры свай принимались $d = 1,0; 1,5$ и $2,0$ м. Длины свай $L = 5, 10$ и 15 м. Значение горизонтальной нагрузки, приложенной в уровне земли, составляет $H = 200$ кН. На рис. 1 представлена расчетная схема горизонтально нагруженной сваи в PLAXIS 3D.

Согласно [8] при использовании численных методик хороший уровень достоверности расчетов свай может быть достигнут только при использовании объёмных конечных элементов.

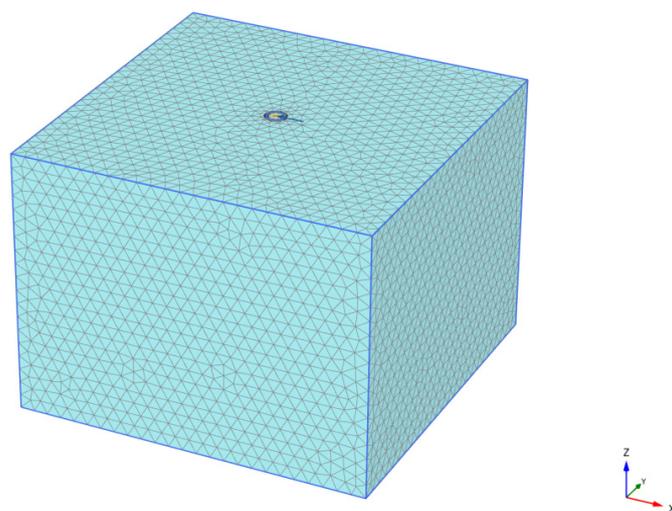


Рис. 1. Расчетная схема горизонтально нагруженной сваи в PLAXIS 3D
Fig. 1. Calculation scheme of a horizontally loaded pile in PLAXIS 3D

На рис. 2–4 представлены графики, отображающие перемещение точек, принадлежащих оси сваи, от приложения горизонтальной нагрузки по длине сваи.

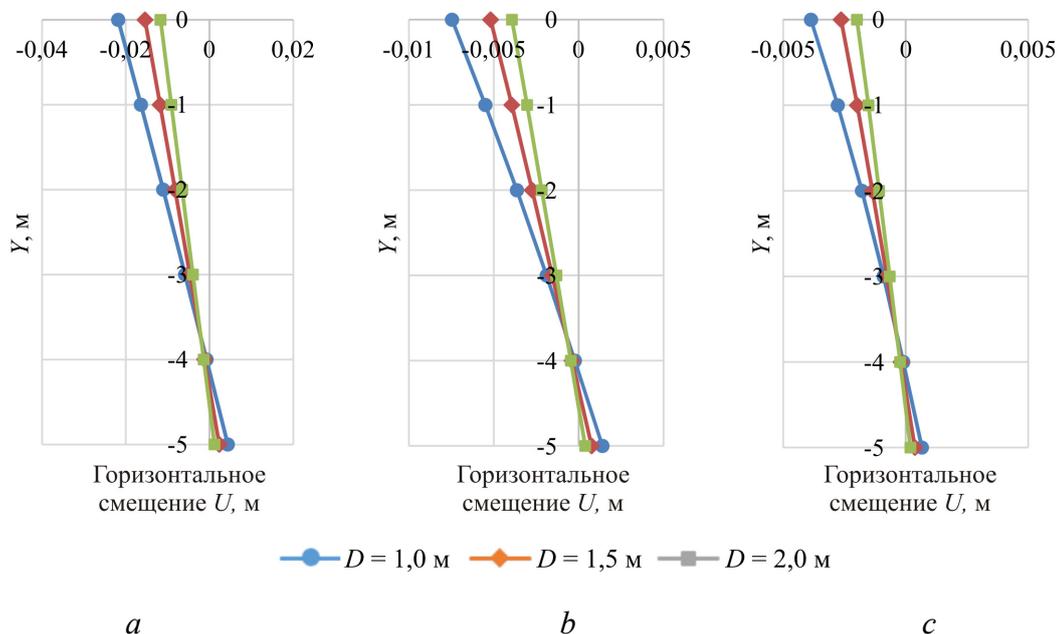


Рис. 2. Результаты расчетов для свай длиной $L = 5 \text{ м}$ и модулем деформации грунта:
 $a - E = 5 \text{ МПа}$; $b - E = 15 \text{ МПа}$; $c - E = 30 \text{ МПа}$
 Fig. 2. Calculation results for piles with length $L = 5 \text{ м}$ and soil deformation modulus:
 $a - E = 5 \text{ МПа}$; $b - E = 15 \text{ МПа}$; $c - E = 30 \text{ МПа}$

