

Ю.Ф. Тугаенко, д.т.н., профессор  
А.П. Ткалич, к.т.н., доцент  
Л.А. Логинова, ассистент

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

## ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ В ЛЕССОВИДНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

*Приведен принцип расчета несущей способности забивных свай в лессовых водонасыщенных грунтах. Значения сопротивления по боковой поверхности для каждого ИГЭ и под подошвой сваи определены по результатам проведенных полевых исследований.*

**Ключевые слова:** трение по боковой поверхности, сопротивление грунта под острием, уплотненное ядро.

Ю.Ф. Тугаенко, д.т.н., профессор  
А.П. Ткалич, к.т.н., доцент  
Л.А. Логинова, ассистент

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

## ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПАЛІ В ЛЕСОПОДІБНИХ ВОДОНАСИЧЕНИХ ГРУНТАХ

*Наведено принцип розрахунку несучої здатності забивних палей у лессових водонасичених грунтах. Значення опору по бічній поверхні для кожного ІГЕ і під подошвою палі визначено за результатами проведених польових досліджень.*

**Ключові слова:** тертя по бічній поверхні, опір ґрунту під вістрям, ущільнене ядро.

U.F. Tugaenko, Doctor of Science, Prof.  
A.P. Tkalich, Ph.D.  
L.A. Loginova, Assistant

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

## EVALUATION OF BEARING CAPACITY OF PILE IN LOESS-WATER SATURATED SOIL

*A principle of calculating the bearing capacity of driven piles in saturated loess soils is adduced. Resistance values for the lateral surface of each exam and under the sole piles determined by the results of field studies.*

**Keywords:** friction along the side surface, resistance of the soil beneath the tip, dense core.

**Введение.** Все большее количество участков городской застройки подвергаются подтоплению в результате утечек из водонесущих коммуникаций. Просадочные лессовые грунты превращаются в водонасыщенную, сильносжимаемую лессовую толщу. Сопротивление грунтов нагрузкам от свай значительно снижается.

По действующим нормам расчетные значения сопротивления по боковой поверхности ( $f$ ) и под подошвой ( $R$ ) сваи в лессовых водонасыщенных грунтах в 2 – 6 раз меньше значений, полученных по результатам экспериментов. Важнейшей практической задачей является определение фактических значений этих показателей по результатам

полевых исследований. Это повысит достоверность расчетных значений несущей способности свай в грунтах Одесского региона.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** По данной проблеме выполнено значительное количество натуральных исследований:

- испытания грунтов сваями-штампами позволили определить сопротивление по боковой поверхности и под острием сваи в лессовых грунтах природной влажности и после локального замачивания [1];

- с помощью тензодатчиков измерены напряжения в поперечном сечении сваи на разных участках длины ее ствола, по которым дифференцированно определены силы трения по его боковой поверхности [2; 3];

- натурными испытаниями установлено влияние локального замачивания на снижение сопротивления по боковой поверхности сваи [1].

**Постановка задачи.** При исследованиях НДС системы «свая – грунты основания» применяются сложное оборудование и измерительные комплексы.

Примененная авторами методика позволила с достаточной достоверностью определять сопротивление по боковой поверхности и подошве сваи с использованием оборудования, применяемого при стандартных испытаниях. Ее суть состоит в том, что после каждой ступени производится разгрузка сваи. Все ступени являются самостоятельными циклами. В каждом цикле определяется полная величина осадки, ее остаточная и упругая составляющие. По зависимости упругой составляющей от нагрузки устанавливается величина сил трения вдоль боковой поверхности и под острием. Полученные данные позволяют определить значения сил трения на отдельных участках длины ствола.

Целью данной работы является оценка несущей способности сваи с использованием характеристик сопротивления грунтов, определенных по результатам исследований.

**Основной материал и результаты.** По результатам выполненных исследований [4 – 7] можно выделить три фазы сопротивления грунтов нагрузкам от сваи: упругого сжатия ствола, деформирования уплотненного ядра и деформирования природного грунта ниже уплотненного ядра.

Для первой фазы характерно то, что упругое сжатие ствола происходит последовательно с ростом нагрузки и является следствием преодоления сопротивления трению по боковой поверхности. Упругое сжатие происходит при неподвижности острия. Окончанием этой фазы является предельное сопротивление сдвигу вдоль боковой поверхности сваи.

Во второй фазе часть нагрузки, превышающей предельное сопротивление (трение), вызывает деформирование уплотненного ядра, в пределах которого нарастают упругие и остаточные деформации. Заканчивается эта фаза при напряжениях на нижней границе уплотненного ядра, равных структурной прочности природного грунта несущего слоя.

