

*И.Я. Лучковский, д.т.н., профессор,  
А.В. Самородов, к.т.н., доцент,  
С.В. Есакова, С.В. Табачников, аспиранты  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

## **МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ СВАИ ПРИ ЗАДАННОЙ ВЫДЁРГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ**

*В работе рассмотрен метод оценки несущей способности по грунту и назначения оптимальной глубины заложения свай, работающих на выдёргивающие нагрузки.*

**Ключевые слова:** свая, выдёргивающая нагрузка, боковая поверхность, сопротивление, глубина заложения, несущая способность.

*І.Я. Лучковський, д.т.н., професор,  
А.В. Самородов, к.т.н., доцент,  
С.В. Єсакова, С.В. Табачников, аспіранти  
Харківський національний університет будівництва та архітектури*

## **МЕТОДИКА АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ГЛУБИНИ ЗАКЛАДЕННЯ ПАЛІ ПРИ ЗАДАНОМУ ВИСМИКУВАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

*У роботі розглянуто метод оцінки несучої здатності по ґрунту та призначення оптимальної глибини закладення палі, що працюють на висмикувальні навантаження.*

**Ключові слова:** паля, висмикувальне навантаження, бічна поверхня, опір, глибина закладення, несуча здатність.

*I.Y. Luchkovskiy, Dr. of Technical Sciences, Professor,  
A.V. Samorodov, Ph.D., associate prof.,  
S.V. Esakova, S.V. Tabachnikov, graduates  
Kharkiv National University of Construction and Architecture*

## **ANALYTICAL METHOD OF DETERMINING THE DEPTH OF PILE FOUNDATIONS FOR A GIVEN PULLING LOADS**

*This paper presents a method for evaluation of the bearing capacity of the ground and use the optimum depth of the piles, working on pulling loads.*

**Keywords:** pile, pulling loads, the lateral surface, resistance, depth of the piles, bearing capacity.

**Введение.** Как известно, несущая способность  $F_{du}$  сваях буровых свай на действие вертикальной выдёргивающей нагрузки определяется суммированием сил сопротивления грунта по боковой поверхности. При этом расчетное сопротивление грунта  $f_z$  на любой глубине  $z$  боковой поверхности определяют по таблице [1]. Использование нормативной методики связано не только с применением интерполяции, но и с необходимостью разделения грунта на однородные слои толщиной не более 2 м.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** Изложенная в этой статье методика разработана на основании норм [1] и работ профессора И.Я. Лучковского [2, 3], где автор рассматривает работу свай на вдавливающую нагрузку. Несколько методов определения несущей способности и анализ работы анкеров, свай-анкеров, работающих на выдёргивающую нагрузку приведены в работах [4 – 6].