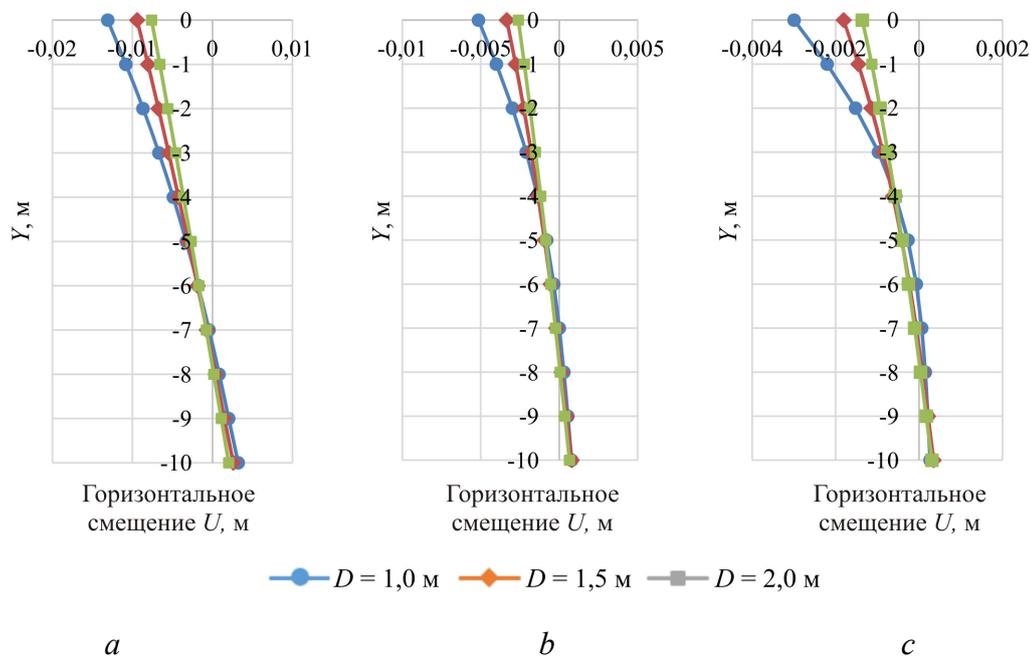


Рис. 3. Результаты расчетов для свай длиной $L = 10 \text{ м}$ и модулем деформации грунта:
 $a - E = 5 \text{ МПа}$; $b - E = 15 \text{ МПа}$; $c - E = 30 \text{ МПа}$
 Fig. 3. Calculation results for piles with length $L = 10 \text{ м}$ and soil deformation modulus:
 $a - E = 5 \text{ МПа}$; $b - E = 15 \text{ МПа}$; $c - E = 30 \text{ МПа}$

