

УДК 624.154

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВАЙ С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

А.В. Самородов, доц., к.т.н., Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, С.В. Табачников, ассист., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

Аннотация. На основании проведенных лабораторных и теоретических исследований сил сопротивления песчаного грунта по боковой поверхности модельной сваи предлагается новый метод определения несущей способности буровых свай в зависимости от действия выдергивающих или вдавливающих нагрузок, адекватность которого подтверждается натурными испытаниями.

Ключевые слова: метод, свая, боковая поверхность, силы сопротивления, состояние покоя, вертикальная нагрузка.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ ОПОРУ ПО БІЧНІЙ ПОВЕРХНІ ПАЛІ З УРАХУВАННЯМ НАПРЯМКУ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О.В. Самородов, доц., к.т.н., Харківський національний університет будівництва та архітектури, С.В. Табачников, асист., Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Анотація. На підставі проведених лабораторних і теоретичних досліджень сил опору піщаного ґрунту по бічній поверхні модельної палі пропонується новий метод визначення несучої здатності бурових палей залежно від дії висмикувальних або вдавлюючих навантажень, адекватність якого підтверджується натурними випробуваннями.

Ключові слова: метод, паля, бічна поверхня, сили опору, стан спокою, вертикальне навантаження.

THE METHOD FOR DETERMINING THE RESISTANCE FORCES ACTING ON THE LATERAL SURFACE OF PILES IN VIEW OF VERTICAL LOAD DIRECTIONS

A. Samorodov, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, S. Tabachnikov, T. Asst., National University of Urban Economy after O. Beketov, Kharkiv

Abstract. On the basis of laboratory and theoretical studies of the resistance forces of sandy ground on the lateral surface of the pile model proposes a new method for determining the bearing capacity of bored piles depending on the action pulling or pressed loads, the adequacy of which is confirmed by field tests.

Key words: pile, model, the lateral surface, resistance force, resting state, vertical load.

Введение

В действующих нормативных документах [1], основанных на известном СНиПе по

свайным фундаментам, отсутствует учет направленности вертикальной нагрузки (вдавливающей или выдергивающей) при определении несущей способности по боко-

вой поверхности свай. При этом, если принять во внимание коэффициенты условий работы свай в грунте γ_c , то соотношение несущих способностей за счет сил сопротивления по боковой поверхности f при вдавливании и выдергивании будет равно $F_{d,f}/F_{du}=1,25$.

Анализ публикаций

Впервые в работе В.Г. Березанцева и Го Нин [2] предлагалось учитывать напряженное состояние околосвайного массива грунта, представленного в виде линейно-деформированного полупространства, от действия равномерно распределенной вдавливающей нагрузки вдоль ствола свай с применением решения Миндлина, однако для выдергивающих нагрузок такой подход не применим.

В своих теоретических исследованиях работы свай на вдавливание и выдергивание В.Н. Морозов [3] принимает работу свай в упругом полупространстве в виде равномерно распределенного трения по боковой поверхности свай, направленного соответственно вниз и вверх, и решает осесимметричную задачу с некоторыми допущениями о распределении бокового давления на сваю. Причем при действии противоположных сил трения (вдавливании и выдергивании) у всех определяемых величин меняется только знак на обратный. При этом автор делает вывод об увеличении именно в верхней части бокового давления грунта на ствол свай при погружении, что противоречит решению [2] и современным исследованиям [4], а также о равенстве сил сопротивления по боковой поверхности свай при действии вдавливающей и выдергивающей нагрузки в случае длинных свай с малыми диаметрами. Именно поэтому для подтверждения аналитического решения В.Н. Морозовым выполнены эксперименты [5] с дополнительной пригрузкой на поверхности, которая в десятки раз превышает давление по глубине опытных свай, что, собственно, и обеспечивает основное давление на боковую поверхность свай, но не имеет смысла в области исследования несущей способности грунтового основания на действие разнонаправленных нагрузок на сваи.

