

УДК: 624.154.51

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.4

EDN: EEKGCS



Исследование влияния глубины котлована на несущую способность сваи-баретты

Н.З. Готман^{1,2}, Ч.Х. Ле¹

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

²ООО «Подземпроект», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Современная технология возведения подземной части зданий предполагает устройство баретт с дневной поверхности земли с последующей откопкой котлованов. Основным вопросом, рассматриваемым в статье, является оценка влияния глубины котлована на несущую способность указанных свай-баретт, что является актуальным вопросом современной геотехники. *Целью исследования* является изучение изменения после откопки котлована напряженно-деформированного состояния грунтового массива, взаимодействующего с выполненной с поверхности грунта свай-бареттой. В ходе работы решаются следующие задачи: создание расчетной модели и проведение численных исследований взаимодействия баретты с окружающим грунтом; выявление закономерностей изменения напряжений на боковой поверхности сваи-баретты после откопки котлована; на основе выявленных закономерностей разработка предложений по совершенствованию метода расчета несущей способности одиночной сваи-баретты по грунту с учетом откопки котлована.

Результаты. В результате выполненных численных исследований получены закономерности изменения нормальных напряжений грунта на боковой поверхности сваи-баретты в зависимости от глубины откопки котлована. Предложена аналитическая зависимость для определения коэффициента снижения удельных сопротивлений грунта на боковой поверхности свай-баретт, выполняемых с поверхности грунта, после откопки котлована до проектных отметок. Выполнены расчеты несущей способности баретт разной длины при глубине котлована от 9-ти до 15 м в глинистых грунтах с учетом снижающих коэффициентов.

Выводы. В результате сравнения несущей способности по грунту свай-баретт в глинистых грунтах, определенной в соответствии с нормативной литературой, и с учетом уменьшения удельных сопротивлений по боковой поверхности, получено снижение несущей способности не менее в зависимости от глубины котлована.

Ключевые слова: несущая способность, сваи-баретты, удельное сопротивление грунта, снижающий коэффициент, численное исследование

Для цитирования: Готман Н.З., Ле Ч.Х. Исследование влияния глубины котлована на несущую способность сваи-баретты // Известия КГАСУ, 2025, № 3 (73), с. 40-49, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.4, EDN: EEKGCS

Study of the influence of excavation depth on the bearing capacity of a barrette pile

N.Z. Gotman¹, T.H. Le²

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

²LLC «Podzemproekt», Moscow, Russian Federation

Abstract. Problem Statement. Modern underground construction technology involves installing barrettes from the ground surface, followed by excavation. The main issue addressed in this article is assessing the influence of excavation depth on the bearing capacity of these barrette piles, which is a topical issue in modern geotechnical engineering.

The objective of this study is to investigate changes in the stress-strain state of a soil mass interacting with a barrette pile installed from the ground surface after excavation. The following objectives are addressed: developing a computational model and conducting numerical studies of the barrette's interaction with the surrounding soil; identifying patterns of stress changes on the lateral surface of the barrette pile after excavation; and, based on these patterns, developing proposals for improving the method for calculating the bearing capacity of a single barrette pile on soil, taking into account excavation.

Results. The numerical studies revealed patterns in the variation of normal soil stresses on the lateral surface of barrette piles depending on excavation depth. An analytical relationship was proposed for determining the reduction factor for specific soil resistances on the lateral surface of barrette piles driven from the ground surface after excavation to design elevations. Calculations were made of the bearing capacity of barrettes of various lengths in clay soils at excavation depths ranging from 9 to 15 meters, taking into account reduction factors.

Conclusions. A comparison of the soil bearing capacity of barrette piles in clay soils, determined in accordance with the Pile Foundation Code of Practice, and taking into account the reduction in specific resistances on the lateral surface, revealed a bearing capacity reduction of at least 10% depending on excavation depth.

