

УДК 624.154

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ  
МОДЕЛЕЙ СВАЙ С ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ  
С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ,  
ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ**

**Логина Л.А., к.т.н.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
г. Одесса, Украина*

Для одесского региона характерно напластование лессовой толщи, состоящей из чередующихся слоев лессового суглинка и супеси, мощностью от 7,0 до 23,0 м. Условность характеристик сопротивления грунтов для расчета несущей способности свай, принятых в действующих нормах для лессовых грунтов одесского региона, приводит к значительным расхождениям с данными полевых испытаний. При полевых испытаниях раздельное определение сопротивления сдвигу на боковой поверхности сваи и сопротивления грунта под ее нижним концом не предусмотрено, что исключает возможность оценивать факторы, которые обуславливают такое расхождение. Определение характеристик сопротивления грунтов позволит повысить достоверность расчетов при проектировании свайных фундаментов.

По действующему стандарту несущая способность сваи принимается по результатам полевых испытаний без оценки сопротивления сдвигу по поверхности ствола и сжатию под нижним концом [1]. Указанные характеристики определяются дифференцированно при проведении научно-исследовательских работ, с использованием специальных конструкций свай, оборудованных сложным комплексом приборов и измерительной техники [2].

Работы, посвященные определению характеристик сопротивления грунтов ненарушенной структуры по результатам их испытаний моделями свай, отсутствуют.

Результаты данных исследований позволили раздельно определить показатели сопротивления грунта сдвигу на боковой поверхности и сопротивления сжатию под нижним концом свай в лабораторных условиях.

Исследование отдельных вопросов НДС системы свая-грунты основания выполнены моделями разного масштаба, как правило, в искусственно созданной грунтовой среде.

Целью данной работы является апробирование возможности определения параметров сопротивления грунтов нагрузкам по результатам их исследований моделями свай. Исследования выполнены на монолитах грунтов ненарушенной структуры, отобранных из одного ИГЭ-2 на разных участках строительства.

«Моделирование это есть замена изучения интересующего нас явления в натуре изучением аналогичного явления на модели меньшего или большего масштаба, обычно в специальных лабораторных условиях. В большинстве случаев моделирование основано на рассмотрении физически подобных явлений...» [3].

*Методика проведения испытаний.* Испытания проведены на монолитах первого горизонта лессового суглинки, отобранного в котлованах, разработанных для погружения свай, на двух участках в г. Одессе: №1 – участок строительства школы по ул. Говорова; №2 – участок строительства 24-этажного жилого дома по ул. Разумовской, 3 (рис.1).

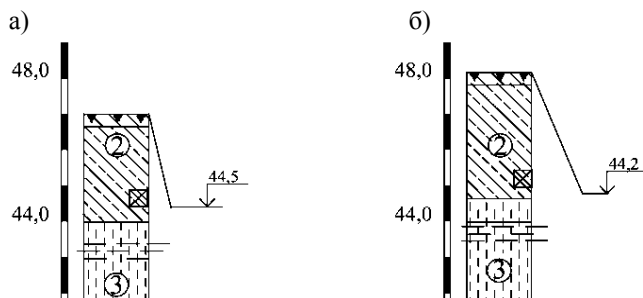


Рис. 1. Схемы отбора монолитов грунтов для лабораторных исследований: ■- места отбора монолитов; а) площадка №1; б) площадка №2

Исследования выполнены в лаборатории кафедры «Основания и фундаменты» ОГАСА с использованием прибора ОИСИ-4.

Для испытаний приняты модели призматических свай сечением 15x15 мм длиной 100 мм. Конструкции моделей свай, схема их размещения и прибор ОИСИ-4 приведены на рис. 2.

Опытные сваи погружались ритмической ударной нагрузкой до заданной глубины. Загружение выполнялось методом ступенчато-возрастающей нагрузки. Статическая нагрузка создавалась укладкой гирь на подвеску, шарнирно соединенную с траверсой, опирающуюся на шток, установленный на сваю. Осадка измерялась непосредственно после приложения нагрузки и затем с интервалом 10 мин. в течение

получаса и далее через 15 мин. до достижения условной стабилизации, за значение которой принято приращение осадки, равное 0,01мм за последние 15 мин. наблюдений.

