

УДК 624.131.35: 624.154.1

**Аннотация**

В данной статье представлен разработанный автором 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.

**IMPROVING THE METHOD FOR PREDICTION OF BEARING CAPACITY  
OF PILES IN SANDS FROM CPT DATA**
**Abstract**

This article presents the developed method of evaluation the bearing capacity of pile foundations based on the results of the static cone penetration test of sands with more reliable correlations according to using the correction factors based on the type of dominant sands which in they were driven or cast in and technology that used to it, the piles' embodiment lengths range and the cross-section range of piles.

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ОСНОВАНИЙ СВАЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Моради Сани Б.

**Введение**

Статическое зондирование является одним из наиболее достоверных методов определения несущей способности оснований свайных фундаментов. В данной статье представлен метод определения несущей способности забивных и набивных свай в песчаных грунтах на основании результатов статического зондирования (зонды II и III типов). Предлагаемый метод прогноза в песчаных грунтах несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования позволяет учитывать технологию устройства свай (набивных и забивных), диаметры их стволов и глубину погружения в несущие слои.

Он разработан автором на базе синтеза применяемых методов и собственных исследований, проверен по данным сопоставления существующих результатов с полученными при испытании 67 натурных свай статическими нагрузками на двух объектах. Сущность предлагаемого метода заключается в использовании известных формул с введением в них поправочных коэффициентов, а также схем выполнения зондирования грунтов.

**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, безразм.;

$\bar{q}_c$  – 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<sup>2</sup>;

$k_f$  – 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<sup>2</sup>.

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:

$$k_c = \alpha \cdot \left(\frac{\bar{q}_c}{P_A}\right)^{-0,455}, \quad k_f = \frac{A_0}{2 \cdot A_s}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – площадь боковой поверхности на единицу длины ствола сваи,  $A_0 = 1 \text{ м}^2$ ;

$A_s$  – площадь боковой поверхности ствола сваи,  $\text{м}^2$ ;

$P_A$  – сопротивление грунта,  $P_A = 1 \text{ МПа}$ ;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий технологию погружения сваи, глубину ее погружения в несущий слой грунта с его мощностями в уплотненной зоне выше и ниже пяты сваи, принимаем 1,9 для всех схем, кроме схемы II, для которой определяем его по табл. 1.

При назначении коэффициентов  $k_c$  и  $k_f$  используем следующие условия:

при  $\bar{q}_c > 25 \text{ МПа}$  принимаем  $\bar{q}_c = 25 \text{ МПа}$ ;

при  $\bar{f}_p > 0,125 \text{ МПа}$  принимаем  $k_f = \frac{A_0}{A_s}$ .

### Среднее значение сопротивления грунта в пределах активной зоны у пяты сваи

Среднее сопротивление грунта под конусом зонда в пределах уплотненной (активной) зоны у конца сваи определяется по следующей формуле:

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

где  $A$  – толщина  $i$ -го слоя грунта выше конца сваи в пределах активной зоны, м;

$B$  – толщина  $i$ -го слоя грунта ниже конца сваи в пределах активной зоны, м;

$q_c$  – среднее значение удельного сопротивления  $i$ -го слоя грунта под наконечником зонда, МПа;

$h$  – длина сваи, 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.

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

**Схема II** (рис. 2) – неоднородные грунты, которые в конце сваи имеют несущий слой песчаного грунта, причем под нижним концом ствола располагаются слои с большими значениями сопротивлений, а выше – с меньшими значениями. В данной схеме  $A$  принимает значение  $1,1$ , а  $B = 1,2$ . Расчет по схеме II осуществляется по трем вариантам, при этом значения  $1,1$  и  $1,2$  зависят от высоты погружения конца сваи в несущий слой и от варианта схемы.