В третьей фазе при напряжениях, превышающих структурную прочность, возникают остаточные деформации ниже уплотненного ядра. Происходит формирование нового уплотненного ядра, возникшего при забивке с трансформацией [1, 6, 7].

На рис.1. приведены графики нарастания полной ( $s$ ) и упругой составляющей осадки ( $s_y$ ) сваи при увеличении нагрузки.

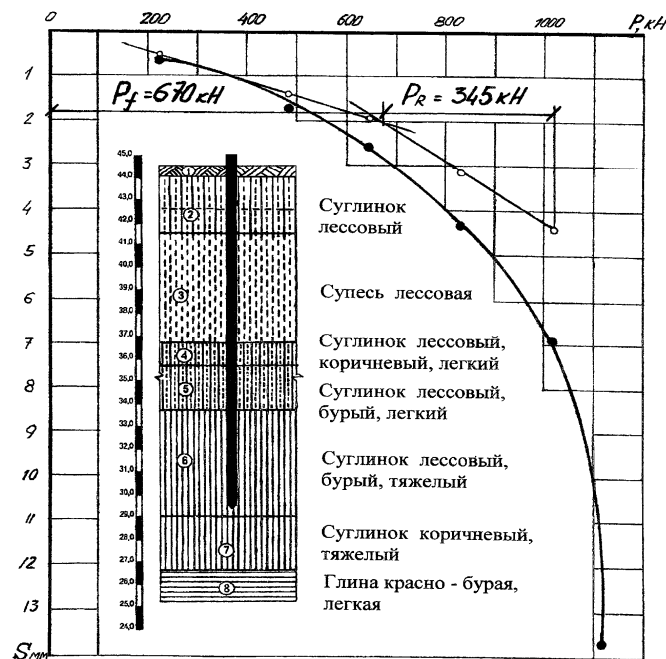


Рис. 1. График зависимости полной осадки  $s$  (●) и ее упругой  $s_y$  (○) составляющей от нагрузки [5]

Характерной особенностью грунтовых условий Одесского региона является чередование лессовидных суглинков и супесей, подстилаемых красно-бурыми глинами (табл. 1, рис. 2).

Несущая способность одиночной сваи состоит из суммы значений сопротивления грунтов по боковой поверхности ( $P_f$ ) и под ее подошвой ( $P_R$ ).

В некоторых видах глинистых грунтов наблюдается повышение ее несущей способности во времени. На основании проведенных исследований и полученных результатов испытаний свай предельное значение несущей способности можно определить по зависимости

$$F_u = \gamma [P_R + u \cdot \Sigma (f_i \cdot \ell_{fi} \cdot k_{t,i})], \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент условий работы для свай на вертикальную нагрузку принят равным 1,0;  $P_R$  – предельное сопротивление грунта ниже острия сваи; его значение следует принимать при напряжении на нижней границе уплотненного ядра равным структурной прочности несущего слоя по зависимости

$$P_R = p_{str} / \alpha \cdot A_R, \quad (2)$$

где  $p_{str}$  – структурная прочность природного грунта ниже границы уплотненного ядра;  $\alpha$  – коэффициент уменьшения напряжения по глубине

( $\alpha=0,108$ );  $A_R$  – площадь поперечного сечения сваи;  $u$  – периметр сваи;  $f_i$  – сопротивление по боковой поверхности, принимаемое по таблице 2, значения приведены по результатам проведенных авторами натурных исследований в грунтах Одесского региона;  $\ell_{f,i}$  – длина фрагмента сваи в пределах каждого ИГЭ;  $k_{t,i}$  – коэффициент повышения несущей способности сваи во времени в пределах геологического слоя (в выполненных исследованиях зафиксировано ее повышение только в пределах ИГЭ – 6, см. табл. 2).

Глубина уплотненного ядра ниже острия сваи в исследованиях, проведенных в лессовых грунтах, колеблется от 1,9 до 2,0d значений поперечного сечения сваи [1, 6, 7].