Keywords: bearing capacity, Barrett piles, soil resistivity, reduction factor, numerical study

For citation: Gotman N.Z., Le T.H. Study of the influence of excavation depth on the bearing capacity of a barrette pile // News of KSUAE, 2025, № 3 (73), p. 40-49, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.4, EDN: EEKGCS

1. Введение

При современном строительстве высотных зданий, особенно на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями, нередко рассматривается применение буровых свай [1-3].

Одним из наиболее эффективных фундаментов высотных зданий с развитой подземной частью является свайные фундамент из свай-баретт (баретт) [4]. Прямоугольные баретты, изготавливаемые технологическим оборудованием типа плоский грейфер или грунтовая фреза [5], могут выполняться с поверхности до откопки котлована, или с отметки дна котлована.

Несущая способность этих свай определяется по аналогии с буронабивными сваями (БНС) [6], а испытания опытных образцов на вертикальную осевую нагрузку в большинстве случаев осуществляется с поверхности, до начала откопки котлована.

В работе [7] рассматривались случаи без учета и с учетом сжимаемости подстилающего слоя грунта. В работах [8-10] получен график зависимости осадки от нагрузки по результатам натурных испытаний баретт и проведено сравнение аналитических результатов с полевым испытанием свай. Также выполнялись исследования, включая численные исследования и испытания свай-баретт [11-13]. В связи с широким распространением баретт в современном высотном строительстве и применением различных технологий устройства фундаментов актуальны исследования их взаимодействия с грунтом с целью совершенствования методов расчета. В частности, ни в

нормативной документации¹, ни в научной литературе при расчете несущей способности не учитываются особенности поведения баретты, выполняемой с поверхности грунта до откопки котлована, при нагружении ее в составе фундамента проектной нагрузкой. При этом и экспериментально и численно установлен факт разуплотнения грунта основания котлована при откопке и влияние этого феномена на снижение сопротивления грунта по боковой поверхности этих свай [14–16].

С целью уточнения метода расчета несущей способности по грунту выполненных с поверхности свай-баретт с учетом глубины откопки котлована проведены исследования. Для решения которой решались следующие задачи:

- оценка влияния глубины откопки на изменение нормальных напряжений грунта на боковой поверхности свай по сравнению с нормальными напряжениями на боковой поверхности свай до откопки котлована;
- получение закономерностей изменения нормальных напряжений в грунте, воздействующих на боковую поверхность свай-баретты, после откопки котлована в зависимости от глубины откопки котлована;
- усовершенствование методики расчета несущей способности по грунту выполненных с поверхности свай-баретт с учетом глубины откопки котлована.

2. Материалы и методы

Численные исследования проводились путем моделирования взаимодействия с окружающим массивом выполненной с поверхности грунта свай-баретты прямоугольного сечения 0,8 х 2,5 м с учетом откопки грунта из котлована (рис. 1). Использовался верифицированный программный комплекс PLAXIS.

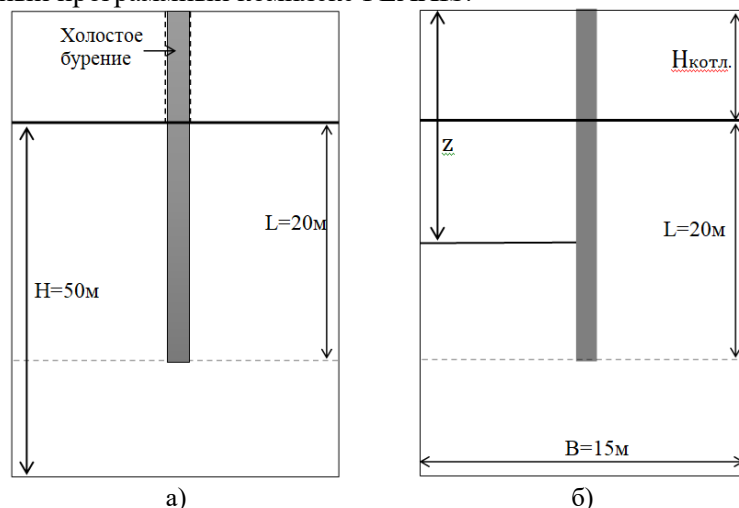


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия свай-баретты с грунтовым основанием: а) активация свай-баретты, выполняемой с поверхности грунта; б) откопка котлована и демонтаж свай-баретты на глубину откопки (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Calculation scheme of interaction of pile-barrette with a soil foundation: a) activation of the pile-barrete, carried out from the ground surface; b) excavation of the pit and dismantling of the pile-barrete to the excavation depth (illustration by the authors)