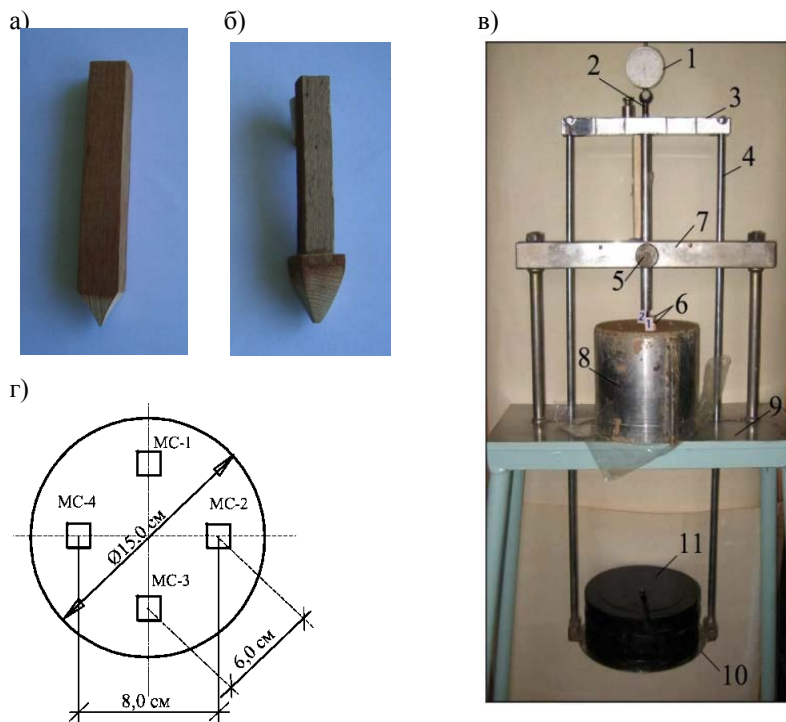


Рис. 2. Конструкции моделей свай и прибор для их испытаний: а) призматическая свая; б) фрагмент ее острия; в) прибор «ОИСИ-4»: 1 - индикатор часового типа с ценой деления 0,01мм; 2 - шток для передачи нагрузки и крепления индикатора; 3 - коромысло, через которое прямым способом передается нагрузка; 4 - тяги; 5 - регулировочный винт; 6 - испытываемая свая; 7 - траверса; 8 - кольцо, состоящее из двух полуцилиндров, с образцом грунта; 9 - стол прибора; 10 - подвеска; 11 - штучный груз в виде тарированных гирь; г) схема размещения модельных свай в плане

По результатам опытов построены графики зависимости осадки от нагрузки  $s = f(P)$  и графики нарастания осадки во времени для каждой ступени нагружения  $s = f(t, P)$ .

Опыты проведены с целью определения влияния технологии погружения свай, влажности и времени «отдыха» на величину

сопротивления грунта сдвигу на боковой поверхности и под нижним концом сваи.

Физико-механические показатели свойств грунтов по данным инженерно-геологических изысканий приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Показатели физико-механических свойств грунтов

Показатели № уч.	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	$w$ , -	$w_L$ , -	$w_p$ , -	$I_L$ , -	$I_p$ , -	$E_s$ , МПа	$\varphi$ , град	$c$ , кПа
1	1,47	0,20	0,30	0,17	0,23	0,13	$\frac{8,0}{5,0}$	20	21,0
2	1,46	0,22	0,32	0,20	0,17	0,12	$\frac{9,0}{5,0}$	18	17,0

Испытания грунта каждой сваей проведено три раза. Первое - сразу после забивки, последующие два - после, на четвертый и тридцатый день.

*Методика подготовки моделей свай к испытаниям.* При выполнении первой серии исследований грунтов моделями свай, забитых в грунт природной влажности, после забивки наблюдались зазоры с одной либо с двух сторон. Ширина их раскрытий у поверхности достигала 1,0...2,0 мм. Даже при тщательном погружении наблюдались отклонения оси сваи от вертикали. Отклонение оси сваи от вертикали вызвано асимметрией граней острия. При тщательном изготовлении моделей устранить ее не удалось.

В проведенных испытаниях для снижения влияния асимметрии граней острия применены лидерные скважины диаметром 9,0 и 12,0 мм.