**Таблица 1. Средние значения свойств грунтов основания**

№ ИГЭ	Вид грунта	Мощность, м	$\rho_s$ г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	$w_p$	$w_L$
2	лессовый суглинок	2,2...2,5	2,68	1,47	0,19	0,32
3	лессовая супесь	4,9...5,9	2,67	1,38	0,18	0,26
4	лессовый суглинок	3,5...5,0	2,68	1,52	0,18	0,32
5	лессовая супесь	0,8...1,0	2,68	1,48	0,20	0,27
6	суглинок лессовый	6...7	2,70	1,60	0,20	0,35
7	глина кр.- бурая	1,5...2,2	2,73	1,65	0,24	0,42

**Таблица 2. Предельные значения сопротивлений грунтов нагрузкам, передаваемых сваями**

Показатели	Номера ИГЭ				
	2	3	4	5	6
Структурная прочность $p_{str}/p_{str,sat}$	$\frac{140-160}{120-140}$	$\frac{140-160}{80-130}$	- 200	- 230	- 300- 350
Предельное сопротивление сдвигу на боковой поверхности $f_{sat}$	30	20	30	35	60-80
Коэффициент повышения $f$ во времени $k_t$	-	-	-	-	1,8*

*Примечания:*

1.  $f_{sat}$  – для водонасыщенных грунтов при  $S_r \geq 0,8$ .
2. В показателях, где приведены два значения, первое относится к верхней половине слоя, а второе – к нижней.
- 3.\*Повышение  $f$  за 3 месяца после «отдыха» (20 суток), определенное по результатам исследований.

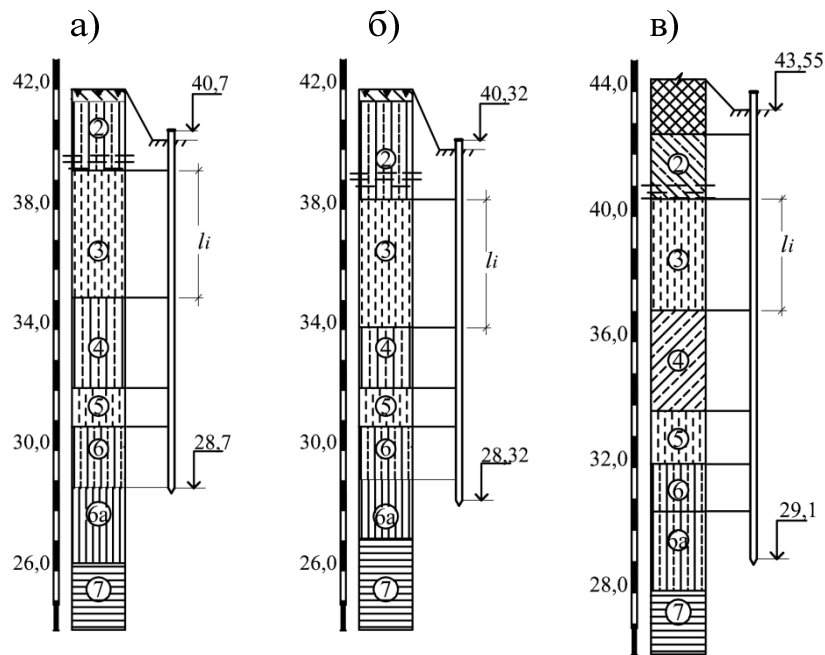


Рис. 2. Инженерно-геологические разрезы площадок испытанных свай с их высотным расположением: а) №124; б) № 462; в) г. Южный

В таблицах 3 и 4 приведено сравнение показателей сопротивления замоченных грунтов нагрузкам от свай, которые получены по результатам испытаний (рис. 2, а; б) через 20 дней («отдых») и расчетом. Расчет сопротивления грунта основания выполнен по зависимостям (1) и (2).

В г. Южный Одесской области (рис. 2, в) свая испытана через 72 дня после ее погружения [9]. Ниже приведен расчет несущей способности свай через 20 («отдых») и 72 дня (табл. 5 и 6).

Таблица 3. Расчетные значения несущей способности свай [8]

ЭШИ	$f_i$ , кПа	$p_{str}$ кПа	Свая № 124				Свая № 462			
			$\ell_{f,i}, м$	$P_f, кН$	$P_{R,к}$ Н	$F_{u,к}$ Н	$\ell_{f,i}, м$	$P_f,$ кН	$P_{R,}$ кН	$F_{u,}$ кН
2	30		1,4	58,8			1,0	42		
3	20		4,2	117,6			4,3	120,4		
4	30		1,9	79,8			3,0	126		
5	35		1,2	58,8			1,4	68,6		
6	60	300	2,0	168			2,0	168		
6а	80	350	0,7	78,4	397		-	-	369	
$\Sigma$			11,4	561	397	958	11,7	525	369	894

Примечания:

1. Острые сваи № 462 расположено на границе слоя б и б, а.
2. Сопротивление грунта по боковой поверхности определяется по зависимости  $P_f = u \cdot \Sigma(\ell_{f,i} \cdot f_i)$ .