Конечно-элементная вычислительная модель имела следующие параметры:

— однослойный грунтовой массив, представленный суглинком тугопластичным [17] со следующими характеристиками: удельный вес $\gamma = 19 \text{ кН/м}^3$, показатель текучести $I_L = 0,4$, удельное сцепление $c = 30 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения $\phi = 13 \text{ град}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;

— размер расчетной области В (по X и Y) принят равным 15 м и определен из условия отсутствия влияния на результаты расчета, узлы на границах области закреплены;

¹ СП 24.13330.2021. Свод правил. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 152 с.

— размер расчетной области H (по Z) принят равным 50 м, узлы на границах области закреплены;

— учтена несовместность деформаций конструкции и грунта в соответствии с п. 9.16² введением специальных интерфейсных элементов на контакте сваи-баретты и грунта.

Численные расчеты проводились в трехмерной среде, где грунт и свая-баретта моделируется с помощью объемных элементов, для моделирования бетона применялась линейно-упругая модель, а для моделирования грунта упругопластическая модель Кулона-Мора [18].

Расчет выполнялся поэтапно:

1. Моделирование начального напряженного состояния грунтового массива.

2. Моделирование устройства сваи-баретты с поверхности грунта и определение нормальных напряжений на боковой поверхности (таблица 1, σ_{x1});

3. Моделирование откопки котлована, демонтажа сваи-баретты и понижения поверхности грунта на глубину откопки (5 вариантов глубины откопки котлована (H_K) от 3-х до 15-ти м).

4. Выполнение расчета и определение нормальных напряжений на боковой поверхности сваи-баретты по глубине (таблица 1, σ_{x2}).

Учитывая тот факт, что при откопке котлована происходит разгрузка грунта в основании котлована, нормальные напряжения на боковой поверхности баретты снижаются (таблица 1), что в первую очередь влияет на удельные сопротивления грунта на боковой поверхности баретты, определяющие ее несущую способность. На основании выполненного численного исследования получены нормальные напряжения на боковой поверхности сваи-баретты до откопки котлована (σ_{x1}) и после откопки котлована (σ_{x2}), а также коэффициенты снижения нормального напряжения после откопки котлована $K_I = f(\sigma_{x1} / \sigma_{x2})$ в зависимости от глубины котлована и глубины расположения сечения (z). Результаты использованы при получении аналитической зависимости для определения коэффициентов снижения удельных сопротивлений грунта на боковой поверхности свай-баретт, выполняемых с поверхности грунта, но нагружаемых проектной нагрузкой с отметки дна котлована.

3. Результаты и обсуждение

Численное моделирование напряжений в грунтовом массиве, взаимодействующим со свай-бареттой

По результатам анализа численных исследований выполнена статистическая обработка графиков изменения коэффициентов снижения нормальных напряжений на боковой поверхности (K_I) в зависимости от глубины котлована (H_K) и глубины расположения сечения (рассматриваемой глубины z) и разработаны предложения по корректировке нормативного метода расчета несущей способности свай-баретт с учетом глубины котлована.

Изменения нормальных напряжений на боковой поверхности сваи-баретты, полученные в результате численного моделирования, отображены в таблице 1.

