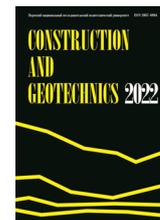




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.04

УДК 624.154-4

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗАБИВНЫХ ВИСЯЧИХ СВАЙ С ПРОДОЛЬНЫМИ ПАЗАМИ НА ИХ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.И. Полищук, В.А. Демченко

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 ноября 2022

Одобрена: 18 января 2023

Принята к публикации:

6 февраля 2023

Ключевые слова:

натурная висячая железобетонная свая заводского изготовления, модели свай, поперечное сечение, продольные клиновидные и полукруглые пазы, боковая поверхность свай, оптимальная глубина пазов, несущая способность свай по грунту, осевая вдавливающая нагрузка.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается влияние продольных пазов различной геометрической формы на боковой поверхности забивных железобетонных свай заводского изготовления на их несущую способность. Приводятся сведения о ранее выполненных экспериментальных исследованиях (лабораторных и полевых) изменения несущей способности свай с пазами. Исследования проводились на моделях свай в лотке и с использованием забивных железобетонных натуральных свай в полевых условиях. Натурные сваи и модели свай имели на боковой поверхности клиновидные и полукруглые пазы, которые размещались на одной, двух и трех сторонах. На основе экспериментов установлено повышение несущей способности свай с пазами в глинистых грунтах. Также выполнен теоретический анализ влияния глубины клиновидных и полукруглых пазов на работу рассматриваемых свай. Путем решения задачи оптимизации получены формулы для расчета оптимальной глубины клиновидных и полукруглых пазов на боковой поверхности железобетонных свай. Выполнен сравнительный анализ эффективности работы в глинистых грунтах забивных висячих свай с продольными пазами клиновидной и полукруглой формы. На основе полученных результатов сформулированы выводы. Установлено, что оптимальная глубина клиновидных и полукруглых пазов зависит от механических характеристик грунтов, длины свай, угла в вершине паза (для клиновидных пазов) и не зависит от размеров поперечного сечения сваи и количества пазов. Выявлено также, что несущая способность сваи с пазами оптимальной глубины всегда превышает несущую способность аналогичной сваи без пазов. Выполнено сравнение эффективности работы свай с клиновидными и полукруглыми пазами.

© ПНИПУ

© Полищук Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: ofpai@mail.ru

Демченко Владимир Анатольевич – старший преподаватель, e-mail: boxdv@mail.ru

Anatolij I. Polishhuk – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: ofpai@mail.ru

Vladimir A. Demchenko – Senior Lecturer, e-mail: boxdv@mail.ru

BEARING CAPACITY OF A DRIVEN HANGING PILES WITH LONGITUDINAL GROOVES ON THEIR SIDE SURFACE

A.I. Polishhuk, V.A. Demchenko

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 November 2022

Approved: 18 January 2023

Accepted for publication:

06 February 2023

Keywords:

factory-made hanging reinforced concrete pile, pile models, cross-section, longitudinal wedge-shaped and semicircular grooves, lateral surface of piles, optimal depth of grooves, bearing capacity of piles on the ground, axial pressing load.

ABSTRACT

The article considers the influence of longitudinal grooves of various geometric shapes on the side surface of factory-made driven reinforced concrete piles on their bearing capacity. Information is given on previously performed experimental studies (laboratory and full-scale testing) of changes in the bearing capacity of piles with grooves. The research was carried out on models of piles in a tray and using driven reinforced concrete full-scale piles in the field. Full-scale piles and models of piles had wedge-shaped and semicircular grooves on the side surface, which were placed on one, two and three sides. Based on experiments, an increase in the bearing capacity of piles with grooves in clay soils has been established. The article also provides a theoretical analysis of the influence of the depth of wedge-shaped and semicircular grooves on the operation of the piles under consideration. By solving the optimization problem, formulas were obtained for calculating the optimal depth of wedge-shaped and semicircular grooves on the side surface of reinforced concrete piles. A comparative analysis of the efficiency of work in clay soils of driven hanging piles with longitudinal grooves of wedge-shaped and semicircular shape is carried out. In conclusion, the main conclusions are formulated based on the results obtained. It is established that the optimal depth of wedge-shaped and semicircular grooves depends on the mechanical characteristics of the soils, the length of the piles, the angle at the top of the groove (for wedge-shaped grooves) and does not depend on the size of the cross-section of the pile and the number of grooves. It was also revealed that the bearing capacity of a pile with grooves of optimal depth always exceeds the bearing capacity of a similar pile without grooves. The article compares the efficiency of piles with wedge-shaped and semicircular grooves.

© PNRPU

Введение

В 1983 г. сотрудниками Томского инженерно-строительного института (ныне ТГАСУ) А.М. Болдышевым, А.И. Мальгановым и А.И. Полищуком было предложено конструктивное решение забивной железобетонной сваи, которая имеет на боковых поверхностях продольные углубления различной геометрической формы [1]. Указанные углубления были названы пазами. Разработка конструктивных решений свай с пазами выполнялась на основе ранее проведенных исследований прочности железобетонных колонн и балок заводского изготовления (рис. 1), имеющих такие же углубления (пазы) на своей боковой поверхности [2]. Основной целью устройства пазов являлось снижение материалоемкости и веса рассматриваемых железобетонных конструкций. Формирование пазов различной геометрической формы на боковых гранях свай преследовало ту же цель и происходило также за счет удаления бетона, что оказалось возможным в случае применения плоских арматурных каркасов, которые ориентированы вдоль диагоналей их поперечного сечения.

Экспериментальные исследования влияния геометрической формы пазов на несущую способность висячих свай впервые были выполнены А.И. Полищуком и др. (1983–1989 гг.). В рамках этих исследований проводились серии лабораторных и полевых испытаний свай с пазами [3–5].