С помощью запатентованного нами способа [6] проведен лотковый эксперимент [8] для выявления характера распределения по

длине L многосекционной модельной сваи сил сопротивления песчаного грунта по боковой поверхности в состоянии покоя T_0 [7], т.е. без учета вертикальной нагрузки, а также проанализировано влияние действия вдавливающей и выдергивающей нагрузок на изменение несущей способности песчаного грунта по боковой поверхности. При этом установлено, что соотношение значений несущих способностей при вдавливании и выдергивании находится в пределах $2,2 \leq F_{d,f}/F_{du} \leq 2,9$, в зависимости от соотношений длины свай к ее диаметру L/d .

На основании вышесказанного можно констатировать, что направление вертикальной нагрузки является одним из основных факторов, влияющих на изменение напряженного состояния околосвайного массива грунта, и имеет принципиальное значение при определении несущей способности по боковой поверхности свай. Однако до настоящего времени инженерных методов, учитывающих этот фактор, не предложено.

Цель и постановка задачи

Целью статьи является предложение нового метода и разработка методики по определению несущей способности по боковой поверхности свай при действии выдергивающих и вдавливающих нагрузок.

Обоснование и суть предлагаемого метода

Предлагаемый метод основывается на дифференцированном подходе к определению несущей способности по боковой поверхности свай, технология производства которых позволяет рассматривать сдвиг вдоль ствола свай по схеме «грунт по грунту» (буровые, набивные и др.):

– определяются суммарные силы сопротивления вдоль ствола свай в состоянии покоя T_0 в зависимости от напряженного состояния околосвайного массива и физико-механических характеристик (γ , μ , ϕ и c) слагающих его слоев (здесь под «состоянием покоя» понимается состояние без учета вертикальной нагрузки);

– определяется дополнительное усилие обжатия T_{du} или T_d при действии соответственно вертикального выдергивающего или вдавливающего усилий.

Суммарная сила сопротивления в состоянии покоя T_0 определяется в соответствии с предложенной расчетной схемой (рис. 1) и равна

$$T_0 = u \cdot \sum f_{0,i} \cdot h_i, \quad (1)$$

где u и h_i – периметр поперечного сечения ствола сваи и толщина i -го слоя грунта, взаимодействующего с боковой поверхностью сваи соответственно;

$$f_{0,i} = (\sigma_{zg,i} + q) \cdot k_{zg,i} \cdot \lambda_{0,i} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + k_c \cdot c_i,$$

$k_{zg,i}$ – коэффициент затухания напряжений от собственного веса грунта $\sigma_{zg,i}$ (рис. 1) околоствойного массива в состоянии покоя (табл. 1, рис. 2), зависящий от относительной глубины z/d рассматриваемого i -го слоя; q – сплошная равномерно распределенная нагрузка в уровне головы сваи, например, от вышележащего грунта и др.; $\lambda_{0,i} = \frac{v_i}{1 - v_i} \frac{1}{2}$ –

коэффициент бокового давления грунта в середине i -го слоя; v_i – коэффициент Пуассона грунта в середине i -го слоя; c_i – сцепление грунта i -го слоя; k_c – коэффициент, учитывающий уменьшение сцепления c грунта в результате сдвига и назначаемый в зависимости от консистенции грунта [9].

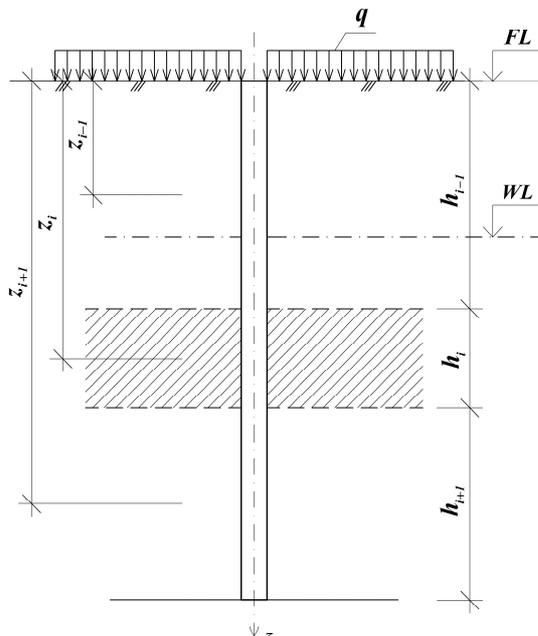


Рис.1. Расчетная схема к определению суммарной силы сопротивления T_0 в состоянии покоя