Таблица 1

Изменение нормальных напряжений на боковой поверхности сваи-баретты

z , м	z / H_K	σ_{x1} , кН/м ²	σ_{x2} , кН/м ²	K_I
$H_K = 9\text{ м}$				
9.0	1.00	138	59	2.34
10.5	1.17	161	87	1.85
12.0	1.33	184	112	1.64
13.5	1.50	207	134	1.54
16.5	1.83	253	180	1.41
18.0	2.00	276	200	1.38
19.5	2.17	300	230	1.30

² СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* = Soil bases of buildings and structures. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 162 с.

Окончание таблицы 1

$H_k = 12\text{м}$				
12.0	1.00	184	78	2.36
13.5	1.13	207	109	1.90
15.0	1.25	230	135	1.70
16.5	1.38	253	166	1.52
18.0	1.50	276	181	1.52
19.0	1.58	292	201	1.45
19.5	1.63	300	215	1.39
$H_k = 15\text{м}$				
15.0	1.00	230	75	3.07
16.0	1.07	245	110	2.22
16.5	1.10	253	129	1.96
17.5	1.17	270	145	1.86
18.0	1.20	276	156	1.76
19.0	1.27	292	177	1.65
19.5	1.30	300	186	1.61

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация результатов расчетов, а именно зависимость коэффициентов снижения нормальных напряжений на боковой поверхности (K_l) от глубины котлована (H_k) и глубины расположения сечения (рассматриваемой глубины z).

В результате статистической обработки результатов численных расчетов, представленных на рисунке 2, получены функциональные зависимости коэффициента снижения нормальных напряжений на боковой поверхности K_l от глубины котлована и расстояния от поверхности грунта до рассматриваемого сечения баретты (см. табл. 2).

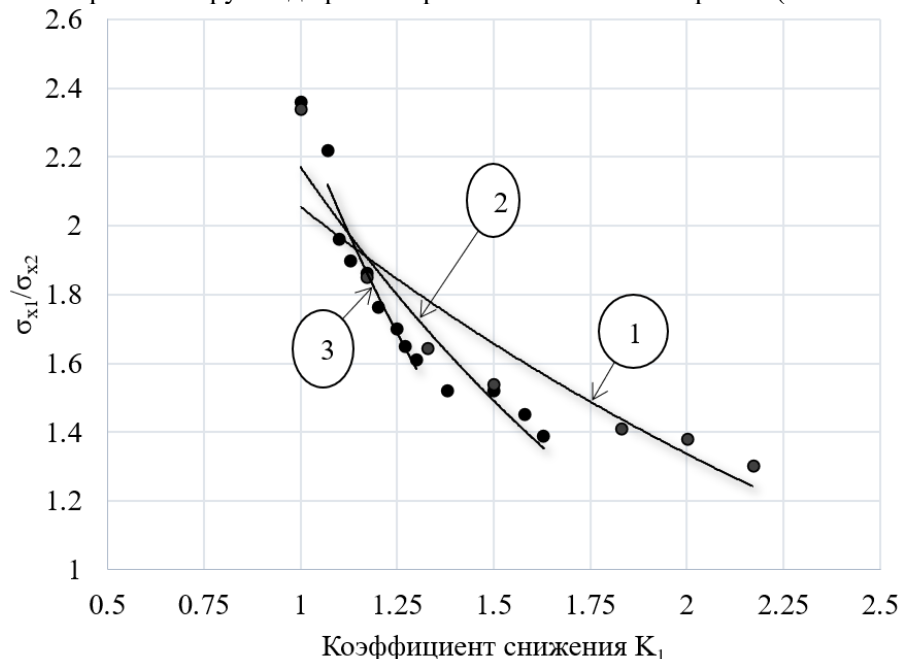


Рис. 2. Зависимость коэффициента снижения K_l от параметра z/H_k : z — расстояние от поверхности грунта до рассматриваемого сечения баретты, м; 1 — $H_k = 9\text{м}$, 2 — $H_k = 12\text{м}$, 3 — $H_k = 15\text{м}$ (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence of the reduction coefficient K_l on the parameter z/H_k : z is the distance from the ground surface to the considered section of the barrette, m; 1 — $H_k = 9\text{m}$, 2 — $H_k = 12\text{m}$, 3 — $H_k = 15\text{m}$, (illustration by the authors)

Таблица 2

Коэффициенты снижения K_I		
H_k , м	K_I	H_c , м
9	$3,77e^{-0,57Z/H_k}$	> 9
12	$4,90e^{-0,79Z/H_k}$	12
15	$3,50e^{-0,66Z/H_k}$	13

где H_k – глубина котлована, м; K_I – коэффициента снижения нормальных напряжений на боковой поверхности свай; H_c – глубина снижения, м.