Вопросы оценки работы свай различных конструктивных решений изложены в трудах Б.В. Бахолдина, А.А. Бартоломея, А.А. Готмана, А.Б. Пономарева, В.Г. Федоровского, А.Н. Тегиора, С.Н. Левченко, Л.В. Нуждина, В.А. Лаврентьева, А.В. Пилягина, З.Г. Тер-Мартиро-

сяна, П.А. Аббасова, В.В. Знаменского, О.А. Шулятьева, И.Т. Мирсяяпова, А.В. Савинова, В.В. Кочерженко, П.И. Ястребова и др. [6–14]. Методика проведения лабораторных испытаний авторов заключалась в следующем. Модели свай были изготовлены из дерева и покрыты слоем цементно-песчаного раствора для обеспечения их взаимодействия с грунтом, близкого к реальным условиям. В опытах использовалось 7 видов моделей свай, отличающихся формой и расположением пазов на их боковых гранях (рис. 2).

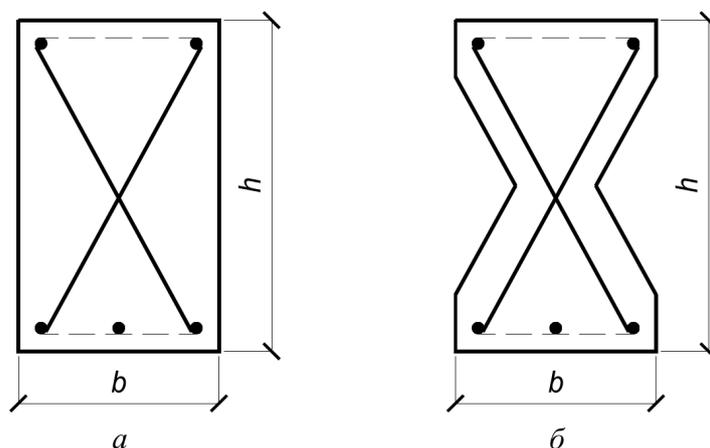


Рис. 1. Поперечные сечения железобетонной балки, армированной плоскими диагональными каркасами: *a* – сечение прямоугольной формы; *б* – сечение с пазами

Fig. 1. Cross sections of concrete beams reinforced with flat diagonal frames: *a* – rectangular cross section; *б* – cross section with grooves

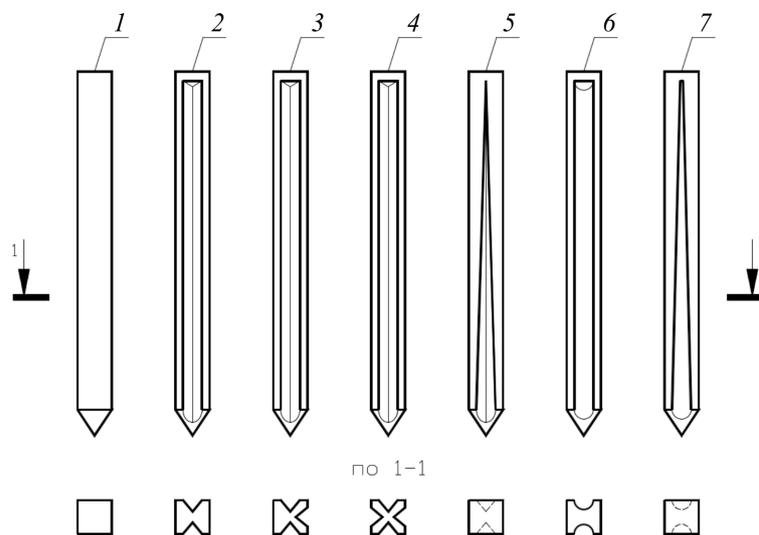


Рис. 2. Конструкции моделей свай, используемых в лабораторных экспериментах: 1 – сплошного квадратного сечения; 2 – с двумя клиновидными пазами постоянной глубины; 3 – тремя клиновидными пазами постоянной глубины; 4 – четырьмя клиновидными пазами постоянной глубины; 5 – двумя клиновидными пазами переменной глубины; 6 – двумя полукруглыми пазами постоянной глубины; 7 – двумя полукруглыми пазами переменной глубины

Fig. 2. Designs of pile models used in laboratory experiments: 1 – solid square section; 2 – two wedge-shaped grooves of constant depth; 3 – three wedge-shaped grooves of constant depth; 4 – four wedge-shaped grooves of constant depth; 5 – two wedge-shaped grooves of variable depth; 6 – two semicircular grooves of constant depth; 7 – two semicircular grooves of variable depth

Металлический лоток размером в плане $1,0 \times 0,6$ и высотой 1,2 м заполнялся однородным суглинком нарушенной структуры от тугопластичной до мягкопластичной консистенции ($I_L = 0,31-0,75$). Укладка грунта в лоток производилась послойно с уплотнением ручной трамбовкой при толщине слоя 15 см. При этом плотность и влажность грунта в ходе всего эксперимента стремились сохранять неизменными, контролируя их после каждого испытания.

Всего было выполнено 97 опытов (40 для моделей свай со сплошным квадратным сечением и клиновидными пазами, 57 для свай с полукруглыми пазами) с 3–8-кратной повторностью для каждого вида моделей свай. В результате лабораторных исследований были получены зависимости осадки свай от действующих на них внешних нагрузок, а также оценены значения их несущей способности [3]. За несущую способность моделей свай принималась такая нагрузка, при которой их осадка на последней ступени нагружения превышала осадку на предыдущей ступени в четыре раза и более.