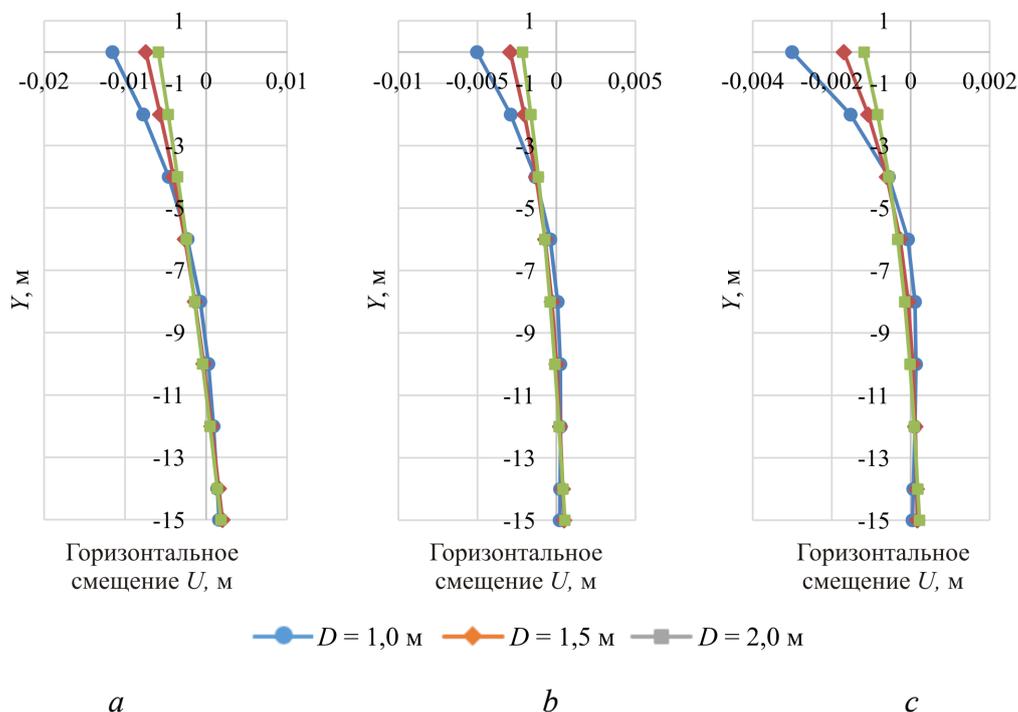


Рис. 4. Результаты расчетов для свай длиной $L = 15$ м и модулем деформации грунта:
 а – $E = 5$ МПа; б – $E = 15$ МПа; с – $E = 30$ МПа

Fig. 4. Calculation results for piles with length $L = 15$ m and soil deformation modulus:
 а – $E = 5$ МПа; б – $E = 15$ МПа; с – $E = 30$ МПа

На основе численных решений в табл. 1 представлено разделение свай по схемам работы.

В данной таблице схемы работы сваи обозначены соответствующими буквами: «Ж» – жесткая, «КЖ» – конечной жесткости, «Г» – гибкая.

Таблица 1

Характер деформирования свай

Table 1

Nature of deformation of piles

| Модуль деформации E , кН/м ² | Длина сваи L , м | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|----------------------|-----|---|----------------------|-----|----|----------------------|-----|----|
| | 5,0 | | | 10 | | | 15,0 | | |
| | Диаметр сваи D , м | | | Диаметр сваи D , м | | | Диаметр сваи D , м | | |
| | 1,0 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 |
| 5000 | Ж | Ж | Ж | КЖ | Ж | Ж | Г | КЖ | Ж |
| 15000 | КЖ | Ж | Ж | Г | КЖ | Ж | Г | Г | КЖ |
| 30000 | Г | Ж | Ж | Г | Г | КЖ | Г | Г | Г |

На основании результатов численных исследований и анализа схем деформирования крупномасштабных буронабивных свай в различных грунтовых условиях получен безразмерный параметр $K_{ж}$:

$$K_{ж} = \frac{S_{св}^2 \cdot E_{св}^2}{L_{св}^2 \cdot E_{гр} \cdot \alpha \cdot H}, \quad (5)$$

где $S_{св}$ – площадь поперечного сечения сваи, m^2 ; $E_{св}$ – модуль упругости бетона сваи, $кН/м^2$; $L_{св}$ – длина сваи в грунте, $м$; $E_{гр}$ – модуль деформации грунта, $кН/м^2$; H – горизонтальная нагрузка, $кН$; α – поправочный коэффициент:

$$\alpha = \frac{H \cdot 10^5}{2 \cdot 1 \text{ кН}}. \quad (6)$$

При $K_{ж} < 1,0$ свая работает по жесткой схеме; при $1,0 \leq K_{ж} \leq 2,0$ свая конечной жесткости; при $K_{ж} > 2,0$ свая работает по гибкой схеме.

Рассчитанный параметр жесткости для данных комбинаций геометрических параметров крупномасштабных буронабивных свай и грунтовых условий представлен в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета параметра жесткости $K_{ж}$

Table 2

Results of calculation of the rigidity parameter K_{rig}

| Модуль деформации E , $кН/м^2$ | Длина сваи L , м | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|------|------|----------------------|-----|------|----------------------|-----|-----|
| | 5,0 | | | 10 | | | 15,0 | | |
| | Диаметр сваи D , м | | | Диаметр сваи D , м | | | Диаметр сваи D , м | | |
| | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 | 2 |
| 5000 | 2,9 | 14,9 | 46,9 | 0,7 | 3,7 | 11,7 | 0,3 | 1,7 | 5,2 |
| 15000 | 1,0 | 5,0 | 15,6 | 0,2 | 1,2 | 3,9 | 0,1 | 0,6 | 1,7 |
| 30000 | 0,5 | 2,5 | 7,8 | 0,1 | 0,6 | 2,0 | 0,1 | 0,3 | 0,9 |

Сходимость результатов, полученных численным моделированием (табл. 1), и результатов, полученных по формуле (5) (табл. 2), высока для «жестких» и «гибких» схем и имеет небольшое расхождение для схем конечной жесткости. Небольшое расхождение ожидается, поскольку такая деформированная схема имеет переходный характер.

Результаты

По результатам численных исследований получены формулы (5) и (6) для расчета параметра $K_{ж}$, в соответствии с которым можно определить характер деформирования крупномасштабной буронабивной горизонтально нагруженной сваи в грунте по одной из схем: гибкой, жесткой и конечной жесткости.