Следует отметить, что коэффициент $k_{zg,i}$ получен нами на основании лабораторных ис-

следований [7, 8], который учитывает напряженное состояние околоствойного массива грунта в состоянии покоя. Так как в лабораторных условиях нами исследовался характер затухания напряжений до относительной глубины $z/d \leq 21,7$, то для больших значений z/d зависимость принята согласно решения В.Г. Березанцева [9] для осесимметричной задачи взаимодействия круглого в плане вертикального сооружения с сыпучей средой в состоянии предельного равновесия.

Таблица 1 Значения коэффициента затухания напряжений k_{zg} от относительной глубины z/d

z/d	k_{zg}	z/d	k_{zg}	z/d	k_{zg}	z/d	k_{zg}
0	1,00	10	0,49	20	0,32	30	0,23
1	0,87	11	0,46	21	0,31	31	0,22
2	0,80	12	0,44	22	0,30	32	0,21
3	0,74	13	0,42	23	0,29	33	0,20
4	0,69	14	0,41	24	0,28	34	0,20
5	0,64	15	0,39	25	0,27	35	0,19
6	0,61	16	0,37	26	0,26	36	0,18
7	0,57	17	0,36	27	0,25	37	0,18
8	0,54	18	0,35	28	0,24	38	0,17
9	0,51	19	0,33	29	0,23	39	0,16

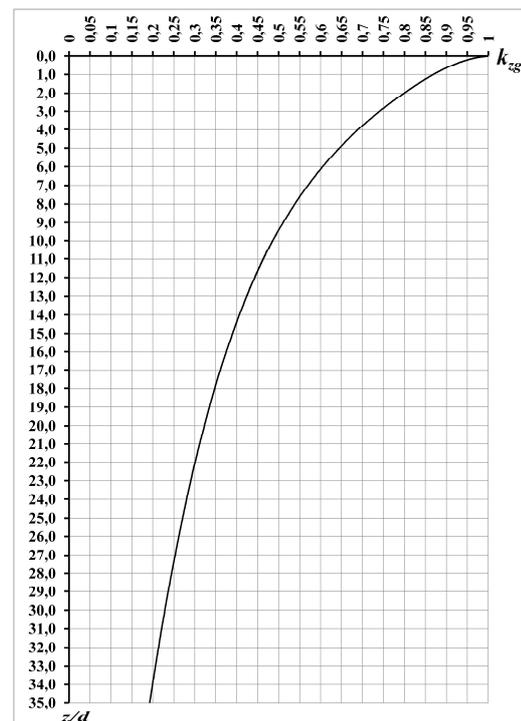


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания напряжений k_{zg} от относительной глубины z/d

Для определения дополнительных сил T_{du} обжатия грунта при действии выдергивающей нагрузки предложена расчетная схема на рис. 3, где распределение вертикальных на-

пряжений от действия касательных сил вдоль ствола сваи принято согласно инженерному подходу норм [1] при формировании подошвы условного фундамента.