Для дальнейшего использования полученных результатов указанные зависимости были оцифрованы на компьютере. Оцифрованные данные для моделей свай с клиновидными пазами приведены в табл. 1 и на рис. 3, а для моделей свай с полукруглыми пазами – в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 1

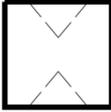
Данные оцифровки зависимостей «нагрузка – осадка» для моделей свай сплошного квадратного сечения и свай с клиновидными пазами (при $I_L = 0,54$)

Table 1

Digitization data of the «load – settlement» dependencies for solid square cross-section pile models and piles with wedge-shaped grooves (with $I_L = 0,54$)

№ п/п	Поперечное сечение сваи	Вид поперечного сечения сваи	Нагрузка на сваю, Н	Осадка сваи, мм	Несущая способность, Н
1	Сплошное квадратное сечение		0	0,0	1250
			400	1,0	
			600	1,3	
			800	1,6	
			1000	2,2	
			1200	4,2	
			1357	17,7	
2	Сечение с двумя клиновидными пазами постоянной глубины		0	0,0	1350
			400	0,8	
			600	1,0	
			800	1,3	
			1000	1,8	
			1200	3,0	
			1400	6,5	
3	Сечение с тремя клиновидными пазами постоянной глубины		0	0,0	1500
			400	0,3	
			600	0,4	
			800	0,5	
			1000	0,7	
			1200	1,2	
			1400	2,4	
			1600	6,9	
1690	14,9				

Окончание табл. 1

№ п/п	Поперечное сечение сваи	Вид поперечного сечения сваи	Нагрузка на сваю, Н	Осадка сваи, мм	Несущая способность, Н
4	Сечение с двумя клиновидными пазами переменной глубины		0	0,0	1400
			400	0,5	
			600	0,8	
			800	0,9	
			1000	1,2	
			1200	1,8	
			1400	3,5	
			1530	12,0	

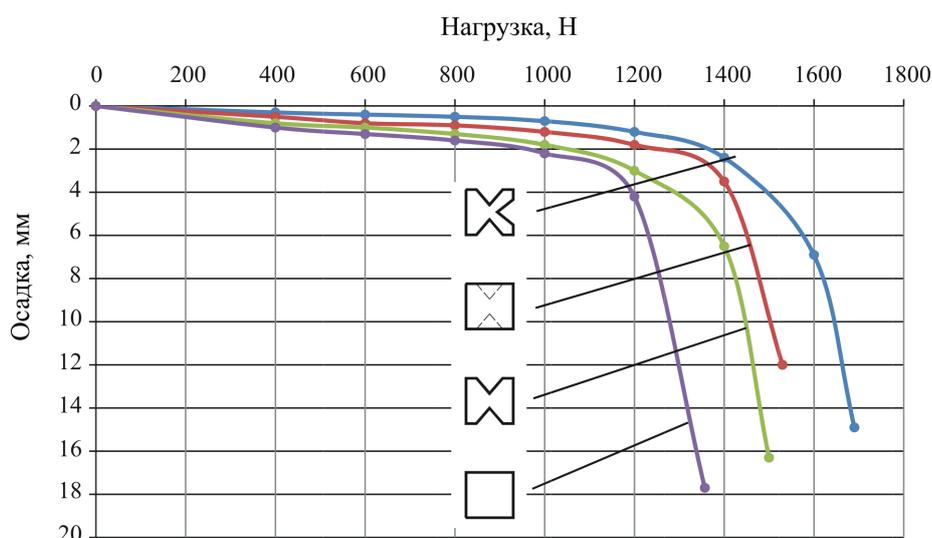


Рис. 3. Зависимости «нагрузка – осадка» для моделей свай сплошного квадратного сечения и свай с клиновидными пазами (получены при оцифровке оригинальных графиков из работы [3])

Fig. 3. «Load – settlement» dependencies for models of solid square cross-section piles and piles with wedge-shaped grooves (obtained by digitizing the original graphs from [3])

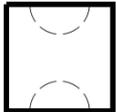
Таблица 2

Данные оцифровки зависимостей «нагрузка – осадка» для моделей свай сплошного квадратного сечения и свай с полукруглыми пазами (при $I_L = 0,7$)

Table 2

Digitization data of the «load – settlement» dependencies for solid square cross-section pile models and piles with semicircular grooves (with $I_L = 0,7$)

№ п/п	Поперечное сечение сваи	Вид поперечного сечения сваи	Нагрузка на сваю, Н	Осадка сваи, мм	Несущая способность, Н
1	Сплошное квадратное сечение		0	0,0	750
			273	0,7	
			494	1,6	
			627	2,9	
			746	6,6	
2	Сечение с двумя овальными пазами постоянной глубины		0	0,0	800
			273	0,7	
			500	1,3	
			628	2,1	

№ п/п	Поперечное сечение сваи	Вид поперечного сечения сваи	Нагрузка на сваю, Н	Осадка сваи, мм	Несущая способность, Н
			743	3,5	
			807	5,4	
3	Сечение с двумя овальными пазами переменной глубины		0	0,0	1000
			273	0,4	
			500	1,0	
			628	1,5	
			750	2,3	
			870	3,5	
			990	5,8	
			1050	7,8	

Анализ результатов лабораторных исследований выявил влияние количества и формы пазов на несущую способность моделей свай, которая в рассматриваемых грунтах увеличивается на 5–20 % [3, 5].

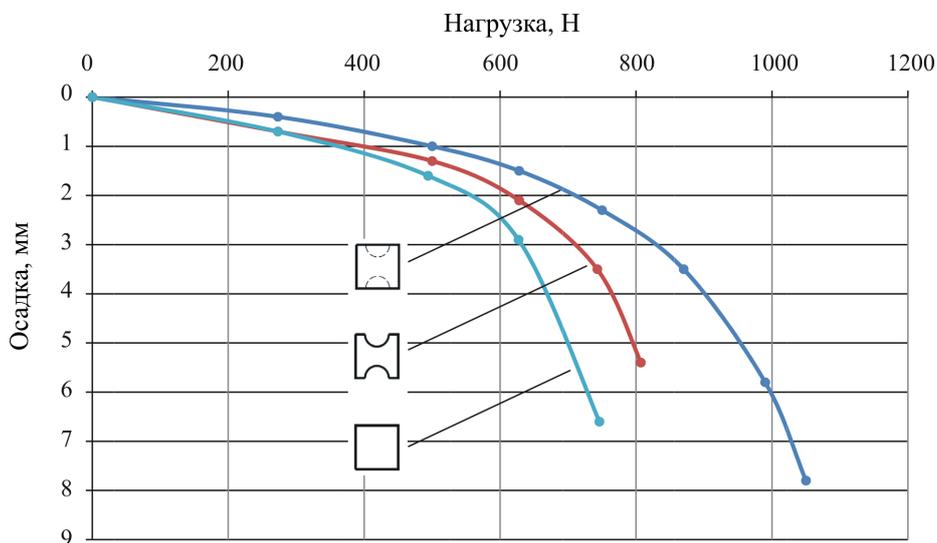


Рис. 4. Зависимости «нагрузка – осадка» для моделей свай сплошного квадратного сечения и свай с полукруглыми пазами (получены при оцифровке оригинальных графиков из работы [3])

