

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ ОПОРУ ПО БІЧНІЙ ПОВЕРХНІ ПАЛЬ

К-т техн. наук О.В. Самородов, асист. С.В. Табачников

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВАЙ

К-т техн. наук А.В. Самородов, ассист. С.В. Табачников

THE METHOD FOR DETERMINING RESISTANCE FORCES ON THE LATERAL SURFACE OF PILES

PhD A.V. Science Samorodov, assist. S.V. Tabachnykov

*На підставі проведених лабораторних і теоретичних досліджень сил опору піщаного ґрунту по бічній поверхні модельної палі пропонується новий метод визначення несучої здатності бурових палей в залежності від дії висмикувальних або вдавлюючих навантажень, адекватність якого підтверджується натурними випробуваннями. Метод ґрунтується на диференційованому підході до визначення несучої здатності по бічній поверхні палей, технологія виробництва яких дозволяє розглядати зрушення уздовж стовбура палей за схемою "ґрунт по ґрунту»*

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

*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. Метод основывается на дифференцированном подходе к определению несущей способности по боковой поверхности свай, технология производства которых позволяет рассматривать сдвиг вдоль ствола сваи по схеме «грунт по грунту»*

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

*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 proposed method is based on a differentiated approach to the determination of the bearing capacity on the lateral surface of the pile, production technology which allows us to consider a shift along the pile shaft on a "ground to ground". First proposed to allocate the drag force on the lateral surface of the pile only due to the formation of the state of stress of its own weight of soil in the vicinity of the pile shaft without the influence of vertical loads. A theoretical solution to account for the additional compression forces the lateral surface of the pile under the action of pulling loads. Application of the proposed method allows for a design stage to more accurately determine the bearing capacity of piles. This in turn will help to avoid overspending volumes of concrete and reinforcement in the construction of pile foundation. The adequacy of the method is confirmed by field tests.*

***Keywords:** pile, model, the lateral surface, resistance force, resting state, vertical load*

**Введение.** В действующих нормативных документах [1, 2], основанных на известном СНиПе по свайным фундаментам, отсутствует учет направленности вертикальной нагрузки (вдавливающая или выдергивающая) при определении несущей способности по боковой поверхности свай. При этом, если

принять во внимание коэффициенты условий работы свай в грунте  $\gamma_c$ , то соотношение несущих способностей за счет сил сопротивления по боковой поверхности  $f$  при вдавливании и выдергивании будут равны  $F_{d,f}/F_{du}=1,25$ .

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** С помощью запатентованного нами способа [3] проведен лотковый эксперимент [5] для выявления характера распределения по длине  $L$  многосекционной модельной свай сил сопротивления песчаного грунта по боковой поверхности в состоянии покоя  $T_0$  [4], 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 проведенных исследований 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.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Впервые в работе В.Г. Березанцева и Го Нин [6] 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 [7] 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 (вдавливание и выдергивание) 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 [6] и современным исследованиям [8], 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 [9] 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 сваю.

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

**Основная часть исследования.** 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 ( $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $\varphi$  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;

$f_{0,i} = (\sigma_{zg,i} + q) \cdot k_{zg,i} \cdot \lambda_{0,i} \cdot \text{tg} \varphi_i + k_c \cdot c_i$ ,  
 $k_{zg,i}$  – коэффициент затухания напряжений от собственного веса грунта  $\sigma_{zg,i}$  (рис. 1) околосвайного 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.;  $\lambda_{0,i} = \frac{\nu_i}{1 - \nu_i}$

– коэффициент бокового давления грунта в середине  $i$ -го слоя;

$\nu_i$  – 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 [10].