Коэффициент жесткости целесообразно использовать только для предварительной оценки схемы работы одиночной крупномасштабной горизонтально нагруженной буронабивной сваи.

Выводы

Крупноразмерные горизонтально нагруженные буронабивные сваи в зависимости от соотношения геометрических размеров и грунтовых условий могут работать по различным схемам деформирования: жесткой, гибкой или конечной жесткости, что следует учитывать при выборе расчетной схемы для разработки методов расчета.

Для определения схемы деформирования крупномасштабной буронабивной горизонтально нагруженной сваи получен безразмерный параметр $K_{ж}$. В зависимости от численного значения данного коэффициента горизонтально нагруженная свая будет работать по одной из схем: жесткой, гибкой или конечной жесткости.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Березанцев, В.Г. Расчет одиночных свай и свайных кустов на действие горизонтальных сил / В.Г. Березанцев. – М.: Воениздат, 1946. – 60 с.
2. К вопросу об оценке несущей способности забивных железобетонных свай стандартных сечений на горизонтальную нагрузку / В.В. Знаменский, Е.П. Знаменская, Д.Ю. Чунюк, Д.Р. Халиуллина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 60–69. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.06
3. Буслов, А.С. Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах / А.С. Буслов. – Ташкент: Изд-во ФАН Узбекской ССР, 1979. – 102 с.
4. Carter, J.P. Analysis of laterally loaded shafts in rock / J.P. Carter, F.H. Kulhawy // Journal of Geotechnical Engineering. – 1992. – No. 118. – P. 839–855.
5. Готман, А.Л. Критерии оценки гибкости горизонтально нагруженных буронабивных свай / А.Л. Готман, А.З. Гайсин // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: материалы всерос. науч.-техн. конф. – СПб., 2017. – С. 58–62.
6. Готман, А.Л. Исследование работы крупномасштабных буронабивных свай на горизонтальную нагрузку и их расчет / А.Л. Готман, А.З. Гайсин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 14–27. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.02
7. Готман, А.Л. Расчет буронабивных свай большого диаметра на горизонтальную нагрузку / А.Л. Готман, В.В. Орехов, Е.В. Кургузова // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 12. – С. 65–69. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.65-69
8. Кургузов, К.В. Достоверность расчета свай на горизонтальную нагрузку / К.В. Кургузов, И.К. Фоменко // Тезисы докладов 14-й Междунар. науч.-практ. конф. «Новые идеи в науках о Земле». – М., 2019. – Т. 3. – С. 150–153.

References

1. Berezantsev V.G. Raschet odinochnykh svai i svainykh kustov na deistvie gorizontal'nykh sil [The calculation of single piles and pile bushes on the action of horizontal forces]. Moscow, Voenizdat, 1946, 60 p.
2. Znamenskiy V.V., Znamenskaya E.P., Chun-yuk D.Yu., Khaliullina D.R. To the question about the assessment bearing capacity driving reinforced concrete piles of standerd cross sections on horizontal load. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018; vol. 9, iss. 1, pp. 60-69. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.06

3. Buslov A.S. Rabota svai na gorizonta'l'nuiu nagruzku za predelami uprugosti v sviaznykh gruntakh [Work of piles for horizontal load beyond the limits of elasticity in cohesive soils]. Tashkent, FAN Uzbek SSR, 1979, 102 p.

4. Carter J.P., Kulhawy F.H. Analysis of laterally loaded shafts in rock. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, no. 118, pp. 839–855.

5. Gotman A.L., Gaisin A.Z. Kriterii otsenki gibkosti gorizonta'l'no nagruzhennykh buronabivnykh svai [Flexibility evaluation criteria for horizontally loaded bored piles]. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniia, proektirovanie i stroitel'stvo osnovanii, fundamentov i podzemnykh sooruzhenii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii*, Saint Petersburg, 2017, pp. 58-62.

6. Gotman A.L., Gaisin A.Z. Study of the large-scale bored piles on the horizontal load and their calculation. *Vestnik PNIIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, vol. 9, iss. 3, pp. 14-27. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.02

7. Gotman A.L., Orekhov V.V., Kurguzova E.V. Raschet buronabivnykh svaj bol'shogo diametra na gorizonta'l'nuyu nagruzku [Calculation of large-diameter bored piles for horizontal load]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2023, vol. 12, pp. 65-69. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.65-69

8. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Dostovernost' rascheta svaj na gorizonta'l'nuyu nagruzku [Reliability of calculation of piles for horizontal load]. *Tezisy dokladov 14 mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii "Novye idei v naukah o Zemle"*. Moscow, 2019, pp. 150–153.