Fig. 4. «Load – settlement» dependencies for models of solid square cross-section piles and piles with semicircular grooves (obtained by digitizing the original graphs from [3])

Полевые испытания натуральных железобетонных свай с пазами статической вдавливающей нагрузкой проводились на строительной промплощадке Томского химического завода (г. Томск, 1983) в соответствии с требованиями ГОСТ 5686–78 «Сваи. Методы полевых испытаний» (рис. 5). Испытывалось два вида свай длиной 9 м: сваи сплошного квадратного поперечного сечения 300 × 300 мм и квадратного поперечного сечения 300 × 300 мм с тремя полукруглыми пазами переменной глубины. После погружения свай в грунт они выдерживались 22–36 сут без нагрузки для обеспечения «отдыха» [4, 5]. Опыты проводились с трехкратной повторностью для каждого вида свай. Инженерно-геологические условия площадки были представлены пятью инженерно-геологическими элементами: почвенно-растительный слой мощностью 0,2–0,3 м; суглинок мягкопластичный мощностью 1,2–1,4 м; супесь пластичная мощностью 2,6–3,0 м; глина тугопластичная

мощностью 7,7–8,0 м; суглинок твердый с прослойками песка мощностью 1,5–1,8 м; песок мелкий маловлажный (мощность не установлена). Подземные воды были вскрыты на глубине 2,2–2,3 м в слое пластичной супеси. В результате испытаний рассматриваемых видов свай были получены зависимости «нагрузка–осадка», приведенные в [4, 5], а также определены значения их несущих способностей в соответствии с требованиями СНиП II-17-77 «Свайные фундаменты». Указанные зависимости были также оцифрованы и приведены в табл. 3 и на рис. 6.



a



б

Рис. 5. Полевые испытания натуральных железобетонных свай с пазами на рассматриваемой промплощадке: *a* – общий вид оголовков свай с пазами; *б* – подготовка свай с пазами к погружению
Fig. 5. Full-scale testing of reinforced concrete piles with grooves on the construction site: *a* – general view of pile heads with grooves; *б* – preparing the pile with grooves for immersion

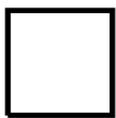
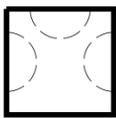
Для сопоставления результатов испытаний свай (лабораторных и полевых) параллельно испытывались призматические модели свай и натурные сваи сплошного квадратного сечения. Проведенные полевые испытания показали увеличение несущей способности свай с пазами по грунту на 5–10 % и снижение их материалоемкости на 15–40 % по сравнению с призматическими сваями сплошного квадратного сечения [4, 5].

Таблица 3

Данные оцифровки зависимостей «нагрузка – осадка» при полевых испытаниях натуральных свай сплошного квадратного сечения и свай с полукруглыми пазами переменной глубины

Table 3

Digitization data of the «load – settlement» dependencies for full-scale testing of piles with solid square cross-section and piles with semicircular grooves of variable depth

№ п/п	Поперечное сечение сваи	Вид поперечного сечения сваи	Нагрузка на сваю, кН	Осадка сваи, мм	Несущая способность, кН
1	Сплошное квадратное сечение		0	0,0	559
			97	0,9	
			196	2,5	
			296	4,8	
			397	8,4	
			495	13,4	
			542	17,1	
			559	20,0	
2	Сечение с тремя овальными пазами переменной глубины		0	0,0	598
			97	0,7	
			196	2,0	
			296	4,2	
			397	7,5	
			449	9,7	
			497	12,3	
			594	20,0	

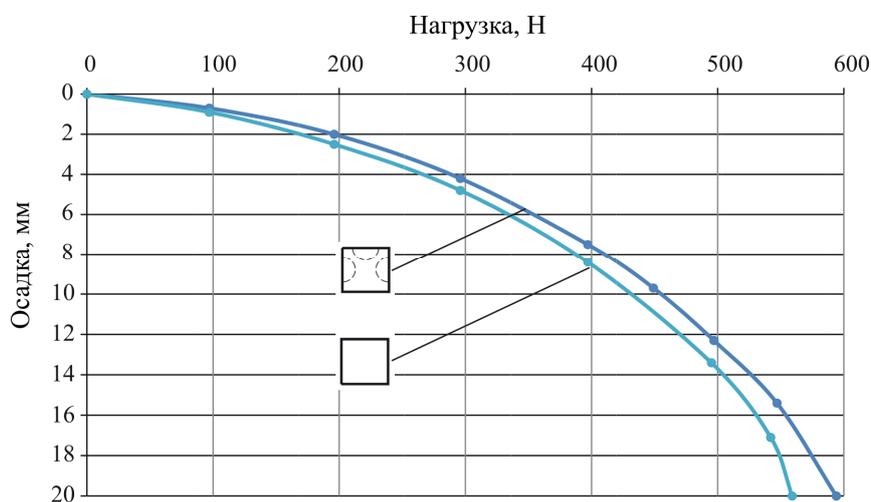


Рис. 6. Зависимости «нагрузка – осадка» при полевых испытаниях натуральных свай сплошного квадратного сечения и свай с полукруглыми пазами переменной глубины (получены при оцифровке оригинальных графиков из работы [4])

Fig. 6. «Load – settlement» dependencies for full-scale testing of piles with solid square cross-section and with semicircular grooves of variable depth (obtained by digitizing the original graphs from [4])