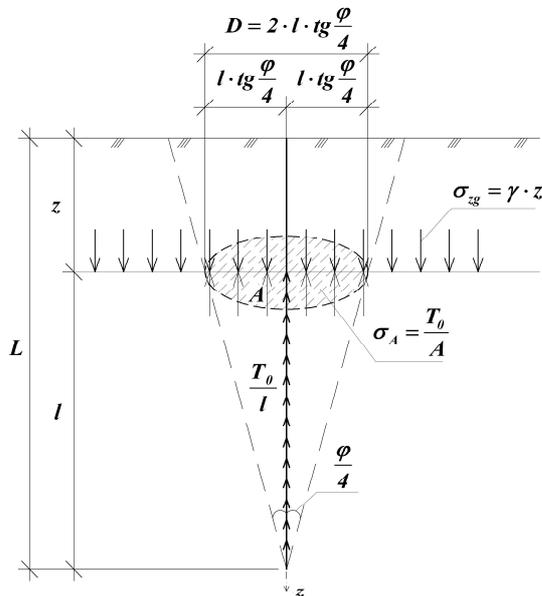


Рис. 3. Расчетная схема к определению дополнительной силы обжатия T_{du} от действия выдергивающей равномерно распределенной нагрузки T_0/l

Дополнительная сила обжатия T_{du} будет равна

$$T_{du} = \sigma_A \cdot l \cdot u \cdot \lambda_{0,сп} \cdot \text{tg} \varphi, \quad (2)$$

где l – расчетная длина сваи; φ – среднее значение угла внутреннего трения грунта в пределах расчетной длины l сваи.

$$\sigma_A = \frac{T_0}{\pi \cdot l^2 \cdot \text{tg}^2 \frac{\varphi}{4}}$$

напряжение от выдергивающей равномерно распределенной нагрузки T_0/l на глубине z , равное по модулю и противоположное по направлению давлению от собственного веса грунта σ_{zg}

$$\sigma_A = \sigma_{zg}. \quad (3)$$

Выражение (3) можно записать в виде

$$l^3 - L \cdot l^2 + C = 0, \quad (4)$$

где $C = \frac{T_0}{\pi \cdot \gamma \cdot \text{tg}^2 \frac{\varphi}{4}}$; γ – среднее значение

удельного веса грунтов в пределах глубины z .

Решение кубического уравнения (4) предложено в графическом виде на рис. 4.

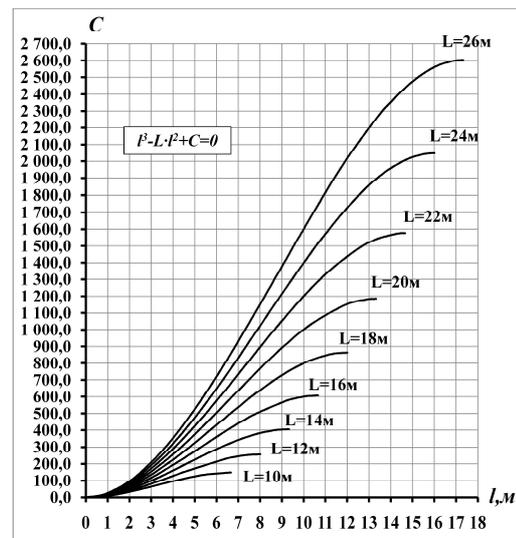


Рис. 4. Графики зависимости расчетной длины l от величины C

С помощью графиков рис. 4 можно определить расчетную длину l для принятой длины сваи L в зависимости от величины C . В случаях, когда значение величины C является большим, чем значение, соответствующее экстремуму графика зависимости для необходимой длины сваи L , то расчетную величину l следует принимать такой, которая соответствует экстремуму этого графика. Например, если для сваи длиной $L=24$ м соответствующее значение величины C будет больше максимального значения 2050, то расчетную длину l следует принимать равной 16 м. Следует отметить, что оптимальное соотношение l/L стремится к значению $l/L \approx 2/3$.

В итоге несущую способность по боковой поверхности сваи запишем в виде

$$F_{d,f}(F_{du}) = \frac{F_{d,f}}{F_{du}}(T_0 + T_{du}) = k_f(T_0 + T_{du}), \quad (5)$$

где k_f – коэффициент, учитывающий направление вертикальной нагрузки и принимаемый равным: $k_f = 1$ – при действии выдергивающей нагрузки; $k_f = 2,2$ – при действии вдавливающей нагрузки.

Отмечаем, что эмпирический коэффициент k_f при действии вдавливающей нагрузки принят для надежности минимальным, однако, согласно наших исследований, и при соответствующем обосновании его значения могут быть повышены в зависимости от L/d (рис. 5).