Способы погружения свай представлены на рис.3.

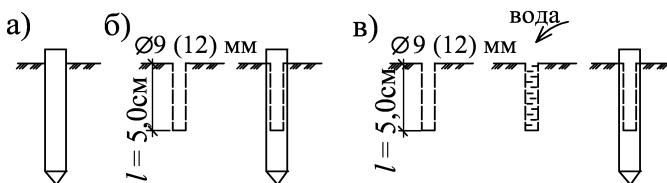


Рис. 3. Способы погружения свай: а) в грунт природной влажности; б) в скважину  $\varnothing$  9,0 (12,0) мм; в) после замачивания через скважину  $\varnothing$  9,0 (12,0) мм

Выполнены следующие серии лабораторных испытаний:

- определение сопротивления грунта нагрузкам от модельных свай, погруженных в образец грунта ненарушенной структуры природной влажности;

- то же, погруженными в предварительно пробуренную скважину Ø 9,0 мм и 12,0 мм с увлажнением окружающего грунта путем заполнения скважины водой количеством, равным ее объему.

Для сохранения постоянства влажности в интервале между испытаниями образцы грунта с моделями свай помещались в герметическую ёмкость, в которой выдерживался постоянный температурно-влажностный режим. Перед каждым испытанием определяли основные физические показатели свойств грунта: плотность и влажность.

После проведения испытаний образец монолита грунта с забитыми сваями замачивали с доведением коэффициента водонасыщения  $S_r$  до значения  $> 0,8$ .

В процессе погружения сваи вокруг ее ствола формируется зона уплотнения, возникающая в результате вытеснения грунта в стороны, а под нижним концом - уплотненное ядро (рис. 4).

В лабораторных условиях проведены исследования по определению глубины уплотненной зоны. Для измерений послойных перемещений грунта в основании сваи закладывали специальные фиксаторы цилиндрической формы, состоящие из секций трубок. До забивки сваи образец грунта ненарушенной структуры помещали в обойму, состоящую из двух полуцилиндров, разрежали в продольном направлении и закладывали фиксаторы на расстоянии 1,5 см от поверхности и далее через 1,0 см. Штриховым оттиском на прозрачной бумаге отмечалось начальное положение фиксаторов. Перед соединением двух частей кольца плоскость с фиксаторами покрывали тонким слоем мелкого песка. После испытаний и разъема полуцилиндров снимали оттиск конечного положения фиксаторов. По

снятым оттискам после их совмещения с первоначальным положением определяли послойные перемещения, которые в сумме являются деформацией, вызванной забивкой сваи и ее осадкой от нагрузки.

Методика оценки характеристик сопротивления грунтов. Часть нагрузки на сваю, превышающая предельное значение сопротивления на боковой поверхности ствола, передается острием сваи на уплотненное ядро. Предельное значение нагрузки достигается при условии, когда напряжение на нижней границе уплотненного ядра достигает значения структурной прочности подстилаемого грунта.

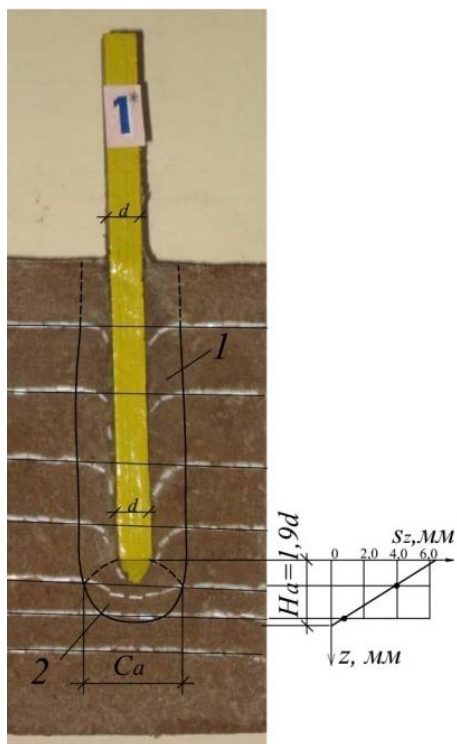


Рис. 4. Конечное положение фиксаторов и эпюра их перемещений ниже острия: 1 - зона уплотнения; 2 - уплотненное ядро