Выполнен анализ полученных зависимостей (см. Табл. 2) и определена длина участка баретты от проектной отметки дна котлована, на которой возможно ожидать снижение нормальных напряжений. Приравняв экспоненциальные зависимости (таблица 2) единице, определена длина участка баретты (H_c), для которой эти зависимости имеют физический смысл. Анализ полученных результатов показывает, что длина этого участка свай может быть принята равной глубине котлована.

Предложения по расчету несущей способности свай-баретты

Результаты численного исследования использованы для разработки инженерного метода расчета несущей способности свай-баретт, выполненных с поверхности грунта, с учетом глубины откопки котлована. При этом за основу принята 2-х членная формула, рекомендованная СП 24.13330.2021, п. 7.2 для расчета несущей способности свай-баретты, нагруженных вертикальной нагрузкой

$$F_{d1} = \gamma_c (\gamma_{cR} RA + \gamma_{cf} u \sum f_i h_i),$$

где γ_c – коэффициент условий работы свай в грунте;

γ_{cR} , γ_{cf} – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности свай;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом свай, кПа;

A – площадь сечения свай, м²;

u – наружный периметр поперечного сечения свай, м;

h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью свай, м;

f_i – удельное сопротивление i -го слоя грунта по боковой поверхности свай, кПа.

Удельное сопротивление грунта на боковой поверхности свай-баретты (f_i) по сути является касательным напряжением грунта на боковой поверхности свай при ее нагружении в предельном состоянии (τ_1), которое может быть определено в соответствии с законом Кулона [19], связывающем касательные (τ_1) и нормальные напряжения (σ_{x1}) на боковой поверхности свай от собственного веса грунта

$$\tau_1 = \sigma_{x1} \tan \phi + c,$$

где ϕ – угол внутреннего трения грунта на рассматриваемой глубине, град.;

C – удельное сцепления грунта на рассматриваемой глубине, кПа.

Нормальное напряжение на рассматриваемой глубине от собственного веса грунта определится по формуле:

$$\sigma_{x1} = \sigma_z \beta = \gamma z \beta, \quad (3)$$

где γ – удельный вес грунта, кН/м³;

z – рассматриваемая глубина, м;

β – коэффициент бокового давления грунта, определяемый по формуле:

$$\beta = \frac{v_{cp}}{1 - v_{cp}}, \quad (4)$$

где v_{cp} – коэффициент Пуассона грунта на рассматриваемой глубине³.

³ ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация по международной стандартизации в Российской Федерации = Soils. Classification on international standardization in Russian Federation – Москва : Стандартинформ, 2018. – 45 с.

Используя уравнения (2), (3) и (4) и приравняв удельное сопротивление грунта на боковой поверхности касательному напряжению, определим удельное сопротивление грунта на боковой поверхности на рассматриваемой глубине до откопки котлована:

$$f_1 = \sigma_{x1} \tan \varphi + c = \gamma z \frac{v_{zp}}{1 - v_{zp}} \tan \varphi + c,$$

А после откопки котлована удельное сопротивление грунта может быть определено с учетом снижающих коэффициентов к нормальному напряжению K_1 :

$$f_2 = \sigma_{x2} \tan \varphi + c = \frac{\sigma_{x1}}{K_1} \tan \varphi + c,$$

где K_1 – коэффициент снижения нормального давления обжатия на боковой поверхности сваи-баретты (таблица 2).