Основная часть

Формула несущей способности сваи по грунту в общем виде может быть получена путем суммирования предельно допустимых (в соответствии с установленным критерием) нагрузок, передаваемых по боковой поверхности и по острию сваи, при условии независимости их действия. Это представление непосредственно следует из механических соображений, подтверждается широким рядом исследований [15–23] и является основой расчетных методов определения несущей способности в нормативных документах. Таким образом, формулу для определения несущей способности сваи F_0 в общем виде можно записать следующим образом:

$$F_0 = \int_A r(x, y) dA + \int_{\omega} f(z) d\omega, \quad (1)$$

где $r(x, y)$ – интенсивность предельно допустимой нагрузки (давление) на грунт под нижним концом сваи (действует нормально к поперечному сечению сваи); dA – дифференциал площади поперечного сечения сваи; $f(z)$ – интенсивность предельно допустимой нагрузки на грунт по боковой поверхности сваи (действует по касательной на боковой поверхности сваи); $d\omega$ – дифференциал площади боковой поверхности сваи.

Первое слагаемое в (1) равно несущей способности сваи по острию, а второе – несущей способности сваи по боковой поверхности. Если усреднить $r(x, y)$ по площади поперечного сечения, а $d\omega$ представить в виде $d\omega = ds \cdot dz$ (где ds – дифференциал длины контура поперечного сечения; dz – дифференциал длины сваи) и ввести новые обозначения, то формула (1) примет более простой вид:

$$F_0 = R_0 \cdot A + u \cdot T, \quad (2)$$

где R_0 – средняя интенсивность предельно допустимой нагрузки (давление), передаваемой на грунт под нижним концом сваи; A – площадь поперечного сечения; u – периметр поперечного сечения сваи; T – предельно допустимая сдвиговая нагрузка, приходящаяся на единицу длины периметра сечения, передаваемая на грунт за счет трения по боковой поверхности.

Указанные величины определяются следующими выражениями:

$$R_0 = \frac{\int_A r(x, y) dA}{A}; \quad A = \int_A dA; \quad u = \int_s ds; \quad T = \int_0^L f(z) dz, \quad (3)$$

где s – контур поперечного сечения сваи; L – длина сваи.

Далее рассмотрим поперечные сечения свай с пазами постоянной глубины клиновидной и полукруглой формы (рис. 7). Количество граней с пазами обозначим через параметр n , который может изменяться от нуля до четырех.

Выделим 1/4 часть поперечного сечения сваи, имеющего клиновидный паз (на рис. 7, а показана штриховкой). Длина участка $ABCDE$ с учетом наличия клиновидного паза равна

$$|ABCDE| = d + 2 \cdot \delta \cdot \left(\frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \right), \quad (4)$$

где d – ширина поперечного сечения сваи; δ – глубина клиновидного паза; β – угол в вершине клиновидного паза.

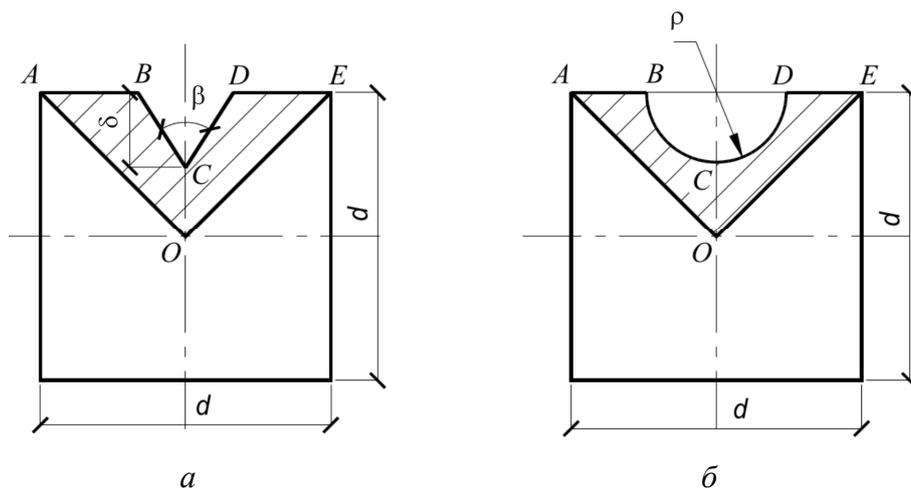


Рис. 7. Поперечные сечения свай с различной формой пазов постоянной глубины:
 а – пазы клиновидной формы; б – пазы полукруглой формы

Fig. 7. Cross sections of piles with different groove shapes of constant depth:
 а – wedge-shaped grooves; б – semicircular grooves

Тогда периметр поперечного сечения сваи, имеющей n граней с пазами и $m = 4 - n$ граней без пазов, будет равен:

$$u = 4 \cdot d + 2 \cdot n \cdot \delta \cdot \left(\frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \right). \quad (5)$$

Площадь заштрихованной фигуры $OABCDE$ определяется формулой

$$A_{OABCDE} = \frac{d^2}{4} - \delta^2 \cdot \tan \frac{\beta}{2}. \quad (6)$$

Площадь всего поперечного сечения сваи, имеющей n граней с пазами и $m = 4 - n$ граней без пазов, будет равна

$$A = d^2 - n \cdot \delta^2 \cdot \tan \frac{\beta}{2}. \quad (7)$$

После подстановки (5) и (7) в (2) и выполнения преобразований формула для определения несущей способности сваи с клиновидными пазами F_0^w примет вид

$$F_0^w = R_0 \cdot d^2 + 4 \cdot d \cdot T - n \cdot R_0 \cdot \tan \frac{\beta}{2} \cdot \delta^2 + 2 \cdot n \cdot T \cdot \left(\frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \right) \cdot \delta. \quad (8)$$