Для ее определения необходимы данные о глубине уплотненного ядра. Зная его глубину и предельную нагрузку на острие сваи, можно определить напряжение на ее нижней границе, которое равно структурной прочности, уравновешивающей предельную нагрузку на подошву сваи [4] по формуле (1) :

$$\sigma_{zp} = p_{str} = \alpha \cdot p_{R,u}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, принимаемый по таблице Д. 1 [5] в зависимости от отношения глубины зоны уплотнения к размеру поперечного

сечения сваи, равного  $\xi = 2Na / d$ ;  $p_{R,u}$  – предельное значение давления под нижним концом сваи, кПа.

Используя значения  $p_{str}$  грунта, в который заглублена подошва сваи, и глубину зоны уплотнения  $H_a$ , можно определить предельную величину нагрузки, воспринимаемую острием сваи по формуле (2):

$$P_{R,u} = p_{str} \cdot A / \alpha, \quad (2)$$

где  $p_{str}$  – структурная прочность природного грунта несущего слоя, кПа;  $A$  – площадь поперечного сечения сваи, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент рассеивания напряжений.

По результатам лабораторных исследований глубина уплотненного ядра под подошвой составила 1,9 d (рис.4), что близко совпадает с данными натурных исследований, по результатам которых глубина уплотненного ядра колеблется в пределах 1,9...2,0 d [2; 6].

На рис.5 приведены графики зависимости осадки от нагрузки моделей фрагмента острия свай сечением 1,5x1,5 см (опыты МС-17 и МС-18).

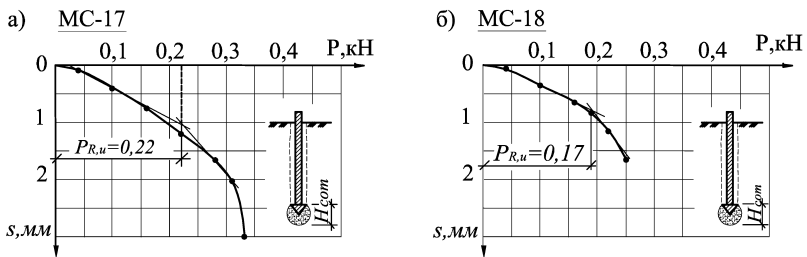


Рис.5. Результаты определения предельного сопротивления под нижним концом модельных свай в лессовидном суглинке: а) грунт естественной влажности; б) в водонасыщенном состоянии

Полученные значения напряжений равны структурной прочности, уравнивающей предельную нагрузку под нижним концом сваи. В таблице 3 приведены результаты расчетов по данным испытаний.

Значения  $p_{str}$  близко совпадают с результатами его определения в лессовидных водонасыщенных грунтах опытными штампами, так для лессового суглинка природной влажности ее значение колеблется в пределах 0,12...0,14 МПа, а для водонасыщенного – 0,09...0,11 МПа [6].

Таблица 3

Результаты определения структурной прочности  
в основании подошвы модельных свай

№ опыта	$w$	$S_r$	$P_{R,u}$ , кН	$p$ , МПа	$H_{y}^*$ , см	$\zeta$	$\alpha$	$p_{str}$ , МПа
МС-17	0,18	0,58	0,22	0,98	2,85	3,8	0,12	0,12
МС-18	0,28	0,9	0,17	0,84	2,85	3,8	0,12	0,09

Примечания:  $H_{y}^*$  - принято 1,9d;  $P_{R,u}$  - предельная нагрузка на подошву свай;  
 $p$  - давление по подошве свай.

В таблице 4 представлены результаты определения предельных значений сопротивления сдвигу на боковой поверхности и под нижним концом испытанных свай.

Таблица 4

Предельные значения сопротивления грунта сдвигу и сжатию  
по результатам испытаний модельных свай

№	Условия погружения	$A_f$ , см <sup>2</sup>	$A_R$ , см <sup>2</sup>	Предельная нагрузка, кН			Предельное сопротивление, МПа	
				$P_u$	$P_{R,u}^*$	$P_{f,u}$	$p_R$	$f$
МС-1	ненарушен. структура	54	2,25	0,37	0,22	0,15	0,98	0,028
МС-2	ненарушен. структура	54	2,25	0,22	0,22	-	0,98	-
МС-3	лидер. скв.	54	2,25	0,40	0,22	0,18	0,98	0,035
МС-4	лидер. скв.	54	2,25	0,38	0,22	0,16	0,98	0,030

Примечания:  $P_{R,u}^*$  - принято из опыта МС-17 (см. табл. 3).