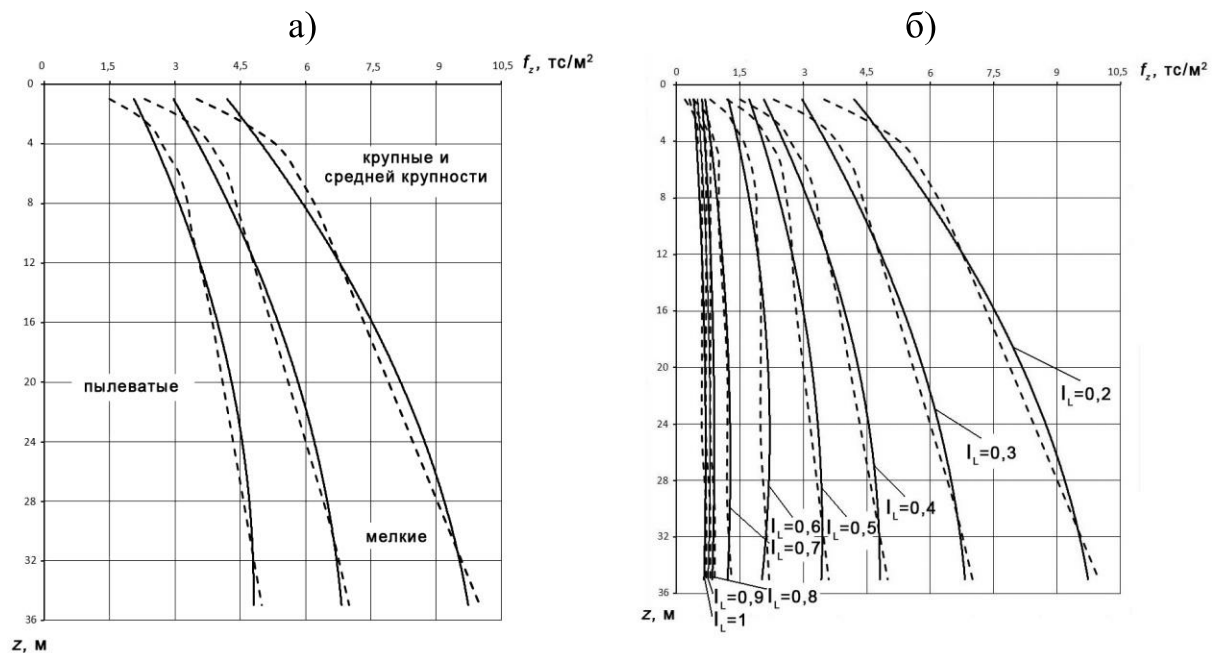
**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** В настоящих нормах решается лишь обратная задача установления несущей способности свай по заданным их размерам – длине и сечению, поэтому представляет интерес возможность определения необходимой глубины заложения сваи при известном расчётном значении выдёргивающей нагрузки.

**Постановка задачи.** Основной задачей данной статьи является разработка методики определения несущей способности сваи.

**Основной материал и результаты.** Проведенный численный анализ данных таблицы Н.2.2 ДБН [1] позволил представить сопротивление грунта по боковой поверхности в виде функции  $f_z(\text{тс/м}^2)$ , зависящей от глубины слоёв грунта  $z(\text{м})$ :

$$f_z = a \cdot z^2 + b \cdot z + c, \quad (1)$$

где  $a, b, c$ , – параметры грунтового основания, зависящие от вида грунта; Функции  $f_z(\text{тс/м}^2)$  графически представлены на рис. 1.



\* - пунктирной линией обозначена зависимость по ДБН; сплошной линией – зависимость по данной методике

*Рис. 1. Графики зависимостей: а – расчетного сопротивления по боковой поверхности свай  $f_z$  от глубины расположения слоя грунта  $z$  для песчаных грунтов; б –  $f_z$  от  $z$  для пылевато-глинистых грунтов*

Установленные параметры  $a, b, c$  для песчаных грунтов даны в табл. 1, а для пылевато-глинистых – в табл. 2.

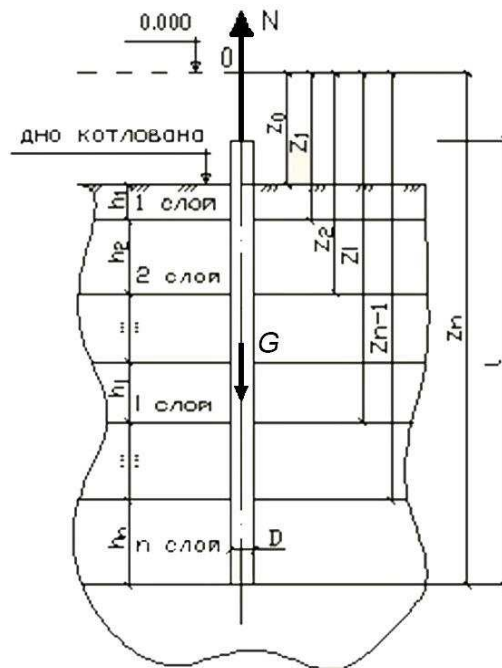
**Таблица 1. Параметры  $a, b, c$ , для песчаных грунтов**