Рис. 5. График зависимости коэффициента k_f от L/d при действии вдавливающей нагрузки

Для апробации предложенной методики проведены расчеты несущей способности по боковой поверхности буроинъекционных свай с различными геометрическими параметрами в различных грунтовых условиях (как в обводненных песчано-глинистых, так и в обводненных песчаных грунтах) при действии разнонаправленных вертикальных нагрузок, а также приведено сравнение с современными нормами [1].

Схемы расположения свай в грунтовых массивах представлены на рис. 6–8.

Физико-механические свойства грунтов приведены в табл. 2–4. Полученные данные сравниваются со значениями несущей способности при натуральных испытаниях этих свай (табл. 5).

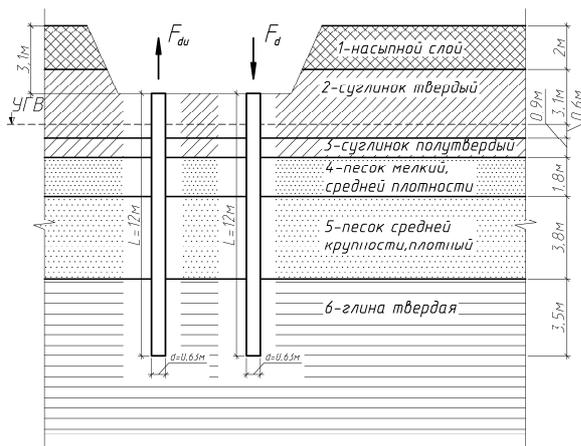


Рис. 6. Расчетная схема расположения свай в грунтовом массиве при реконструкции стадиона «Металлист» в г. Харькове

Испытания 12-метровых буроинъекционных свай $\varnothing 620$ мм проводились в грунтах природной влажности.

Таблица 2 Физико-механические свойства грунтов к расчетной схеме на рис. 6

Усл. обознач.	Ед. изм.	Слой					
		1 – насыпной грунт	2 – суглинок твердый	3 – суглинок полутвердый	4 – песок мелк., средн. плотн.	5 – песок средней крупн., плотн.	6 – глина тверд.
γ	кН/м ³	16,3	19,1	20,1	18,0	20,0	17,6
γ_{sat}	кН/м ³	-	20,4	20,6	21,2	22,9	-
γ_s	кН/м ³	-	27,1	27,1	26,6	26,6	27,4
γ_{sb}	кН/м ³	-	10,7	11,2	10,1	10,3	-
w	д.ед	-	0,14	0,17	0,06	0,06	-
e	д.ед	-	0,60	0,53	0,65	0,55	0,82
c	кПа	-	35	40	8	8	23
φ	град.	-	24	25	36	38	22
E	МПа	-	20	28	32	40	15
I_L	д.ед	-	0	0,15	-	-	0,1
I_P	д.ед	-	0,1	0,11	-	-	0,16

Следует отметить, что слой №6 (табл. 2) является глиной твердой (глиной зеленой, темнозеленой, твердой). Слой принадлежит к глинам палеогенового возраста, имеет значение показателя пластичности, равное 0,16, которое по нормативным документам соответствует суглинкам.

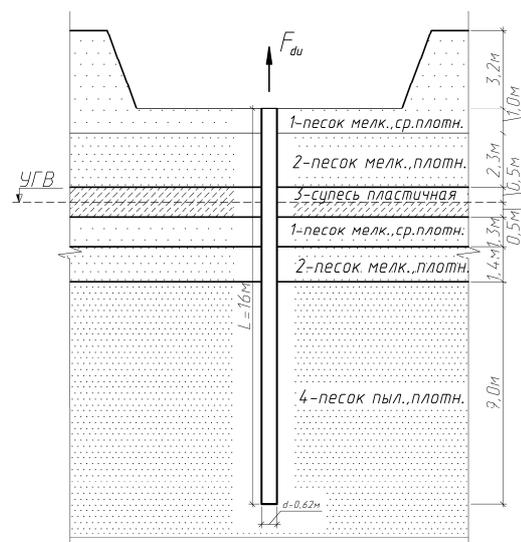


Рис. 7. Расчетная схема расположения свай в грунтовом массиве на площадке строительства жилмассива «Лесной квартал» в г. Бровары Киевской области

Испытания 16-метровой буроинъекционной сваи Ø 620 мм проводились в грунтах природной влажности. Испытания являлись контрольными.