На рис.6 представлены результаты испытаний четырех модельных свай. В опыте МС-1 предельная нагрузка на модельную сваю меньше, чем в опыте МС-3. После забивки свай МС-2 в грунт ненарушенной структуры наблюдались зазоры с двух сторон, ширина их раскрытия составила 2,0 мм, что оказало влияние на снижение ее несущей способности. Величина предельной нагрузки МС-2 равна МС-17.

Несущая способность модельных свай в опытах МС-3 и МС-4 больше, чем при забивке в грунт ненарушенной структуры.



Следовательно, чем больше диаметр лидерной скважины, тем меньше влияние асимметрии остря.

Результаты определения сопротивления сдвигу на боковой поверхности, полученные при погружении свай через лидерные скважины, выше, чем в грунт ненарушенной структуры природной влажности.

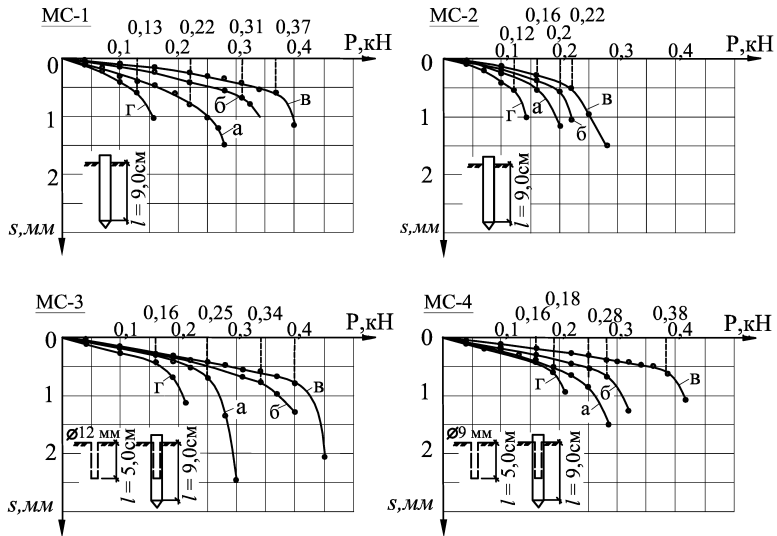


Рис. 6. Графики зависимости  $s=f(P)$  модельных свай в лабораторных условиях при природной влажности: а) испытание свай в день забивки; б, в) испытание свай через 4 и 30 дней после забивки; г) испытание после полного водонасыщения ( $S_r \geq 0,9$ )

Полученные результаты сопротивления сдвигу модельных свай, забитых через лидерные скважины, по данным лабораторных исследований одного порядка с результатами натурных исследований, выполненных в г. Никополе [2] и г. Одессе [7] для грунтов с близкими значениями физико-механическими свойств.

Исследования влияния влажности на сопротивление грунтов при их испытаниях сваями в лабораторных условиях выполнены при полном водонасыщении грунтов, коэффициент водонасыщения  $S_r$  составил 0,9...0,92.

На рис.7 приведены характерные результаты испытаний двух модельных свай. Обе сваи забиты в лидерные скважины диаметром 12,0 мм, пройденные в грунтовых монолитах природной влажности. Свая MC-7 забита через лидерную скважину без увлажнения стенок,

МС-8 - в лидерную скважину после поглощения воды, залитой до ее устья.

Этими же сваями выполнены испытания грунтов после насыщения водой (до  $S_r = 0,9$ ). Предельное значение нагрузки в опыте МС-7 снизилось на 68%, а МС-8 - на 58%. По результатам испытаний сваи-штампа средняя величина снижения несущей способности при локальном замачивании составила 32%. Результаты испытаний представлены в табл.5.