Параметры	Песчаные грунты средней плотности			
	крупные	средней крупности	мелкие	пылеватые
a	-0.00311	-0.00311	-0.00247	-0.00247
b	0.27482	0.27482	0.20233	0.16956
c	3.93342	3.93342	2.76752	1.89664

**Таблица 2. Параметры  $a, b, c$ , для пылевато-глинистых грунтов**

Пар-ры	Пылевато-глинистые грунты при показателе текучести $I_L$ , равном								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
a	-0.0031	-0.0025	-0.0025	-0.0018	-0.0017	-0.0009	-0.0005	-0.0005	-0.00045
b	0.2748	0.2023	0.1696	0.1165	0.0861	0.0484	0.0251	0.0251	0.0233
c	3.9334	2.7675	1.8966	1.6065	1.1379	0.6281	0.5762	0.4762	0.3853

Используя зависимость (1), определим несущую способность свай заданных размеров в многослойном основании, схематически представленному на рис. 2.



*Рис. 2. Свая в многослойном основании.*

В соответствии с нормами (формулы 8.5.2.2 и Н.3.3), запишем

$$N \leq \frac{F_{du}}{\gamma_k} + G, \quad (2)$$

где  $N$  – расчётная нагрузка, которая допускается на сваю при определении их количества в свайном фундаменте, кН;  $F_{du}$  – несущая способность сваи по грунту при действии выдёргивающей нагрузки, кН;  $\gamma_k$  – коэффициент надёжности, принимаемый в зависимости от количества

свай в фундаменте ( $\gamma_k = 1,4$  – при 21свае и больше;  $\gamma_k = 1,55$  – от 11 до 20 свай;  $\gamma_k = 1,65$  – от 6 до 10 свай;  $\gamma_k = 1,75$  – от 1 до 5 свай);  $G$  – собственный вес свай, кН.

Следует отметить, что нормами не учитывается собственный вес конструкции свай.

Далее получим

$$\frac{F_{du}}{u \cdot \gamma_c} = \sum \gamma_{cf,j} \cdot f_i \cdot h_i, \quad (3)$$

где  $F_{du}$  – то же что и в формуле (2);  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы: для свай, которые заглубляются в грунт на глубину меньше чем 4м,  $\gamma_c = 0,6$ ; на глубину 4 м и больше  $\gamma_c = 0,8$  – для всех сооружений, кроме опор воздушных линий электропередачи, для которых коэффициент  $\gamma_c$  принимается в соответствии с Н.4. ДБН;  $u$  – внешний периметр поперечного сечения свай, м;  $\gamma_{cf}$  – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности свай, принимаемый для забивных свай и свай оболочек заглубляемых без выемки грунта по таблице Н.2.3 ДБН, по таблице Н.3.1 ДБН – для буровых свай и свай оболочек, заполняемых бетоном;  $f_i$  – расчётное сопротивление  $i$ -го слоя грунта основания на боковой поверхности, тс/м<sup>2</sup>;  $h_i$  – высота  $i$ -того однородного слоя грунта.

Использование зависимости (1) позволяет заменить суммирование по формуле (3) интегрированием в пределах каждого однородного слоя. При этом получим

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} f dz = \int_{z_{i-1}}^{z_i} (a_i \cdot z^2 + b_i \cdot z + c) dz = \frac{1}{3} (z_i^3 - z_{i-1}^3) \cdot a_i + \frac{1}{2} (z_i^2 - z_{i-1}^2) \cdot b_i + c_i \cdot h_i$$

Подставив это выражение в (3), найдем

$$\frac{F_{du}}{u \cdot \gamma_c} = \sum \gamma_{cf,j} c_i h_i + \frac{1}{3} \sum (z_i^3 - z_{i-1}^3) a_i \gamma_{cf,j} + \frac{1}{2} \sum (z_i^2 - z_{i-1}^2) b_i \gamma_{cf,j} \quad (4)$$

