

УДК 624.131.35: 624.154.1

УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЙ СВАЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

канд. техн. наук **Б. МОРАДИ САНИ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен уточненный метод оценки при проектировании несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования в песках посредством более достоверных корреляционных зависимостей с поправочными коэффициентами, исходя из принятой активной зоны и учета характера опрессовки окружающего грунта за счет особенностей технологии устройства и размеров свай. Предлагаемый метод определения в песчаных грунтах несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования позволяет учитывать технологию устройства свай (набивные и забивные свай), диаметры их стволов и глубину погружения в несущие слои.

Ключевые слова: основания свай, песчаные грунты, несущая способность, уточненная методика, поправочные коэффициенты.

Введение. Проблемы проведения изысканий при проектировании усиления фундаментов связаны с необходимостью получения достоверной информации в минимально возможные сроки и в стесненных условиях. Этим условиям отвечают методы скоростных изысканий, в частности статическое зондирование.

Фактические несущие способности оснований свай превышают в среднем в 1,33 раза расчетную несущую способность по П2-2000 к СНБ [1] и при статистической обработке выходят за пределы $\pm 20\%$ от линии абсолютной сходимости [2], что требует корректировки применяемого метода расчета несущей способности.

В данной статье представлена уточненная методика определения несущей способности забивных и набивных свай в песчаных грунтах на основании результатов статического зондирования (зонды II и III типов). Сущность предлагаемого метода, разработанного на базе синтеза существующих методов и собственных исследований, заключается в использовании известных формул с введением в них поправочных коэффициентов, а также схем выполнения зондирования грунтов. Уточненный метод проверен по данным сопоставления этих результатов с полученными при испытании 67 натуральных свай статическими нагрузками на двух объектах [3; 4].

Несущая способность свай. Несущую способность песчаных грунтов в основании сваи со стволом постоянного сечения определяем по следующей формуле:

$$Q = Q_b + Q_s = k_c \cdot \bar{q}_c \cdot A_b + k_f \cdot f_p \cdot A_s, \quad (1)$$

где Q_b – сопротивление грунта под нижней пятой сваи, кН; Q_s – сопротивление грунта вдоль ствола сваи, кН; k_c – поправочный коэффициент условий работы грунта под пятой сваи; \bar{q}_c – среднее значение сопротивления грунта в пределах активной зоны у пяты сваи по данным статического зондирования, МПа; A_b – площадь поперечного сечения ствола или пяты сваи в месте наибольшего ее уширения, м^2 ; k_f – поправочный коэффициент условий работы грунта вдоль боковой поверхности ствола сваи, безразм.; f_p – среднее значение сопротивления грунта сдвигу вдоль боковой поверхности ствола сваи, МПа; A_s – площадь боковой поверхности ствола сваи, м^2 .

В случае наличия уширения вдоль стволов свай следует дополнительно учитывать доли сопротивления грунтов под их кольцевыми опорными поверхностями на соответствующих глубинах.

Поправочные коэффициенты k_c и k_f , согласно исследованиям автора, предлагается определять по следующим формулам [5]:

$$k_c = \alpha \left(\frac{\bar{q}_c}{P_A} \right)^{-0,455} \quad \text{и} \quad k_f = \left(\frac{A_o}{2A_s} \right)^{-0,455}, \quad (2)$$

где A_o – площадь боковой поверхности на единицу длины ствола сваи, $A_o = 1 \text{ м}^2$; A_s – площадь боковой поверхности ствола сваи, м^2 ; P_A – сопротивление грунта, $P_A = 1 \text{ МПа}$; α – коэффициент, учитывающий технологию погружения свай, глубину ее погружения в несущий слой грунта с его мощностями в уплотненной зоне выше и ниже пяты свай, принимаем 1,9 для всех схем, кроме схемы II, для которой коэффициент α определяем его по таблице 1.