**Таблица 4. Предельные значения сопротивления грунтов нагрузкам от свай, по результатам испытаний и расчета**

Показатели предельного сопротивления грунтов	Свая № 124			Свая № 462		
	опытные данные, кН	расчет, кН	$P_p / P_o$	опытные данные, кН	расчет, кН	$P_p / P_o$
Общая нагрузка $F_u$	950	958	1,01	880	894	1,02
Вдоль боковой поверхности $P_f$	620	561	0,90	520	525	1,01
По подошве $P_R$	330	397	1,20	350	369	1,05
Вдоль боковой поверхности при выдергивании $P_f$	605	-	-	-	-	-

**Таблица 5. Несущая способность свай с учетом фактора времени [9]**

№	$S_r$	$f_i, \text{кПа}$	$\ell_{f,i}, \text{м}$	$\ell_{f,i} \cdot f_i$	$u \cdot \Sigma(\ell_{f,i} \cdot f_i)$	$k_{t,i}$	$P_f, \text{кН}$	$P_R, \text{кН}$	$F_u, \text{кН}$
1	0,68	30	0,9	27	37,8		37,8		
2	0,93	30	2,0	60	84		84		
3	0,96	20	3,6	72	100,8		100,8		
4	0,87	30	3,3	99	138,6		138,6		
5	0,93	35	1,6	56	78,4		78,4		
6	0,93	60	1,7	102	142,8	1,8	257		
6а	0,93	80	1,4	112	156,8	1,8	282	397	
$\Sigma$			14,5	528	739,2		979	397	1376

*Примечание:* ИГЭ – 1 – насыпной слой.

**Таблица 6. Предельные значения сопротивления грунтов нагрузкам от свай во времени по результатам испытаний [9]**

Показатели	К концу «отдыха»		Через 72 суток, после забивки		$F_{u,p} / F_{u,o}$
	опытные данные	расчет	опытные данные	расчет	
$F_u, \text{кН}$	-	1136	1550	1376	0,89
$P_f, \text{кН}$	-	739	1200	980	0,82
$P_R, \text{кН}$	-	397	350	397	1,13

**Выводы.** 1. По результатам выполненных исследований авторами определены средние значения предельных сопротивлений грунтов по боковой поверхности и ниже острия свай для водонасыщенных грунтов Одесского региона и их изменение во времени.

2. Сравнение предельных значений несущей способности свай, полученных при испытаниях и по предложенному расчету, имеет близкую сходимость.

### Литература

1. Григорян, А.А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах /А.А. Григорян. – М.: Стройиздат. – 1984. – 162 с.
2. Работников, А.И. О сопротивлении грунта по боковой поверхности и под пятой буронабивной сваи /А.И. Работников, Б.М. Кованев, А.Н. Нахмуров// Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях: тезисы докладов научно-технического семинара. – Л., 1974. – С. 39 – 42.
3. Новожиллов, Г.Ф. Особенности взаимодействия сваи с грунтом в процессе загрузки / Г.Ф. Новожиллов // Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях: тезисы докладов научно-технического семинара. – Л., 1974. – С. 67 – 71.
4. Тугаенко, Ю.Ф. Результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния системы «свая – грунты основания» / Ю.Ф. Тугаенко, А.П. Ткалич // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: труды Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию БашНИИСтроя. – Том 1. Свайные фундаменты: экспериментально-теоретические исследования и практика проектирования. – Уфа, 2006. – С. 137 – 141.
5. Ткалич, А.П. Исследование параметров сопротивления лессовых грунтов нагрузкам, передаваемым на призматические сваи / А.П. Ткалич // Вісник ОДАБА. – 2010 – Вып. № 38. – С. 620 – 626.
6. Ткалич, А.П. Характеристики уплотненного и природного грунта под острием забивных свай / А.П. Ткалич // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ. – 2010. – Вип. 3(28). – С. 266 – 271.
7. Тугаенко, Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов. Монография. / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2008. – 216 с.
8. Тугаенко, Ю.Ф. Предельная нагрузка и силы трения по боковой поверхности сваи по результатам полевых исследований / Ю.Ф.Тугаенко, А.П.Ткалич // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ. – 2007. – Вип. 19. – С. 121 – 125.
9. Тугаенко, Ю.Ф. Дифференциальный подход к оценке повышения сил трения по боковой поверхности свай во времени / Ю.Ф. Тугаенко, А.В. Новский, А.П. Ткалич, Л.А. Василевская // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ. – 2007. – Вип. 19. – С. 114 – 120.

Надійшла до редакції 25.09.2013

© Ю.Ф. Тугаенко, А.П. Ткалич, Л.А. Логінова