Далее установим

$$\begin{aligned} \sum (z_i^3 - z_{i-1}^3) a_i \cdot \gamma_{cf,j} &= (z_1^3 - z_0^3) a_1 \cdot \gamma_{cf,1} + (z_2^3 - z_1^3) a_2 \cdot \gamma_{cf,2} + \dots + (z_n^3 - z_{n-1}^3) \gamma_{cf,n} \cdot a_n = \\ &= z_1^3 \cdot (a_1 \cdot \gamma_{cf,1} - a_2 \cdot \gamma_{cf,2}) - z_0^3 \cdot a_1 \cdot \gamma_{cf,1} + z_2^3 \cdot (a_2 \cdot \gamma_{cf,2} - a_3 \cdot \gamma_{cf,3}) + \\ &+ \dots + z_{n-1}^3 \cdot (a_{n-1} \cdot \gamma_{cf,n-1} - a_n \cdot \gamma_{cf,n}) + z_n^3 \cdot \gamma_{cf,n} \cdot a_n = \\ &= z_n^3 \cdot \gamma_{cf,n} \cdot a_n - z_0^3 \cdot a_1 \cdot \gamma_{cf,1} + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^3 \cdot (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1}), \end{aligned}$$

$$\sum (z_i^2 - z_{i-1}^2) \cdot b_i \cdot \gamma_{cf,j} = z_n^2 \cdot b_n \cdot \gamma_{cf,n} - z_0^2 \cdot b_0 \cdot \gamma_{cf,0} + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^2 \cdot (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1})$$

Теперь получим выражение для несущей способности буровых свай в многослойном основании

$$\frac{F_d}{u \cdot \gamma_c} = \sum c_i \cdot \gamma_{cf,i} \cdot h_i + \frac{1}{3} \left[ a_n \cdot \gamma_{cf,n} \cdot z_n^3 - a_1 \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^3 + \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1}) \cdot z_i^3 \right] + \frac{1}{2} \left[ b_n \cdot \gamma_{cf,n} \cdot z_n^2 - b_1 \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1}) \cdot z_i^2 \right] \quad (5)$$

Для свай в однородном грунте схематически представленному на рис. 3, решение упрощается

$$\frac{F_d}{u \cdot \gamma_c} = \gamma_{cf,1} \left( c_1 h_1 + \frac{1}{3} a_1 \cdot (z_1^3 - z_0^3) + \frac{1}{2} b_1 \cdot (z_1^2 - z_0^2) \right) \quad (6)$$

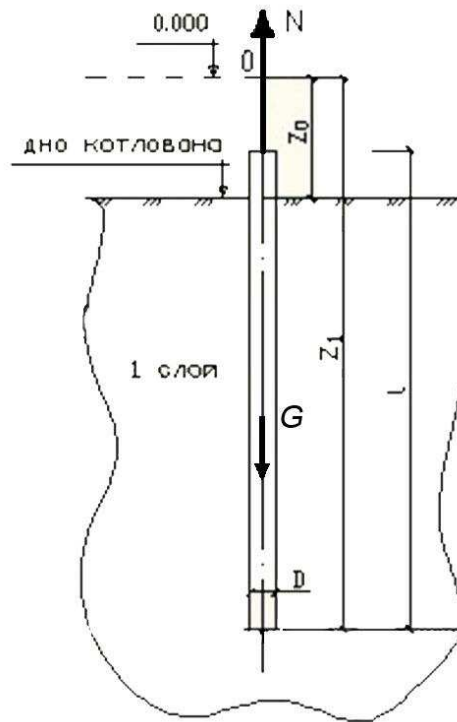


Рис. 3. Свая в однослойном основании.

Разработанный метод расчета дает возможность решить прямую задачу определения требуемой длины свай при заданных  $N$  ( $F_d$ ),  $u$  и  $z_0$ .

а) Свая в однородном грунте.