При назначении коэффициентов k_c и k_f используем следующие условия: при $\bar{q}_c > 25$ МПа принимаем $\bar{q}_c = 25$ МПа; при $\bar{f}_p > 0,125$ МПа принимаем $k_f = \left(\frac{A_0}{A_s}\right)$.

Таблица 1. – Значение l_1 , l_2 , α для разных глубин погружения в несущий слой грунта (h_d) при разных видах свай и диаметрах их стволов

Глубина погружения конца свай в несущий слой грунта	Вариант схемы II	l_1	l_2	Набивные сваи		Забивные сваи
				$D = 0,36$ м	$D = 0,9$ м	$D = 0,3$ м
				α		
$h_d < 8D$	1	$1,5D$	$1,5D$	1,9	1,15	1,9
$h_d \geq 8D$	2	$2D$	$4D$	1,9	1,5	2,5
	3	$1D$	$2D$	1,5	1,5	2,5

Среднее значение сопротивления грунта в пределах активной зоны у пяты свай. Среднее сопротивление грунта под конусом зонда в пределах уплотненной (активной) зоны у конца свай определяется по следующей формуле:

$$\bar{q}_c = \frac{1}{A+B} \int_{h-A}^{h+B} q_c(h) \cdot dh, \quad (3)$$

где A – толщина i -го слоя грунта выше конца свай в пределах активной зоны, м; B – толщина i -го слоя грунта ниже конца свай в пределах активной зоны, м; q_c – среднее значение удельного сопротивления i -го слоя грунта под наконечником зонда, МПа; h – длина свай, м.

Пределы активных зон (A) и (B) определяются в соответствии со схемами расположения слоев грунта возле нижних концов свай. В рассматриваемом автором случае выделено пять видов схем [5]:

Схема I (рис. 1) – расположение свай в однородном грунте. При этом толщина i -го слоя грунта выше ее пяты в пределах активной зоны принимает значение четырехкратного диаметра свай ($A = 4D$), а толщина i -го слоя грунта ниже пяты в пределах активной зоны равна диаметру свай, т.е. $B = 1D$ (D – диаметр ствола свай, м).

Схема II (рис. 2) – неоднородные грунты, которые в конце свай имеют несущий слой песчаного грунта, причем под нижним концом ствола располагаются слои с большими значениями сопротивлений, выше – с меньшими их значениями. В данной схеме A и B принимают значения l_1 и l_2 соответственно. Расчет по схеме II осуществляется по трем вариантам, при этом значения l_1 и l_2 зависят от высоты погружения конца свай в несущий слой и от варианта схемы.

Далее приведем описание трех возможных вариантов схемы II:

- **вариант 1** (рис. 2.1) – глубина погружения свай в несущий слой грунта не превышает восьми диаметров свай. В этом варианте толщины i -х слоев грунта выше и ниже конца свай в активной зоне одинаковы со значением $A = B = 1,5D$;

- **вариант 2** (рис. 2.2) – глубина погружения свай в несущий слой грунта превышает $8D$, а ее конец находится в слабо- или среднеуплотненных песках. При этом в пределах активной зоны толщина i -го слоя грунта выше конца свай составляет $A = 2D$, ниже его – $B = 4D$. Однако в отличие от варианта 1 схемы II в данном случае принимается измененное значение коэффициента α , который учитывает технологию погружения и диаметр свай (табл. 2);

- **вариант 3** (рис. 2.3) – глубина погружения свай в несущий слой грунта превышает $8D$, а ее конец находится в сильноуплотненном песке. При этом в пределах активной зоны толщины i -х слоев грунта принимают значения выше конца свай $A = 1D$, а ниже его – $B = 2D$.

В целом для схемы II при определении несущей способности свай по данным статического зондирования следует принимать значения l_1 , l_2 , а для разных глубин (высот) погружения в несущий слой грунта (h_d) при разных видах свай и диаметрах их стволов согласно таблице 1.