Схема I  
 $A = 4D, B = 1D$

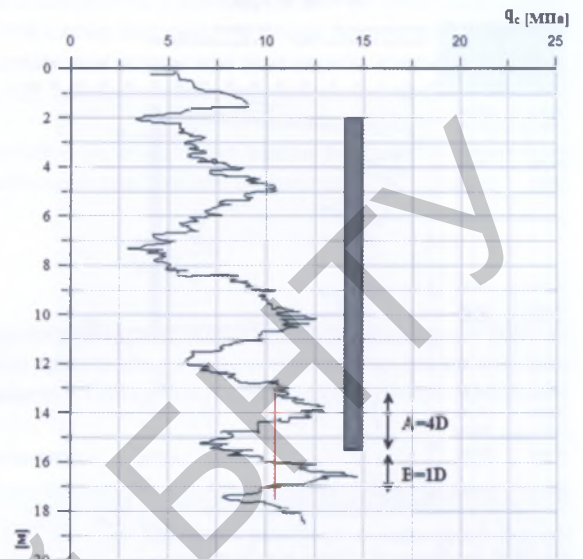


Рис. 1. Однородный грунт

Схема II  
 $A = 1,1D, B = 1,2D$

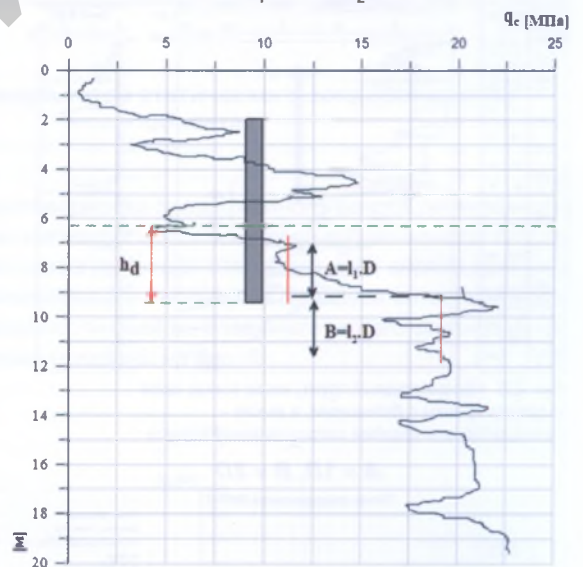


Рис. 2. Неоднородный грунт, ниже конца сваи располагаются слои грунта с большими значениями сопротивлений, выше – с меньшими их значениями:  $D$  – диаметр сваи;  $h_d$  – заглубленная часть сваи погружена в несущий слой

Далее приведем описание трех возможных вариантов схемы II:

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

**Варианты для схемы II**  
**A = B = 1,5D**

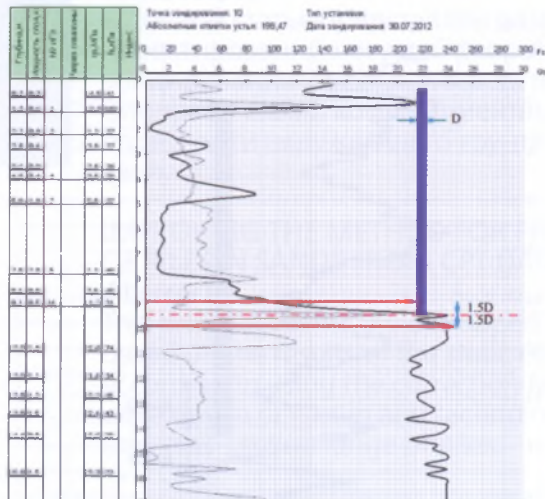


Рис. 2.1. Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают слои грунтов с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