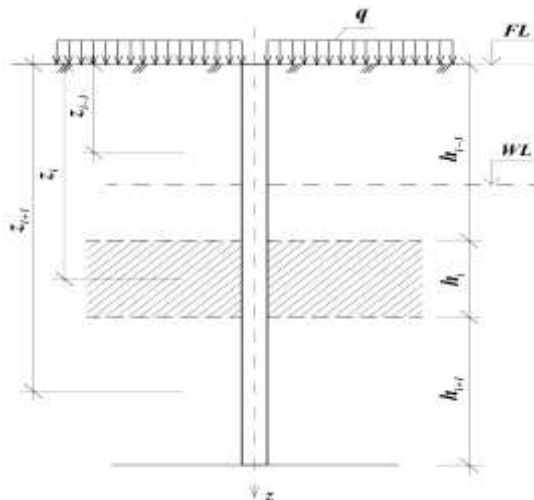


Рис.1. Расчетная схема к определению суммарной силы сопротивления  $T_0$  в состоянии покоя

Следует отметить, что коэффициент  $k_{zg,i}$  получен нами на основании лабораторных исследований [4, 5], который учитывает напряженное состояние околосвайного массива грунта в состоянии покоя. Так как в лабораторных условиях нами исследовался характер затухания напряжений до относительной глубины  $z/d \leq 1,7$ , то для больших значений  $z/d$  зависимость принята согласно решения В.Г. Березанцева [10] для осесимметричной задачи взаимодействия круглого в плане

вертикального сооружения с сыпучей средой в состоянии предельного равновесия.

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

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

$\gamma$  – среднее значение удельного веса грунтов в пределах глубины  $z$ .

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

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

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

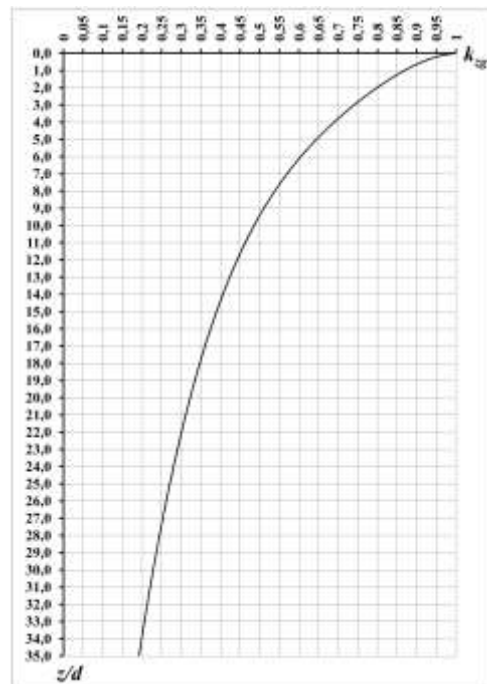


Рис.2. Зависимость коэффициента затухания напряжений  $k_{zg}$  от относительной глубины  $z/d$

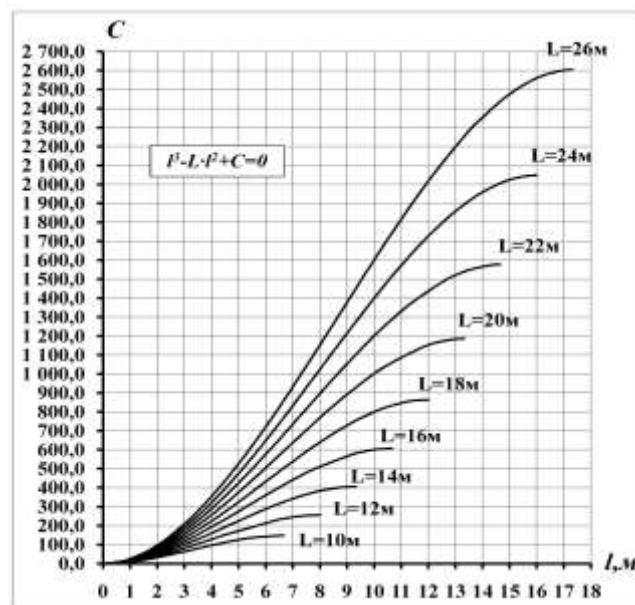


Рис.4. Графики зависимости расчетной длины  $l$  от величины  $C$

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  $L=24\text{м}$  соответствующее значение величины  $C$  будет больше максимального

значения 2050, то расчетную длину  $l$  следует принимать равной 16м. 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:

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

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 соответствующем обосновании его значения могут быть повышены в зависимости от  $L/d$  (см. рис. 5).