Схема III (рис. 3) представляет собой особый случай схемы II, когда ниже конца свай имеются слои грунта с большими значениями сопротивлений конуса, а выше залегают слои слабых грунтов (ил, торф и др.). По данной схеме в пределах активной зоны выше конца свай толщины i -х слоев грунта принимают значения: в конце свай толщины несущего слоя $A = S$ (S – толщина несущего грунта в конце свай), а ниже ее конца в пределах активной зоны $B = 1D$. При этом пределы зоны (A) не охватывают несущий грунт.

Схема IV (рис. 4) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца свай залегают грунты с меньшими, а выше – с большими значениями сопротивлений конуса. В этом случае толщины i -х слоев грунта в пределах активной зоны принимают значения: выше конца свай $A = 2D$, а ниже его – $B = 4D$.

Схема V (рис. 5) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца свай залегают грунты с большими значениями сопротивления конуса, в то же время выше и ниже имеются слои грунта с меньшими значениями сопротивлений конуса.

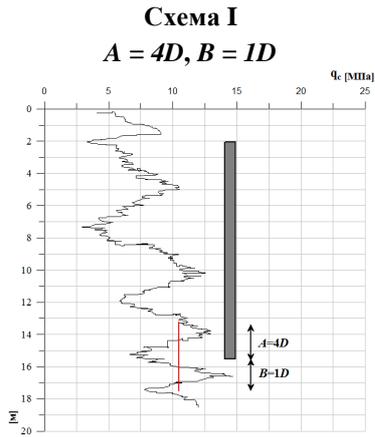
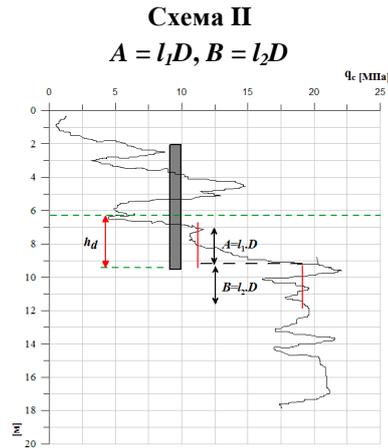


Рисунок 1. – Однородный грунт



D – диаметр сваи; h_d – заглубленная часть сваи погружена в несущий слой

Рисунок 2. Неоднородный грунт, ниже конца сваи располагаются слои грунта с большими значениями сопротивлений, выше – с меньшими их значениями:

Варианты для схемы II

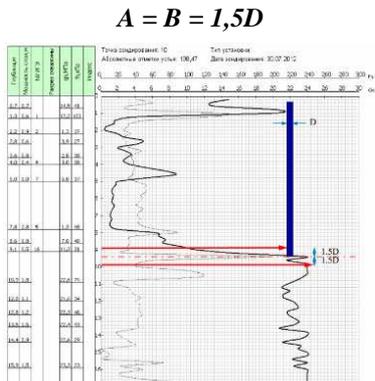


Рисунок 2.1. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают слои грунтов с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