Используя формулы (5) и (6), определим коэффициент снижения удельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи-баретты на рассматриваемой глубине:

$$K = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\gamma z \frac{v_{zp}}{1 - v_{zp}} \tan \varphi + c K_1}{K_1 \left(\gamma z \frac{v_{zp}}{1 - v_{zp}} \tan \varphi + c \right)},$$

Таким образом, при определении несущей способности сваи-баретты, выполняемой с поверхности грунта до откопки котлована, предложено учесть снижение сопротивление грунта по боковой поверхности введением в известную формулу (1) коэффициента K_i . При этом формула примет следующий вид:

$$F_{d2} = \gamma_c \left(\gamma_{cr} RA + \gamma_{cf} u \sum K_i f_i h_i \right),$$

где K_i – коэффициент снижения удельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи-баретты (по формуле 9), при этом длина участка баретты, на котором возможно снижение нормальных напряжений, может быть принята равной глубине котлована.

Результаты численного метода расчета по сравнению с традиционными методами в соответствии со Сводом Правил «Свайные фундаменты»

В рамках данного исследования рассматривается влияние откопки котлована на несущую способность на примере расчета одиночной сваи-баретты размером 0,8х2,5 м разной длины в однослойном грунтовом массиве, представленном глиной тугопластичной со следующими характеристиками: удельный вес $\gamma = 19$ кН/м³, показатель текучести $I_L = 0,5$, удельное сцепление $c = 19$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 12$ град, коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$. Выполнены расчеты несущей способности баретт разной длины при глубине котлована от 9-ти до 15 м в глинистых грунтах с учетом снижающих коэффициентов. Результаты расчета несущей способности с учетом влияния откопки котлована и с учетом коэффициента снижения K , определенного по формуле (9), сопоставлялись с традиционными расчетами несущей способности по СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты». В таблице 3 представлены результаты сравнения несущей способности свай-баретт, в глинистых грунтах, определенных с учетом снижающих коэффициентов (формула 10) и традиционно по СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты», позволяющие сделать вывод о том, что несущая способность снижается до 10% при увеличении глубины котлована от 9-ти до 15 метров.

В соответствии с выполненными расчетами также установлено, что в глинистых грунтах несущая способность свай-баретт может определяться с учетом снижающего коэффициента $K=0,9$, применяемого при вычислении сопротивления по боковой поверхности, по формуле:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{cr} RA + K \gamma_{cf} u \sum f_i h_i \right).$$

Таблица 3

Влияние глубины котлована на несущую способность свай-баретты

$H_{\kappa}, \text{м}$	$L_{\text{св}}, \text{м}$	K_l	Несущая способность свай по СП24.13330.2021 $F_{d1}, \text{кПа}$	Несущая способность свай с учетом коэффициента снижения (K) $F_{d2}, \text{кПа}$	$\frac{F_{d1} - F_{d2}}{F_{d1}} 100\%$
9	9	$3,77e^{-0.57Z/H_{\kappa}}$	5968.4	5443.2	8,8%
12		$4,90e^{-0.79Z/H_{\kappa}}$	6576.6	5930.4	9,8%
15		$3,50e^{-0.66Z/H_{\kappa}}$	7144.8	6528.3	8,6%
9	12	$3,77e^{-0.57Z/H_{\kappa}}$	7077.2	6512.6	8,0%
12		$4,90e^{-0.79Z/H_{\kappa}}$	7744.8	7044.8	9,0%
15		$3,50e^{-0.66Z/H_{\kappa}}$	8372.4	7670.7	8,4%
9	15	$3,77e^{-0.57Z/H_{\kappa}}$	8245.4	7680.8	6,8%
12		$4,90e^{-0.79Z/H_{\kappa}}$	8972.4	8273.6	7,8%
15		$3,50e^{-0.66Z/H_{\kappa}}$	9659.4	8954.6	7,3%

4. Заключение

1. При выполнении свай-баретт с поверхности грунта (до разработки грунта котлована) после разработки грунта котлована до проектной отметки происходит разгрузка и разуплотнение грунта в основании котлована, что приводит к снижению нормальных напряжений по боковой поверхности свай-баретт и, соответственно, к снижению их несущей способности по грунту.