Из (7) получим

$$\frac{F_{du}}{u \cdot \gamma_c} = c \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_1 - c \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0 + \frac{1}{3} a \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_1^3 - \frac{1}{3} a \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^3 + \frac{1}{2} b \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_1^2 - \frac{1}{2} b \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^2$$

Обозначив

$$T = \frac{3}{a \cdot \gamma_{cf,1}} \left[ \frac{F_{du}}{u \cdot \gamma_c} - G + c \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0 + \frac{1}{3} a \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^3 + \frac{1}{2} b \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^2 \right]; \quad (7)$$

приходим к исходному кубическому уравнению относительно величины  $z_1$

$$z_1^3 + \frac{3b}{2a} \cdot z_1^2 + \frac{3c}{a} \cdot z_1 - T = 0. \quad (8)$$

б) Свая в многослойном основании.

При заданных  $N$  ( $F_{du}$ ), или  $z_{n-1}$  можно найти требуемую глубину погружения свай в нижний слой -  $h_n$ , а следовательно и полную глубину  $z_n$ .

Из исходящего уравнения (6) получим кубическое уравнение относительно  $z_n$

$$z_n^3 + \frac{3b_n}{2a_n} \cdot z_n^2 + \frac{3c_n}{a_n} \cdot z_n - F = 0, \quad (9)$$

где

$$F = \frac{3}{a_n \cdot \gamma_{cf,n}} \left[ \frac{F_{du}}{u \cdot \gamma_c} - c_n \cdot \gamma_{cf,n} \cdot z_{n-1} - \sum_{i=1}^{n-1} c_i \cdot \gamma_{cf,i} \cdot h_i + \frac{1}{3} a_1 \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^3 - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1}) z_i^3 + \frac{1}{2} b_1 \cdot \gamma_{cf,1} \cdot z_0^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \cdot \gamma_{cf,i} - a_{i+1} \cdot \gamma_{cf,i+1}) z_i^2 \right] \quad (10)$$

### Выводы.

– проанализирована нормативная методика определения несущей способности свай;

– на основании табличных данных ДБН сопротивление грунта по боковой поверхности представлено в виде функции  $f_z$ , зависящей от глубины слоёв грунта  $z$ ;

– анализ полученных результатов показывает, что предложенный метод позволяет достаточно просто вычислить необходимую глубину заложения свай, задавшись только величиной действующей выдёргивающей нагрузки и периметром свай;

– полученные зависимости для буровых и забивных свай позволяют не разбивать многослойное основание на элементарные слои, что дает возможность упростить и ускорить расчет, кроме того, точно определяя требуемую длину свай, получить экономию расхода бетона.

### Литература

1. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна №1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.

2. Лучковский, И.Я. Методика аналитического определения несущей способности и требуемой длины висячих забивных свай / И.Я. Лучковский // Коммунальное устройство городов. – Вып. 39. - 2002, - С. 247 – 252.

3. Лучковский, И.Я. Методика аналитического определения несущей способности и глубины заложения свай в зависимости от вертикальной нагрузки / И.Я. Лучковский, С.В. Есакова // Основи і фундаменти: міжвідомчий наук.-техн. збірник. – Вып. 33. – К.: КНУБА, 2013.

4. Троценко, Д.О. Рекомендації з визначення несучої здатності ґрунтових анкерів, виготовлених за допомогою електрохімічного закріплення / Д.О. Троценко, Ю.Л. Винников, В.С. Яковлев // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) – К.: ДП НДІБК, 2011. – Вып. 75. – С. 31 – 37.

5. Самородов, А.В. Полевые исследования несущей способности буронагнеточных свай при действии выдёргивающих и вдавливающих нагрузок / А.В. Самородов,

*С.В. Табачников // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 4(34). – С. 239 – 245.*

*б. Табачников, С.В. Анализ определения несущей способности свай-анкером по существующим методикам / С.В. Табачников // Основы і фундаменти: межвідомчий наук.-техн. збірник. – Вип. 33. – К.: КНУБА, 2013.*

*Надійшла до редакції 08.10.2013*

*© І.Я. Лучковський, А.В. Самородов, С.В. Єсакова, С.В. Табачников*