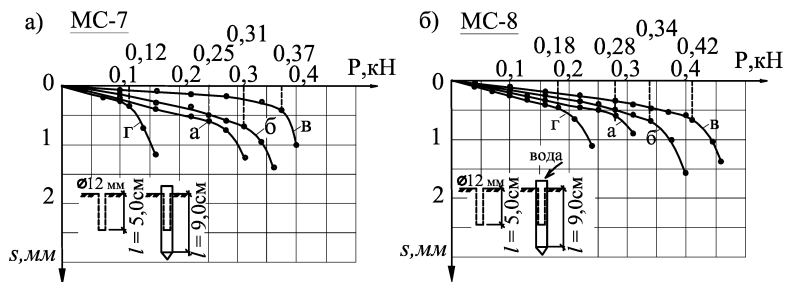


Рис. 7. Графики зависимости  $s=f(P)$  модельных свай в лабораторных условиях при природной влажности: а) испытание свай в день забивки; б, в ) испытание свай через 4 и 30 дней после забивки; г ) испытание после полного водонасыщения ( $S_r=0,9$ )

Таблица 5

Снижение несущей способности свай при замачивании

№№ опыта	Предельное значение $P_u$ , кН при		$\frac{P_{u, w_{sat}}}{P_{u, w}}$	Снижение $P_u$ , %
	w	w <sub>sat</sub>		
МС-7	0,37	0,12	0,32	68
МС-8	0,42	0,18	0,42	58
свая-штамп [1]	220	150	0,68	32

При повышении влажности снижаются характеристики, определяющие сопротивление грунтов при испытаниях их сваями. Самые низкие показатели получены при полном водонасыщении в лабораторных условиях. Снижение несущей способности в 1,8...2,0 раза ниже, чем по результатам полевых исследований [2]. Это можно объяснить тем, что коэффициент фильтрации в лессовидных суглинках в вертикальном направлении выше, чем в горизонтальном, а локальное замачивание при полевых испытаниях не обеспечивает полного водонасыщения, что не позволяет получить достоверных результатов снижения показателей сопротивления грунтов при подъеме УПВ.

Влияние времени на изменение несущей способности свай определяется их испытанием с разным периодом «отдыха» после погружения. Графики результатов испытаний модельных свай приведены на рис. 6, 7. Средние значения коэффициента увеличения несущей способности с учетом фактора времени  $k_t$  колеблются от 1,12...1,19 при различной технологии проведения лабораторных испытаний.

### **Выводы**

1. Полученные результаты по определению глубины уплотненного ядра, структурной прочности и сопротивления сдвигу при лабораторных испытаниях грунтов близко совпадают с данными натурных исследований, выполненных в г. Одессе и г. Никополе.

2. При определении влияния влажности на снижение несущей способности модельных свай получено значительное расхождение между результатами лабораторных и полевых исследований.

3. Определены средние значения коэффициента увеличения несущей способности с учетом фактора времени в суглинке лессовидном для различных условий погружения. Значения  $k_t$  колеблются в пределах 1,12...1,19.

### **Summary**

**The methods and results of the studies to characterize the resistance of soil compression and shear on the results of model tests of piles and the impact of changes in humidity and duration of "rest" after driving.**

1. Палі. Визначення несучої здатності за результатами пальових випробувань: ДСТУ Б В.2.1-27:2010. – [Чинний від 2011-07-01]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с. 2. Григорян А.А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах / А.А. Григорян. – М.: Стройиздат, 1984. – 162 с. 3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов // Издательство Наука. М.- 1977. С.436-440. 4. Дорофеев В.С. Новая методика дифференциальной оценки характеристик сопротивления грунтов при их испытаниях сваями / В.С. Дорофеев, Ю.Ф. Тугаенко, А.П. Ткалич, М.В. Марченко, Л.А. Логинова // Одесса. – “Зовнішнєрекламсервіс”, 2014. – С. 92-103. 5. Основы та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1. Палі і пальові фундаменти. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінбуд України, 2011. – 56 с. 116. 6. Тугаенко Ю.Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки / Ю.Ф. Тугаенко. ” Одесса: “Астропринт”, 2003. – 222с. 7. Тугаенко Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов / Тугаенко Ю.Ф. – Одесса. – “Астропринт”, 2008. – 213с.