2. На основе численного анализа, проведенного для свай-баретты, выполненной с поверхности грунта с учетом последующей откопки котлована, получены экспоненциальные зависимости для определения нормальных напряжений на боковой поверхности свай при изменении характеристик грунтов и глубины котлована.

3. С помощью полученных зависимостей усовершенствована методика расчета несущей способности по грунту выполненных с поверхности грунта свай-баретт с учетом глубины откопки котлована.

Дальнейшим направлением исследований может стать изучение влияния глубины откопки котлована на осадки свай-баретт в условиях глинистых грунтов с изменяющимися физико-химическими свойствами.

Список литературы / References

1. Маковецкий О. А., Зуев С. С. Опыт проведения полевых испытаний баретты большой длины в условиях плотной городской застройки // Жилищное строительство. 2018. № 9. С.13–18.
Makovetsky O. A., Zuev S. S. Experience in the field tests of barrettes of large length in conditions of dense urban development // Housing construction. 2018. No. 9. P.13–18.
2. Kharin Yu.I. Choosing the best options for pile foundations in the coastal areas of Vietnam and Tunisia. // Science Prospects. 2020. Volume 5(128). P. 58–61.
3. Mirsayapov I., Shakirov M. Deformation Features of Raft-Pile Foundation Models Under Cyclic Loading // Lecture Notes in Civil Engineering : Proceedings of STCCE 2021. Selected Papers. 2021. Vol. 169. P. 203–212. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8.
4. Ле Чунг Хиеу Применение баретты и бареттных фундаментов высотных зданий во Вьетнаме // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XXI Международной научно-технической конференции. / Под ред. Паршина А.Н. – Рязань: Ряз. ин-т (филиал) Моск. пол. ун-та. 2023. С. 112–113.

- Le Chung Hieu, The use of barrette and barrette foundations of high-rise buildings in Vietnam // *New Technologies in the educational process and production: proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference.* / Ed. Parshina A.N. - Ryazan: Ryaz. Institute (branch) Moscow Polytechnic University. 2023. P. 112–113.
5. Yeşiltepe Ö., Erginer M., Örnek M. The Behavior of Axially Compression Loaded Barrette and Bored Piles with Model Tests // *Journal of Civil Engineering and Urbanism.* 2024. Volume 14. Issue 1. P. 1–10. DOI: 10.54203/jceu.2024.1
 6. Gatto M. P. A., Montrasio L. Analysis of the behaviour of very slender piles: focus on the ultimate load // *International Journal of Civil Engineering.* 2021. Vol. 19. P. 145–153. DOI: 10.1007/s40999-020-00547-y.
 7. Ter-Martirosyan Z. G., Dam H. H. Interaction of compressible barrette with surrounding soil and raft // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering, XXIX R-P-S Seminar 2020 November 2020.* Wroclaw, Poland. 2021. Vol. 1015. P. 10. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012047
 8. Nikitina N. S., Le T. H. Methodology for evaluating the bearing capacity of a deep excavation barrette in complex geotechnical conditions in Hanoi // *Construction: Science and Education.* 2023. 13(1):1. P. 6–21. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.1.
 9. Mangushev R. A, N. S. Nikitina, Trung Hieu Le, I. Yu. Tereshchenko Analytical and numerical methods for determining the carrying of a pile barett on weak soils in deep pits // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2021. Vol. 17, Issue 3. P. 94–101. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-94-101.
 10. Nguyen V. P. H., Nguyen P. C. Effects of Shaft Grouting on the Bearing Behavior of Barrette Piles: A Case Study in Ho Chi Minh City // *Engineering, Technology & Applied Science Research.* 2021. Vol. 11. № 5. P. 7653–7657. DOI: 10.48084/etasr.4389.
 11. Mangushev R., Nikitina N., Van Chong Le, Tereshchenko I. Numerical assessment of carrying capacity and analysis of pilot barett behavior in geological conditions of Vietnam // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022. Vol. 18. № 1. P. 119-128. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-119-128.
 12. Ле В. Ч. Несущая способность буровых свай глубокого заложения // *Вестник гражданских инженеров.* 2020. № 3(80). С. 116–126. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-116-126.
Le V. Ch. The bearing capacity of the deep-laying drill piles // *Bulletin of civilian engineers.* 2020. No. 3 (80). P. 116–126. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-116-126
 13. Tran V. T. Studying and calculating the bearing capacity of barrette piles based on comparison with O-cell test // *Vietnam Construction Magazine.* 2020. No. 59(625). P. 232–236.
 14. Готман Н. З., Ле Ч. Х. Исследование влияния глубины котлована на взаимодействие баретты с грунтовым основанием // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2023. № 25. С. 144-155. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-144-155.
Gotman N. Z., Le C. Kh. The study of the influence of the depth of the foundation pit on the interaction of barrettes with a soil foundation // *Bulletin of the Tomsk State Architectural and Civil Engineering University.* 2023. No. 25. P. 144-155. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-144-155.
 15. Шулятьев О. А., Дзагов А. М., Минаков Д. К. Изменение напряженно-деформированного массива грунта в результате устройства буронабивных свай и баретт // *Вестник НИЦ «Строительство».* 2022. № 3(34). С. 26-44. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-26-44.
Shulyntiev O.A., Dzagov A. M, Minakov D.K. Change of stress-deformed array of soil as a result of the use of bored piles and barrette // *Bulletin of the SRC "Construction".* 2022. No. 3 (34). P. 26-44. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3 (34) -26-44.
 16. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation Under Cyclic Loading // *IOP conference series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 890. P. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
 17. Готман Н. З., Евдокимов А. Г. Численные исследования взаимодействия основания и буронабивных свай фундамента мостовой опоры при возникновении карстовых