Сумма первого и второго слагаемых $(R_0 \cdot d^2 + 4 \cdot d \cdot T)$ равна несущей способности сваи F_0' того же поперечного сечения, но без пазов. С учетом нового обозначения имеем

$$F_0^w = F_0' - n \cdot R_0 \cdot \tan \frac{\beta}{2} \cdot \delta^2 + 2 \cdot n \cdot T \cdot \left(\frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \right) \cdot \delta. \quad (9)$$

Формулу (9) можно представить в виде

$$F_0^w = F'_0 + \Delta F^w, \quad (10)$$

где ΔF^w – приращение несущей способности сваи за счет клиновидных пазов, определяемое по формуле

$$\Delta F^w = -n \cdot R_0 \cdot \tan \frac{\beta}{2} \cdot \delta^2 + 2 \cdot n \cdot T \cdot \left(\frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \right) \cdot \delta. \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что зависимость приращения несущей способности сваи с клиновидными пазами ΔF^w от глубины паза δ является параболической (полагается, что угол β задан). Максимальное значение приращения несущей способности ΔF^w достигается в вершине параболы (множитель при δ^2 отрицательный, поэтому ветви параболы направлены вниз). Таким образом, получаем простейшую задачу оптимизации, заключающуюся в определении такой глубины паза δ_{opt} , называемой оптимальной, при которой приращение несущей способности ΔF^w (целевая функция) является максимальным. Решение этой задачи можно получить, используя известную формулу для определения абсциссы вершины параболы; подставив в эту формулу соответствующие значения из (11), получим

$$\delta_{opt} = \left(\frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{T}{R_0}. \quad (12)$$

Формула (12) в точности совпадает с соответствующей формулой в работе [24]. Максимум приращения несущей способности сваи ΔF^w_{max} при $\delta = \delta_{opt}$ равен

$$\Delta F^w_{max} = 2 \cdot n \cdot \frac{\left(1 - \sin \frac{\beta}{2} \right)^2}{\sin \beta} \cdot \frac{T^2}{R_0}. \quad (13)$$

Формула (13) обобщает результат, приведенный в работе [24], на случай произвольного количества пазов и при $n = 4$ полностью совпадает с соответствующей формулой в [24].

Далее рассмотрим сечение сваи с полукруглыми пазами (рис. 7, б). Действуя аналогично, получим соответствующие формулы для рассматриваемого случая.

Периметр u и площадь A поперечного сечения сваи, имеющей n граней с полукруглыми пазами и $m = 4 - n$ граней без пазов, будут равны:

$$u = 4 \cdot d + n \cdot (\pi - 2) \cdot \rho, \quad (14)$$

$$A = d^2 - n \cdot \frac{\pi \cdot \rho^2}{2}, \quad (15)$$

где ρ – глубина (радиус) полукруглого паза.

В результате подстановки (14) и (15) в (2) и преобразований получим формулу несущей способности сваи с полукруглыми пазами F^s_0 , которая может быть представлена в виде

$$F^s_0 = F'_0 + \Delta F^s, \quad (16)$$

где F'_0 – несущая способность сваи без пазов того же сечения; ΔF^s – приращение несущей способности сваи с полукруглыми пазами, определяемое по формуле

$$\Delta F^s = -n \cdot R_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \rho^2 + n \cdot T \cdot (\pi - 2) \cdot \rho. \quad (17)$$

Используя тот же подход, что и при получении формулы (12), найдем выражение для оптимальной глубины полукруглого паза ρ_{opt} , которое будет иметь вид

$$\rho_{opt} = \frac{(\pi - 2)}{\pi} \cdot \frac{T}{R_0},$$

или (18)

$$\rho_{opt} = 0,363 \cdot \frac{T}{R_0}.$$

Максимум приращения несущей способности сваи с полукруглыми пазами ΔF^s_{max} при $\rho = \rho_{opt}$ равен:

$$\Delta F^s_{max} = \frac{(\pi - 2)^2}{2 \cdot \pi} \cdot n \cdot \frac{T^2}{R_0}$$

или (19)

$$\Delta F^s_{max} = 0,207 \cdot n \cdot \frac{T^2}{R_0}.$$

Анализируя формулы (10)–(13) и (16)–(19), можно отметить следующее. Для обеих форм пазов (клиновидных и полукруглых) их оптимальная глубина δ_{opt} , ρ_{opt} зависит от величин T и R_0 (определяются механическими свойствами грунтов), длины сваи L , угла в вершине паза β (для клиновидных пазов) и не зависит от количества пазов n . При этом зависимость оптимальной глубины клиновидного паза δ_{opt} от угла β является монотонно убывающей: δ_{opt} изменяется от ∞ до 0 при изменении β соответственно от 0 до π .

Значения несущей способности свай F^w_0 и F^s_0 с пазами оптимальной глубины δ_{opt} и ρ_{opt} превышают несущую способность аналогичной сваи без пазов F'_0 , так как приращения ΔF^w_{max} и ΔF^s_{max} всегда положительны. При этом значения указанных приращений несущей способности прямо пропорционально зависят от количества пазов n .

Выполним сопоставление ΔF^w_{max} и ΔF^s_{max} для обеих форм пазов. Приравняем (13) и (19) и, преобразовав, получим следующее уравнение:

$$\frac{2 \cdot \left(1 - \sin \frac{\beta}{2}\right)^2}{\sin \beta} - \frac{(\pi - 2)^2}{2 \cdot \pi} = 0. \quad (20)$$

Приближенным решением данного уравнения (при $0 < \beta < \pi$) с округлением до целого значения является $\beta \approx 85^\circ$. Обозначим левую часть (20) через $\Phi(\beta)$ и построим ее график (рис. 8). Эта зависимость показывает разность приращений несущей способности свай с клиновидными пазами ΔF^w_{max} и свай с полукруглыми пазами ΔF^s_{max} , умноженную на $R_0 / (nT^2)$. Полученная величина является безразмерной.