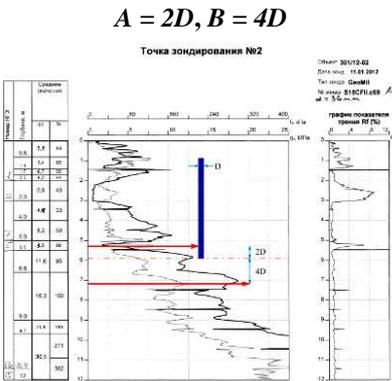


Рисунок 2.2. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

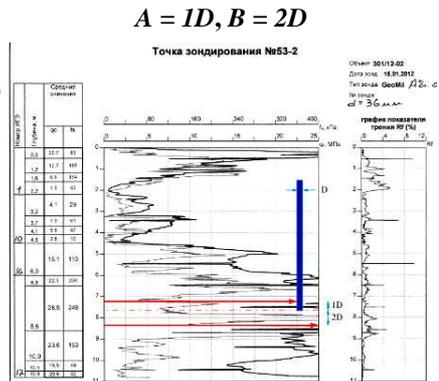


Рисунок 2.3. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

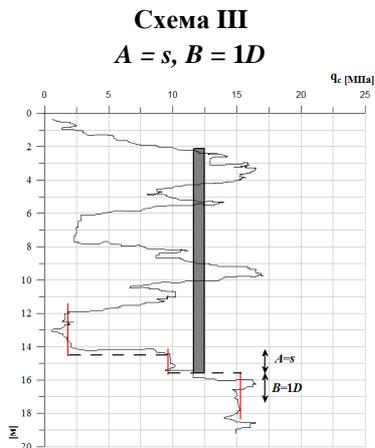


Рисунок 3. – Ниже конца сваи залегают грунты с большими значениями сопротивлений конуса, а выше – слои слабых грунтов (ил, торф и др.)

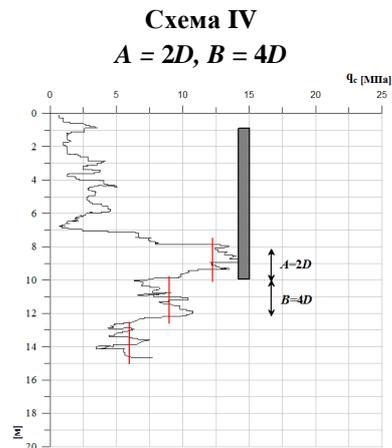


Рисунок 4. – Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоя с меньшими, а выше залегают слои с большими значениями сопротивлений конуса

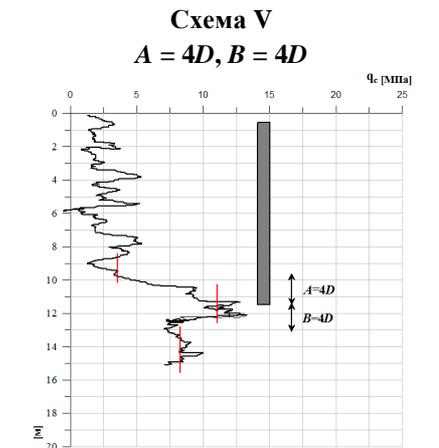


Рисунок 5. – Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоев с большими, а ниже залегают слои грунта с меньшими значениями сопротивлений конуса

В схеме V толщины i -х слоев грунта в пределах активной зоны выше и ниже конца свай принимают одинаковые значения, т.е. $A = B = 4D$.

Для определения сопротивления вдоль боковой поверхности ствола сваи используем следующую формулу[5]:

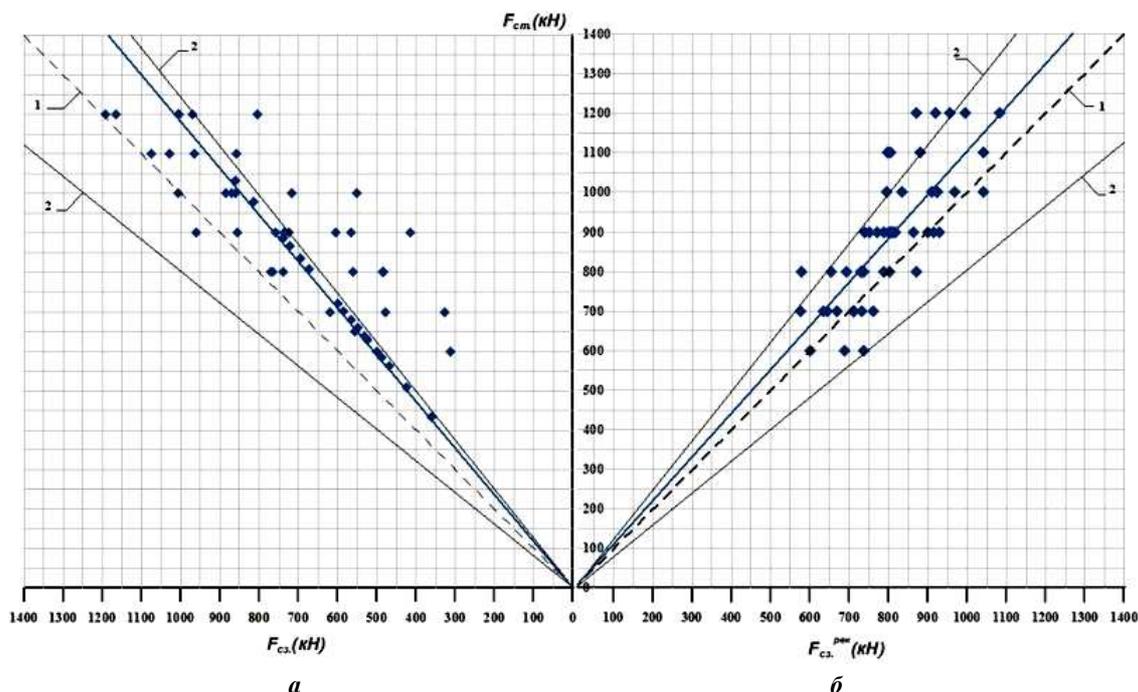
$$f_p = \frac{\bar{q}_c}{k_s}, \quad (4)$$

где k_s – эмпирический коэффициент, значение которого зависит от разновидности грунта вдоль сваи и технологии ее заглубления, согласно Бустаманте и Гианцелли (LCPC), определяется по таблице 2.

Таблица 2. – Значения коэффициента k_s

Грунт	q_c , МПа	k_s			
		I		II	
		A	B	A	B
Глина (clay)	< 1,0	30	90	90	30
	1,0...5,0	40	80	40	80
	> 5,0	60	120	60	120
Пылеватый грунт (silt)	≤ 5,0	60	150	60	120
	> 5,0	60	120	60	120
Песок (sand)	< 5	60	150	60	120
	5,0...12,0	100	200	100	200
	> 12	150	300	150	200

Анализ результатов статического зондирования на объектах. Для оценки достоверности предложенного метода расчета несущей способности набивных и забивных свай по данным статического зондирования также проведен статистический анализ данных и сравнение с применяемой в Республике Беларусь методикой оценки несущей способности свай на базе статического зондирования, результаты которых показаны на рисунке 6.



a – по ПН-2000 к СНБ; b – по предлагаемому уточненному методу;
1 – линии абсолютной сходимости; 2 – линии отклонений на $\pm 20\%$

Рисунок 6. – Сопоставление предельных сопротивлений свай, определенных путем статических испытаний ($F_{ст.исп.}$) и рассчитанных по результатам статического зондирования ($F_{сз.}$)

Таблица 3. – Статистический анализ результатов определения прогнозируемых значений несущих способностей буронабивных и забивных свай по предлагаемому уточненному методу и по методу, применяемому в Республике Беларусь

Наименование статистических показателей		Осредненное значение показателей при расчетах несущей способности свай по статическому зондированию и испытаниям статической нагрузкой набивных и забивных свай	
Методы определения несущих способностей свай		П 2-2000 к СНБ	по предлагаемому методу
Диаметр свай, м		от 0,3 до 0,9	
Количество определений		67	67
Среднее значение отношения $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$		0,78	0,92
Среднее квадратическое отклонение $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$		0,175	0,110
Средняя относительная погрешность при определении $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$, %		4,78	3,38
Коэффициент асимметрии (A_s)		-0,01	0,35
Количество значений отношений $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$ (в %), находящихся в пределах $\pm 20\%$ от значения $F_{сз.}/F_{ст.исп.} = 1$	в сторону завышения	–	2
	в сторону занижения	55	14

Из рисунка 6 и таблицы 3 [5] видно, что практически в большинстве случаев несущие способности свай, определенные с использованием предлагаемой методики, находятся в пределах $\pm 20\%$ от линии абсолютной сходимости.