Таблица 3 Физико-механические свойства грунтов к расчетной схеме на рис. 7

Усл. обознач.	Ед. изм.	Слой			
		1 – песок мелк., средн. плотн.	2 – песок мелк., плотный	3 – супесь пластичная опесчанная	4 – песок пылеватый, плотный
γ	кН/м ³	16,5	18,3	17,6	19,4
γ_{sat}	кН/м ³	19,0	20,4	18,7	20,8
γ_s	кН/м ³	26,6	26,6	26,6	26,6
γ_{sb}	кН/м ³	9,8	10,7	9,0	11,2
w	д.ед	0,09	0,08	0,24	0,10
e	д.ед	0,7	0,55	0,85	0,48
c	кПа	-	3	5	5
ϕ	град.	27	33	16	32
E	МПа	23	38	7	37
I_L	д.ед	-	-	0,73	-
I_P	д.ед	-	-	0,06	-

Испытания 20-метровых буроинъекционных свай Ø620 мм проводились в грунтах природной влажности.

Руководствуясь методикой на основании предложенного метода и рекомендациями ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1, были проведены соответствующие расчеты по определению несущей способности рассматриваемых свай.

Таблица 4 Физико-механические свойства грунтов к расчетной схеме на рис. 8

Усл. обознач.	Ед. изм.	Слой			
		1 – песок мелк., средн. плотн.	2 – песок пылеватый, средн. плотн.	3 – песок пылеватый, плотный	4 – песок мелкий, плотн.
γ	кН/м ³	16,5	17,1	19,4	21,3
γ_{sat}	кН/м ³	19,0	19,5	20,8	21,5
γ_s	кН/м ³	26,6	26,6	26,6	26,6
γ_{sb}	кН/м ³	9,8	9,9	11,2	11,4
w	д.ед	0,09	0,10	0,10	0,17
e	д.ед	0,7	0,68	0,48	0,48
c	кПа	-	2	5	4
ϕ	град.	27	26	32	35
E	МПа	23	15	37	48
I_L	д.ед	-	-	-	-
I_P	д.ед	-	-	-	-

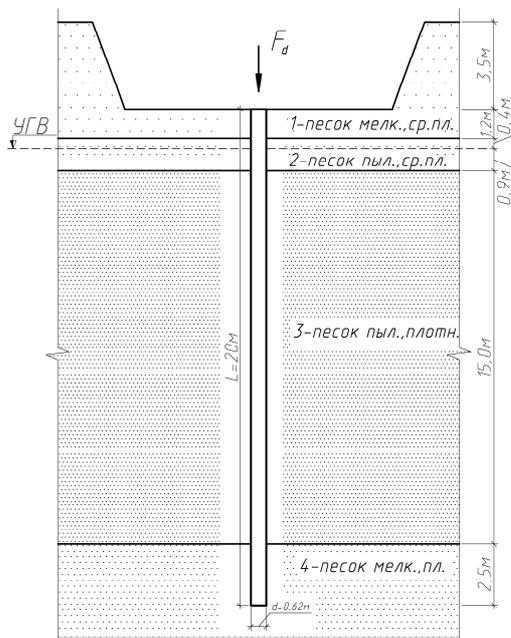


Рис. 8. Расчетная схема расположения свай в грунтовом массиве на площадке строительства жилмассива «Лесной квартал» в г. Бровары Киевской области