Из графика видно, что при $\beta < 85^\circ$ функция $\Phi(\beta)$ положительна, т.е. ΔF^w_{max} превышает ΔF^s_{max} , и по мере уменьшения β это превышение возрастает. Для углов $\beta > 85^\circ$ (до 180°)

функция $\Phi(\beta)$ является отрицательной, т.е. ΔF_{\max}^w меньше, чем ΔF_{\max}^s . Причем с увеличением β разность максимальных приращений несущих способностей ΔF_{\max}^w и ΔF_{\max}^s изменяется менее интенсивно и при $\beta > 120^\circ$ становится почти постоянной.

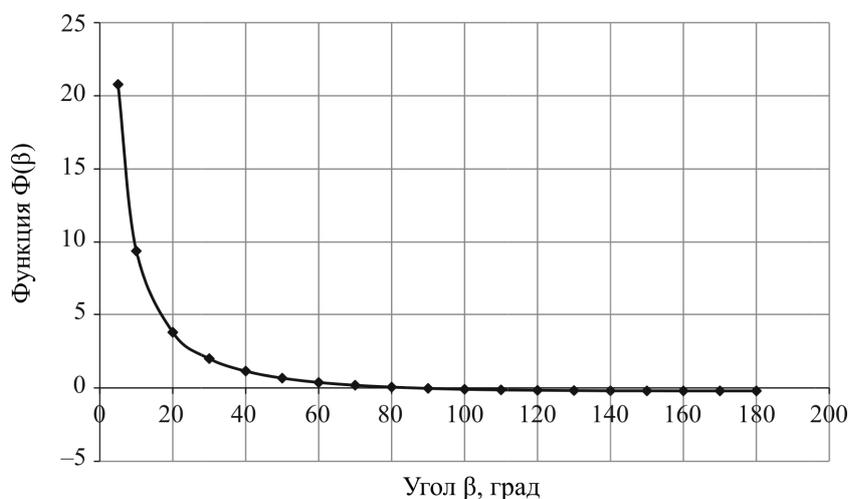


Рис. 8. График функции $\Phi(\beta)$
Fig. 8. Graph of the function $\Phi(\beta)$

Заключение

На основе анализа экспериментальных данных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования (лабораторные и полевые) работы свай с различной геометрической формой пазов (клиновидных и полукруглых) показали, что в глинистых грунтах их несущая способность превышает несущую способность аналогичных призматических свай сплошного квадратного сечения.

2. Теоретические исследования несущей способности свай с различным количеством клиновидных или полукруглых пазов показали следующее. Для свай с клиновидными пазами их оптимальная глубина зависит от механических свойств грунтов, длины свай L и угла в вершине пазов β . Для свай с полукруглыми пазами их оптимальная глубина зависит от механических свойств грунтов, длины свай L . Ширина поперечного сечения свай d и количество пазов n не влияют на оптимальную глубину пазов.

3. В результате теоретических исследований установлено, что для обеих форм пазов при их оптимальной глубине максимальные значения приращений несущих способностей свай ΔF_{\max}^w и ΔF_{\max}^s всегда положительны и их значения прямо пропорционально зависят от количества пазов n . Поэтому несущая способность свай с клиновидными и полукруглыми пазами всегда превышает несущую способность аналогичной сваи без пазов.

4. Сравнительный анализ значений несущей способности свай с клиновидными и полукруглыми пазами оптимальной глубины показал следующее. При угле β в вершине клиновидных пазов менее 85° клиновидная форма пазов является более эффективной. Ее эффективность растет при уменьшении угла β . При угле в вершине клиновидных пазов более 85° (до 180°) более эффективной является полукруглая форма пазов. Ее эффективность при увеличении угла до 120° возрастает незначительно и далее почти не изменяется.

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. Исследование несущей способности свай различной формы / А.И. Полищук, А.И. Мальганов, Ю.А. Калачев, С.В. Петров // Строительство и транспорт: Молодые ученые и специалисты народному хозяйству / под ред. Г.Г. Шмидта. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 18.
2. Болдышев А.М., Мальганов А.И. Исследование железобетонных конструкций, армированных диагонально расположенными каркасами // Исследования по строительным конструкциям и строительной механике: сб. ст. / под ред. А.М. Черняка, А.М. Болдышева. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – С. 17–27.
3. Полищук А.И., Мальганов А.И. Экспериментальные исследования работы моделей свай различной геометрической формы в глинистых грунтах // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии, оснований и фундаментов: сб. ст. / под ред. В.Е. Ольховатенко. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1988. – С. 18–27.
4. Экспериментальные исследования несущей способности забивных свай с пазами / А.И. Полищук, А.М. Болдышев, А.И. Мальганов, В.Ф. Ширяев // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям / под ред. А.М. Черняка. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1989. – 206 с.
5. Полищук А.И., Мальганов А.И., Ширяев В.Ф. Несущая способность забивных свай с пазами в глинистых грунтах. – Томск: Томский инженерно-строительный институт, 1983. – 22 с.
6. Расчет свайных оснований гидротехнических сооружений / С.Н. Левачев, В.Г. Федоровский, Ю.М. Колесников, С.В. Курилло. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
7. Нарбут Р.М. Работа свай в глинистых грунтах. – Л.: Стройиздат, 1972. – 159 с.
8. Meyerhof G.G. Bearing capacity and settlement of pile foundations // Proc. ASCE. – 1976. – Vol. 102, No. GT3.
9. Лаврентьев В.А. Осадки однорядных ленточных свайных фундаментов повышенной несущей способности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1989. – 23 с.
10. Забивная свая: пат. 2049856 Рос. Федерация: МПК E02D 5/30, E02D 5/48 / Кац А.С.; заявитель и патентообладатель Кац А.С. – № 5056645/33; заявл. 26.05.1992; опубл. 10.12.1995. – 3 с.: ил.
11. Kocherzhenko V.V., Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V. Innovative pile technologies in modern foundation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1079, № 5. – P. 052085. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052085
12. Готман А.Л., Гавриков М.Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буронабивных свай и их расчет // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 72–83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08
13. Gotman A.L., Gavrikov M.D. Vertical-load design of a large-size bored pile // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1928, № 1. – P. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012061
14. Полищук А.И., Семенов И.В. Проектирование усиления фундаментов реконструируемых, восстанавливаемых зданий с использованием свай // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.03
15. Тер-Мартиросян З.Г., Тер-Мартиросян 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. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01