- деформаций // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12. № 4. С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.01.
- Gotman N. Z., Evdokimov A. G. Numerical studies of the interaction of the base and drilled piles of the foundation of the bridge support in the occurrence of karst deformations // Construction and Geotechnics. 2021. V. 12. No. 4. P. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.01.
18. Карапетян С. Г, Тышова Ю. В. Сравнение аналитических и численных расчетов с натурными испытаниями свай на горизонтальные нагрузки // Молодой ученый. 2020. № 49(339). С. 63–69.
- Karapetyan S. G, Tyshova Yu. V. Comparison of analytical and numerical calculations with field tests of piles on horizontal loads // Young scientist. 2020. No. 49 (339). P. 63–69.
19. Тер-Мартirosян З. Г, Сидоров В. В., Струнин П. В. Теоретические основы расчета фундаментов глубокого заложения - свай и баретт // Вестник ПНИУ : Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 190–206.
- Ter -Martirosyan Z. G, Sidorov V.V., Strunin P.V. Theoretical bases of calculating the foundations of deep laying - piles and barrettes // Bulletin of PNIU: Construction and Architecture. 2014. No. 2. P. 190–206.

Информация об авторах

Готман Наталья Залмановна, доктор технических наук, профессор, Российский университет транспорта РУТ(МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Email: natalya.gotman@marksgroup.ru, ORCID: 0009-0002-3681-5204

Ле Чунг Хиеу, аспирант, Российский университет транспорта РУТ(МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Email: letrunghieu531996@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6346-8829

Information about the authors

Natalya Z. Gotman, doctor of technical sciences, professor, Russian University of Transport RUT(MIIT), Moscow, Russian Federation

Email: natalya.gotman@marksgroup.ru, ORCID: 0009-0002-3681-5204

Trung Hieu Le, post-graduate student, Russian University of Transport RUT(MIIT), Moscow, Russian Federation

Email: letrunghieu531996@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6346-8829

Дата поступления: 10.04.2025

Дата принятия: 22.10.2025