Таблица 5 Сравнение результатов

Рисунок (расч. схема)	Тип данных			Расхождение	
	Нормы, кН	Метод, кН	Натурн. испыт., кН	Нормы с натурн. испыт., %	Метод с натурн. испыт., %
Значения несущей способности по боковой поверхности свай при действии выдергивающих нагрузок					
6	763,3	934,8	930,3	-18	+0,5
7	654,4	737,4	784,1	-17	+6
Значения несущей способности по боковой поверхности свай при действии вдавливающих нагрузок					
6	954,2	2056,6	2128,5	-45	-3,4
8	1064,7	2083,4	2159,0	-33	-3,5

В табл. 5 значения несущей способности приведены только по боковой поверхности свай (Σf), т.е. без учета собственного веса свай при выдергивающих нагрузках, а также без учета влияния расчётного сопротивления под нижним концом свай, R , которое принималось равным для любой методики в соответствии с нормами [1].

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложен новый метод определения несущей способности по боковой поверхности свай, учитывающий направление вертикальной нагрузки: выдергивающая или вдавливающая.
2. Впервые предложено выделять силы сопротивления по боковой поверхности сваи только за счет формирования околосвайного напряженного состояния от собственного веса грунта без влияния вертикальных нагрузок, т.е. условно – в состоянии покоя.
3. Получено теоретическое решение для учета дополнительной силы обжатия боковой поверхности сваи при действии выдергивающей нагрузки, а также эмпирически предложено учитывать эти силы при вдавливающей нагрузке.
4. На основании нового метода усовершенствована методика по определению несущей способности свай, результаты которой дают расхождение с натурными данными испытаний не более 6 %.
5. Результаты проведенных исследований показывают недоучет нормативной методикой влияния именно сопротивления по боковой поверхности свай на общую несущую способность.

Литература

1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1. – Чинний від 2011-07-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
2. Березанцев В.Г. К вопросу об определении несущей способности свай / В.Г. Березанцев, Го Нин // Н.-т. бюллетень «Основания и фундаменты». – М.: Госстройиздат. – 1959. – № 22. – С. 3–6.
3. Морозов В.Н. Теоретическое определение изменения величины бокового давления грунта на сваю при вертикальных нагрузках / В.Н. Морозов // Научные

- труды ЛИСИ. Основания и фундаменты. – 1962. – № 37. – С. 139–146.
4. Новский А.В. Сопротивление по боковой поверхности свай в условиях водонасыщенных грунтов одесского региона / А.В. Новский, Ю.Ф. Тугаенко, Л.А. Василевская, В.А. Новский // Будівельні конструкції: міжвід. науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – 2008. – Вип. 71. – С. 416 – 420.
 5. Морозов В.Н. Экспериментальное определение величины бокового давления грунта на сваю / В.Н. Морозов // Научные труды ЛИСИ. Основания и фундаменты. – 1962. – № 37. – С. 147–153.
 6. Пат. 96859 Україна, МПК (2012) G 01 L 7/00-23/32. Спосіб визначення нормального тиску сипучих матеріалів на конструкції огорож; заявник О.В. Самородов, І.Я. Лучковський, А.В. Убийвовк, С.В. Табачников, патентовласник Харківський національний університет будівництва та архітектури. № заявл. 20.05.2010; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23. – 4 с.
 7. Самородов А.В. Способ определения сил сопротивления песчаного грунта по боковой поверхности модельной сваи в состоянии покоя / А.В. Самородов, С.В. Табачников // Науковий вісник будівництва. – 2015. – Вип. 5(79). (подана в редакцію).
 8. Табачников С.В. Экспериментальные исследования сил сопротивления по боковой поверхности моделей свай / С.В. Табачников // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – 2015. – Вип. 1(43). (подана в редакцію).
 9. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др.; под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с. – (Справочник проектировщика).
 10. Самородов А.В. Полевые исследования несущей способности буринъекционных свай при действии выдергивающих и вдавливающих нагрузок / А.В. Самородов, С.В. Табачников // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – 2012. – Вип. 4(34). – С. 239–245.

Рецензент: В.П. Кожушко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2014 г.