16. Тер-Мартirosян З.Г., Филиппов К.А. Решение задачи осадки свай под действием вертикальной статической нагрузки с учетом пластических свойств грунтов основания // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 7. – С. 871–881. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.871-881
17. Готман Н.З., Алехин В.С., Сергеев Ф.В. Определение предельного сопротивления основания свай в составе группы свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02
18. Свайные фундаменты / Н.М. Глотов, А.А. Луга, К.С. Силин, К.С. Завриев. – М.: Транспорт, 1975. – 432 с.
19. Трофименков Ю.Г., Ободовский А.А. Свайные фундаменты для жилых и промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1970. – 240 с.
20. Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.
21. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
22. Van Weele A. A method of separating the bearing capacity of a test pile into skin friction and point resistance // Proc. IV Int. Conf. Soil Mech. – 1957. – Vol. II.
23. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of axially loaded piles // Proc. ASCE. – 1978. – Vol. 104, N GT12.
24. Полищук А.И., Демченко В.А. Обоснование оптимальных размеров клиновидных пазов на боковой поверхности железобетонных свай для повышения их несущей способности по грунту // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск: Лик, 2022. – С. 161–168.

References

1. Polishhuk A.I., Malganov A.I., Kalachev Yu.A., Petrov S.V. Study of bearing capacity of piles of different shapes. *Stroitel'stvo i transport: Molody'e ucheny'e i specialisty` narodnomu khozyajstvu*. Ed. G.G. Shmidt. Tomsk, Tomskii universitet, 1983, pp. 18.
2. Boldyshev A.M., Malganov A.I. Study of reinforced concrete structures reinforced with diagonally arranged frames. *Issledovaniya po stroitel'ny'm konstrukciyam i stroitel'noj mexanike: sb. st.* Eds. A.M. Chernyak, A.M. Boldyshev. Tomsk, Tomskii universitet, 1983, pp. 17–27.
3. Polishhuk A.I., Malganov A.I. Experimental studies of pile models of different geometric shapes in clay soils. *Problemy` gidrogeologii, inzhenernoj geologii, osnovanij i fundamentov: sb. st.* Ed. V.E. Olxovatenko. Tomsk, Tomskii universitet, 1988, pp. 18–27.
4. Polishhuk A.I., Boldyshev A.M., Malganov A.I., Shiryayev V.F. Experimental studies of the bearing capacity of driven piles with slots. *Issledovaniya po stroitel'noj mexanike i stroitel'ny'm konstrukciyam*. Ed. A.M. Chernyak. Tomsk, Tomskii universitet, 1989, 206 p.
5. Polishhuk A.I., Malganov A.I., Shiryayev V.F. Load-bearing capacity of slotted driven piles in clay soils Tomsk, Tomskij inzhenerno-stroitel'ny`j institute, 1983, 22 p.
6. Levachev S.N., Fedorovskij V.G., Kolesnikov Yu.M., Kurillo S.V. Calculation of pile foundations of hydraulic structures. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 136 p.
7. Narbut R.M. Operation of piles in clay soils. Leningrad, Strojizdat, 1972, 159 p.
8. Meyerhof G.G. Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Proc. ASCE*, 1976, vol. 102, N GT3.

9. Lavrent'ev V.A. Settlements of single-row strip pile foundations with increased bearing capacity. Abstract of Ph. D. thesis. Perm, 1989, 23 p.
10. Katz A.S. Zabivnaya svaya [Driven pile]. Patent Rossiiskaia Federaciya no. 2049856 (1995).
11. Kocherzhenko V.V., Suleymanova L.A., Kocherzhenko A.V. Innovative pile technologies in modern foundation construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1079, no. 5, pp. 052085. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052085
12. Gotman A.L., Gavrikov M.D. Calculation of a large-size bored pile on a vertical load. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 72–83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08
13. Gotman A.L., Gavrikov M.D. Vertical-load design of a large-size bored. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, vol. 1928, no. 1, pp. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012061
14. Polishhuk A.I., Semenov I.V. Design of reinforcement of foundations of reconstructed, restored buildings using piles. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 4, pp. 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.03
15. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Yu. Settlement and long-term bearing capacity of the pile taking into account the rheological properties of soils. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01
16. Ter-Martirosyan Z.G., Filippov K.A. Solution of the problem of pile settlement under the action of vertical static load, taking into account plastic properties of foundation soils. *Vestnik MGSU*, 2022, vol. 17, iss. 7, pp. 871–881. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.871-881
17. Gotman N.Z., Alexin V.S., Sergeev F.V. Determination of bearing capacity of piles in the group. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02
18. Glotov N.M., Luga A.A., Silin K.S., Zavriev K.S. Pile foundations. Moscow, Transport, 1975, 432 p.
19. Trofimenkov Yu.G., Obodovskij A.A. Pile foundations for residential and industrial buildings. Moscow, Strojizdat, 1970, 240 p.
20. Dalmatov B.I., Lapshin F.K., Rossixin Yu.V. Design of pile foundations in conditions of weak soils. Leningrad, Strojizdat, 1975, 240 p.
21. Bartolomej A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. Pile foundation settlement forecast. Moscow, Strojizdat, 1994, 384 p.
22. Van Weele A. A method of separating the bearing capacity of a test pile into skin friction and point resistance. *Proc. IV Int. Conf. Soil Mech.* 1957, vol. II.
23. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of axially loaded piles. *Proc. ASCE*, 1978, vol. 104, N GT12.
24. Polishhuk A.I., Demchenko V.A. Calculation on the optimal dimensions of wedge-shaped grooves on the side surface of reinforced concrete piles to increase their bearing capacity of the ground. *Mexanika gruntov v geotexnike i fundamentostroenii: materialy` mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Novocherkassk, Lik, 2022, pp. 161–168.