**Выводы с исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.**

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

свай 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. Существующие нормативные методики, как правило, дают расхождение в сторону занижения более 40% несущей способности свай при вдавливающих нагрузках, что, «по умолчанию» в практике фундаментостроения компенсируется нормативным условием назначения максимальной вертикальной нагрузки при испытании натуральных свай:  $F_u = 1,5F_d$  [12] для получения реальных величин.

5. На основании нового метода усовершенствована методика по определению несущей способности свай, результаты которой дают расхождение с натурными данными испытаний не более 10%, причем испытания натуральных буровых свай длиной  $L = 12 \div 20$ м проводились также в сложных инженерно-геологических условиях с обводненными песчаными и глинистыми грунтами как на выдергивающие, так и на вдавливающие нагрузки [11].

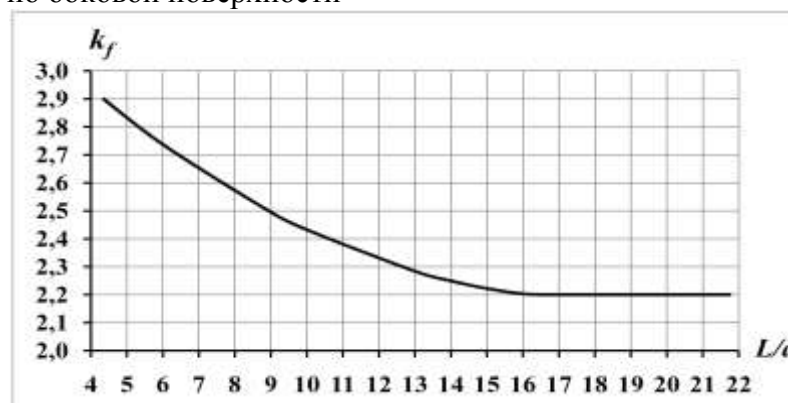


Рис.5. График зависимости коэффициента  $k_f$  от  $L/d$  при действии вдавливающей нагрузки

1. ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. - Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
2. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. – М: ГОССТРОЙ РОССИИ, 2004. – 87 с.
3. 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, патентоволодар Харківський національний університет будівництва та архітектури. – заявл. 20.05.2010; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23. – 4 с.
4. 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. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Вип. 5(79). (подана в редакцію)
5. Табачников С.В. Экспериментальные исследования сил сопротивления по боковой поверхности моделей свай / С.В. Табачников // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. 1(43). – С. 222 – 230.
6. 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.
7. Морозов В.Н. Теоретическое определение изменения величины бокового давления грунта на сваю при вертикальных нагрузках / В.Н. Морозов // Научные труды ЛИСИ. Основания и фундаменты. – Л.: ЛИСИ. – 1962. – № 37. – С. 139–146.
8. 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) – К.: ДП НДІБК, 2008. – Вип. 71. – С. 416 – 420.
9. Морозов В.Н. Экспериментальное определение величины бокового давления грунта на сваю / В.Н. Морозов // Научные труды ЛИСИ. Основания и фундаменты. – Л.: ЛИСИ. – 1962. – № 37. – С. 147–153.
10. 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).
11. Самородов А.В. Полевые исследования несущей способности буроинъекционных свай при действии выдергивающих и вдавливающих нагрузок / Самородов А.В., Табачников С.В. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 4(34). – С. 239 – 245.
12. ДСТУ Б В.2.1-1-95 (ГОСТ 5686-94). Грунти. Методи польових випробувань палями. Київ: Укрархбудінформ, 1997. – 58 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор Лучковський І.Я.

---

Самородов О.В., канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки та підземних споруд Харківський національний університет будівництва та архітектури.

Табачников С.В., асистент кафедри механіки ґрунтів, фундаментів та інженерної геології Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Samorodov A.V., PhD, Ass. Prof., [Kharkiv national university of civil engineering and architecture](#)  
Tabachnikov S.V., assist., О.М. Beketov National University of Urban Economy in Khark