**A = 2D, B = 4D**  
Точка зондирования №2

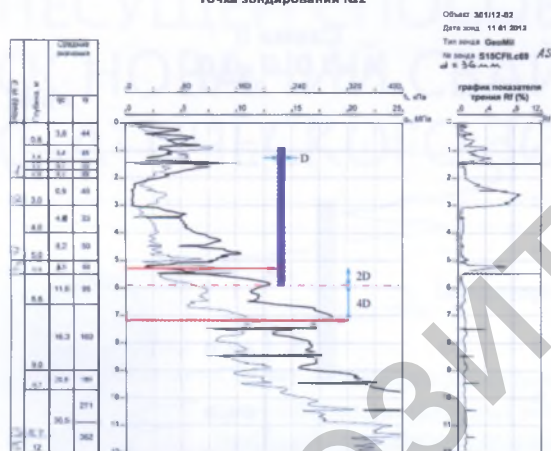


Рис. 2.2. Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

**A = 1D, B = 2D**  
Точка зондирования №63-2

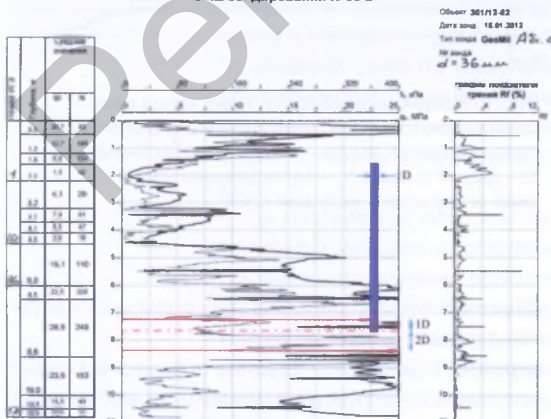


Рис. 2.3. Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

■ **вариант 2** (рис. 2.2) – глубина погружения сваи 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 сваи составляет  $A = 2D$ , а ниже его –  $B = 4D$ . Однако в отличие от варианта 1 схемы II в данном случае принимается измененное значение коэффициента  $\alpha$ , который учитывает технологию погружения и диаметр свай (табл. 2);

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

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

Таблица 1

**Значение  $l_1, l_2, \alpha$  для разных глубин погружения в несущий слой грунта ( $h_d$ ) при разных видах свай и диаметрах их стволов**

Глубина погружения конца сваи в несущий слой грунта	Вариант схемы II	$l_1$	$l_2$	$\alpha$		
				набивные сваи		забивные сваи
				$D = 0,36 \text{ м}$	$D = 0,9 \text{ м}$	$D = 0,3 \text{ м}$
$h_d < 8D$	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

**Схема III** (рис. 3) представляет собой особый случай схемы II, когда ниже конца сваи 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 сваи толщины  $i$ -х слоев грунта принимают значения: в конце сваи толщины несущего слоя  $A = S$  ( $S$  – толщина несущего грунта в конце сваи), а ниже ее конца в пределах активной зоны  $B = 1D$ . При этом пределы зоны ( $A$ ) не охватывают несущий грунт.

**Схема III**  
**A = s, B = 1D**

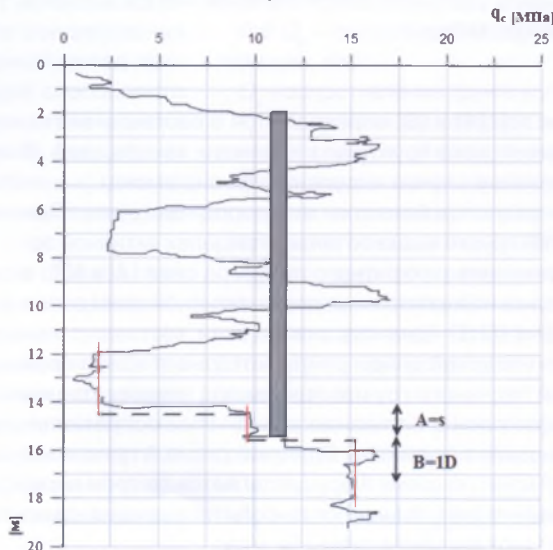


Рис. 3. Ниже конца сваи залегают грунты с большими значениями сопротивлений конуса, а выше – слои слабых грунтов (ил, торф и др.)

**Схема IV** (рис. 4) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца сваи 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 сваи  $A = 2D$ , а ниже его –  $B = 4D$ .