На базе такой обработки при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,986$ для набивных и забивных свай с диаметрами от 0,3 до 0,9 м получаем следующую расчетную формулу:

$$F_{ст.} = 1,08F_{сз.}, \quad (5)$$

где $F_{ст.}$ – несущая способность свай по результатам их испытаний статической нагрузкой, кН; $F_{сз.}$ – прогнозируемая несущая способность свай по результатам статического зондирования, рассчитанная предлагаемым методом, кН.

Исходя из полученных результатов делаем вывод, что предлагаемый метод дает нам более точный прогноз несущей способности по сравнению с П2-2000 к СНБ [1].

Апробация результатов исследований при проектировании реальных объектов в грунтовых условиях Республики Беларусь подтвердила их эффективность, выраженную в снижении стоимости устройства свай не менее чем на 10...20% за счет уменьшения их длины или количества в плане фундамента, обоснованных более точной оценкой их несущей способности в песчаных грунтах.

Заключение. В результате проведенного исследования *усовершенствован метод расчета забивных и набивных свай* по первой группе предельных состояний посредством использования экспериментально обоснованных расчетных схем их оснований с уточненными активными зонами, учитывающими напряженно-деформируемое состояние, свойств и характеристик грунта, что позволяет по сравнению с известными методиками повысить точность расчетов оснований свай не менее чем на 10% [5].

Впервые для грунтовых условий Республики Беларусь на основе выполненного вероятностно-статистического анализа и систематизации результатов параллельных статических испытаний оснований различных типов забивных и набивных свай и их грунта способом статического зондирования, *получены новые экспериментально обоснованные данные об оптимальных размерах активной зоны в уровне нижнего конца свай.* Это дает возможность уточнить расчетные схемы оснований забивных и набивных свай для определения несущей способности по результатам статического зондирования с учетом их напряженно-деформируемого состояния и прочностных характеристик, различных по свойствам, гранулометрическому составу, характеру напластований, однородности песчаного грунта, и, как следствие, повысить качество проектирования фундаментов [5].

Рекомендуется для повышения достоверности прогнозируемых значений несущей способности свай по результатам статического зондирования при наличии песчаных грунтов в основании применять методику, предложенную автором, в проектной практике при прогнозировании несущей способности [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов : пособие П2-2000 к СНБ 5.01.01-99 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 23 с.
2. Моради Сани, Б. Предварительная оценка несущей способности песчаных оснований одиночных свай по международным стандартам / Б. Моради Сани // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 62–70.
3. Строительство многофункционального комплекса по проспекту Победителей в г. Минске : объект № 301/11-02 / ООО «Тектонит». – Минск, 2012–2013.
4. Штаб-квартира Национального олимпийского комитета : объект № 2733/07-02 / УП «Геосервис». – Минск, 2010.
5. Моради Сани, Б. Несущая способность песчаных оснований свай по результатам статического зондирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Б. Моради Сани ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – 21 с.
6. Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-45-2006 (02250) / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 33 с.

Поступила 06.06.2017

IMPROVED METHODOLOGY OF DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF PILE FOUNDATIONS IN SANDS USING CONE PENETRATION TESTS DATA

B. MORADI SANI

Presented a refined method for estimating the bearing capacity of pile foundations by using the results of static cone penetration tests in sands. This carried out by means of reliable correlations of correction factors, based on the active zone and taking into account the nature of the surrounding soil, which formed due to the features of the device technology of pile installation and pile sizes. The proposed method for determining the bearing capacity of pile foundations in sandy soils based on the results of static cone penetration tests makes it possible to take into account the technology of piling (cast in place and driving piles), the diameters of piles and the depth of immersion in the bearing layers.

Keywords: *Foundation piles, sandy soils, bearing capacity, adjusted methodology, correction factors.*