**Схема V** (рис. 5) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца сваи залегают грунты с

большими значениями сопротивления конуса, в то же время выше и ниже имеются слои грунта с меньшими значениями сопротивлений конуса. В этой схеме толщины *i*-х слоев грунта в пределах активной зоны выше и ниже конца сваи принимают одинаковые значения, т.е.  $A = B = 4D$ .

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

$$f_p = \frac{\bar{q}_c}{k_s}, \tag{4}$$

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

Значения коэффициента  $k_s$

Таблица 2

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

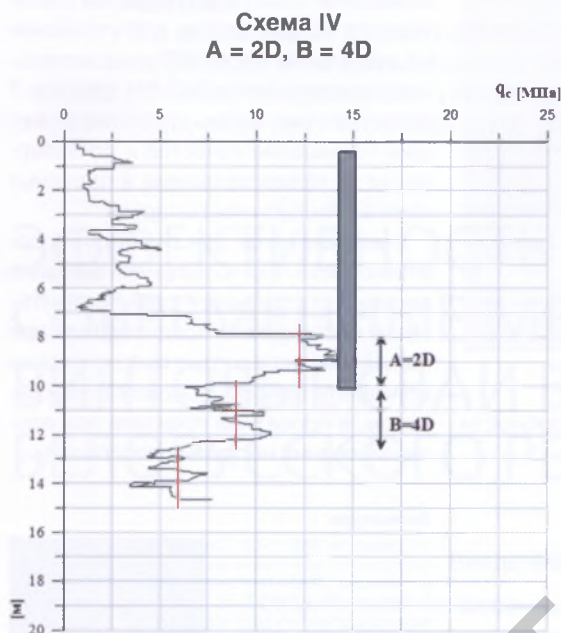


Рис. 4. Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоя с меньшими, а выше – с большими значениями сопротивлений конуса

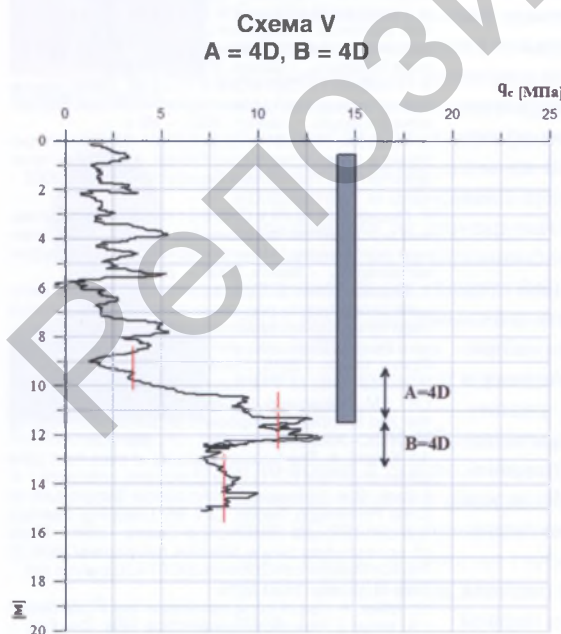


Рис. 5. Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоев с большими, а ниже – с меньшими значениями сопротивлений конуса

### 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 рис. 6.

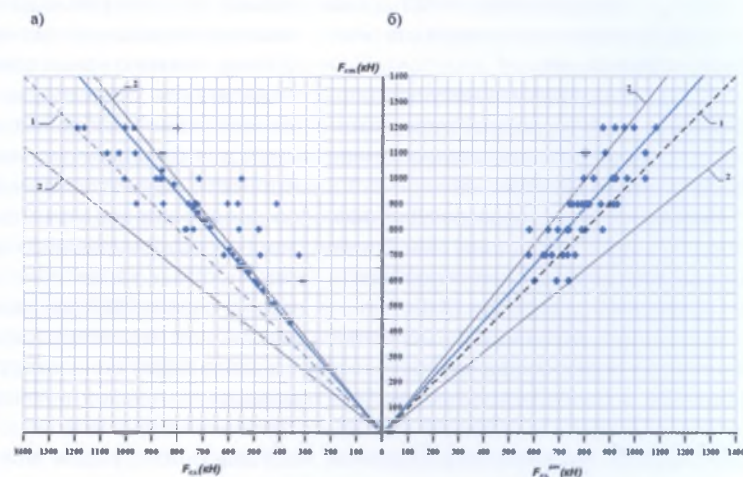


Рис. 6. Сопоставление предельных сопротивлений свай, определенных путем статических испытаний ( $F_{c,ст}$ ) и рассчитанных по результатам статического зондирования ( $F_c$ ): а) по П2-2000 к СНБ; б) по предлагаемому уточненному методу; 1 – линии абсолютной сходимости; 2 – линии отклонений на  $\pm 20\%$

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

Таблица 3

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 ( $A_0$ )	-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	14

Согласно рис. 6 и табл. 3, 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:

$$F_{ст.} = 1,08 F_{сз.} \quad (5)$$

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, предлагаемый метод дает нам более точный прогноз несущей способности по сравнению с П2-2000 к СНБ.

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 точ-

ной оценкой их несущей способности в песчаных грунтах.

### Выводы

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.

Усовершенствован метод расчета забивных и набивных свай по первой группе предельных состояний посредством использования обоснованных экспериментально 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%.

Разработаны на основе выполненных экспериментально-теоретических исследований рекомендации расчета оснований свай по результатам статического зондирования для уточнения национальных норм ТКП и национального приложения к ТКП EN Еврокод 7 (европейские нормы), обеспечивающие повышение качества и достоверности их проектирования в песчаных грунтах Республики Беларусь.

Рекомендуется для повышения достоверности прогнозируемых значений несущей способности свай по результатам статического зондирования при наличии песчаных грунтов в основании применять способ, предложенный автором, в проектной практике при прогнозировании несущей способности.

### Литература

1. Объект № 301/11-02. Строительство многофункционального комплекса по проспекту Победителей в г. Минске, ООО «Тектонит», Минск, 2012–2013 гг.
2. Объект № 2733/07-02. Штаб-квартира Национального олимпийского комитета. УП «Геосервис», Минск, 2010 г.
3. ТКП 45-5.01-45-2006 (02250). Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования и устройства / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2006. – 33 с.
4. Пособие П2-2000 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2001. – 23 с.
5. Пособие П 4-2000 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование забивных свай / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2001. – 68 с.
6. Пособие П 13-01 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство буронабивных свай / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2002. – 43 с.
7. Пособие П 19-04 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство фундаментов из свай с уплотненным основанием / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск, 2006. – 88 с.
8. Мореди Сани, Б. Предварительная оценка несущей способности песчаных оснований одиночных свай по международным стандартам / Б. Мореди Сани // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикл. науки. – 2015. – № 8. – С. 62–70.
9. Bustamane, M. Pile means of static penetrometer CPT / M. Bustamane, L. Gianeselli // Proceedings of the 2nd European Symposium on penetration testing/ ESOPTII. – Amsterdam, 1982. – P. 493–500.
10. Eslami, A. The bearing capacity of piles from cone penetration test (CPT) data [Electronic resource] / A. Eslami, B.H. Fellenius // International Symposium on Cone Penetration Test, CPT '95, Linköping, Sweden, 4–5 Oct. 1995 year / University of Ottawa – 1995. – Mode of access: <http://www.fellenius.net/papers/180%20Toe%20Resistance%20from%20CPT%20analysis.pdf>. – Date of access: 15.01.2016.
11. Miller, A. Use of cone penetration test in pile design / A. Miller // Periodica Polytechnica SEB. Civ. Eng. – 2004. – Vol. 47, № 2. – P. 180–197.
12. Eurocode 7: Geotechnical Design – part 3: Design Assisted by Field Testing, 1997–2; 2007 (E). P. 118–119.

Статья поступила 01.02.2016 г.