

**НОВАЯ МЕТОДИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ИХ
ИСПЫТАНИЯХ СВАЯМИ**

**Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Тугаенко Ю.Ф., д.т.н., проф.,
Ткалич А.П., к.т.н., доцент, Марченко М.В., к.т.н., доцент,
Логинова Л.А., к.т.н.**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Свая является фундаментной конструкцией, передающей нагрузку от сооружения на грунты основания. Ее несущая способность определяется суммой сопротивлений сдвигу по поверхности ствола и сжатию грунта ниже остря.

В Украине, по действующим нормам, предварительное значение предельной нагрузки на сваю определяется расчетом с использованием табличных значений сопротивления сдвигу и сжатию в зависимости от состава и состояния грунтов. Расчетные значения подлежат корректировке по результатам испытаний грунтов опытными сваями, в натуральных условиях. На свайном поле объекта проводятся контрольные испытания 0,5% свай от их количества, но не менее двух. Действующим стандартом предусмотрено определение предельной нагрузки на сваю, без учета характеристик сопротивления грунтов.

В Одесской государственной академии строительства и архитектуры разработана новая методика испытаний, позволяющая определять характеристики сопротивления грунтов с использованием стандартного оборудования для статических испытаний. Ее сущность заключается в учете упругих свойств железобетона сваи, для определения предельных значений сопротивления грунтов.

Сваю окружает грунт, уплотненный в процессе ее погружения. Сопротивление сдвигу по поверхности ствола ограничивает длину сжатого участка сваи. Поэтому каждой ступени нагрузки соответствует определенный участок длины ствола, в пределах которого наблюдается его упругое деформирование. С ростом нагрузки длина сжимаемого участка увеличивается. Увеличение его длины $\Delta \ell_{fi}$ от очередной ступени происходит под влиянием соответствующего приращения нагрузки ΔP_i . Это связано с тем, что на предыдущих участках длины ствола сохраняются значения предельного сопротивления сдвигу, которые установлены натурными исследованиями [1; 2].

Упругие деформации состоят из двух частей: упругой и упруго-вязкой. Грунтовая среда, окружающая ствол сваи, является упруго-вязкой. Упругая часть деформации исчезает сразу, практически мгновенно, после снятия нагрузки, а снижение упруго-вязкой составляющей продолжается длительное время [3].

В новой методике изменена технология приложения нагрузки. Вместо ступенчато-возрастающей, предусмотренной действующим стандартом применена методика циклически-возрастающей нагрузки. Каждая ступень представляет собой самостоятельный цикл, состоящий из ее приложения, выдерживания до условной стабилизации и разгрузки. На каждой ступени измеряются полная величина осадки и ее остаточная составляющая. По их разности определяется упругая часть осадки сваи. В примененной методике использована зависимость мгновенно-упругих деформаций от нагрузки, измеренных в течение 10...15 минут после ее снятия.

По результатам испытаний строится график зависимости упругой составляющей осадки от нагрузки $s_y=f(P)$. График состоит из двух ветвей: первая характеризует упругое сжатие ствола, вторая - является суммой упругого сжатия ствола и грунта ниже острия. Точка перелома соответствует нагрузке, уравновешенной предельным сопротивлением сдвигу P_f , вдоль подземной части поверхности ствола сваи A_f . Полученная зависимость является исходной для оценки характеристик сопротивления грунтов. Начальная точка смещена от начала осей координат, так как не учтена упруго-вязкая составляющая упругих деформаций.

Упругая составляющая зависимости осадки верхнего торца сваи от нагрузки, является следствием упругого сжатия ее ствола. Длина сжатого участка по глубине ℓ_{fi} зависит от величины приложенной нагрузки P_i и сопротивления грунта сдвигу f_i на контакте поверхности сваи A_{fi} и окружающего грунта. Чем меньше сопротивление сдвигу, тем больше длина сжатого участка.

В практике исследований напряженно-деформированного состояния системы свая-грунты основания применяются два метода оценки сопротивления сдвигу: интегральный и дифференциальный. Интегральным определяют среднее значение сопротивления сдвигу по всей поверхности. С этой целью испытания проводят выдергивающей нагрузкой, применением свай-штампов и др. [4]. Дифференциальным - сопротивление сдвигу на отдельных участках длины ствола при применении тензометрических свай, тензоприборов и др. [4; 5].

Определение сопротивления сдвигу по поверхности ствола сваи. Применяя методику циклически-возрастающей нагрузки,

сопротивление сдвигу по поверхности ствола можно оценивать средним значением вдоль сваи f и на отдельных участках ее длины Δf_i . Среднее значение сопротивления сдвигу равно частному от деления нагрузки P_f на площадь поверхности ствола A_f , формула 1:

$$f = P_f / A_f, \quad (1)$$

Предельная нагрузка P_f определяется по точке пересечения первой и второй ветви упругой составляющей осадки на графике ее зависимости от нагрузки, рис. 1.

Сопротивление сдвигу на любом участке длины ствола определяется по значениям либо модуля упругости материала сваи, либо относительной деформации при ее упругом сжатии.

Оценка сопротивления сдвигу с использованием значения модуля упругости. Модуль упругости железобетона сваи при нагрузке равной предельному сопротивлению сдвигу P_f и определяется по формуле 2:

$$E_y = 0,5 \cdot P_f \cdot \ell_f / d^2 \cdot s_y = \sigma_{cp} \cdot \ell_f / s_y, \quad (2)$$

где: P_f - нагрузка равная предельному сопротивлению сдвигу по поверхности ствола сваи; ℓ_f - длина подземной части сваи; d^2 - площадь ее поперечного сечения; s_y - упругая составляющая осадки, при нагрузке P_f ; $\sigma_{cp} = 0,5 \cdot P_f / d^2$ - среднее значение напряжения в поперечном сечении сваи.

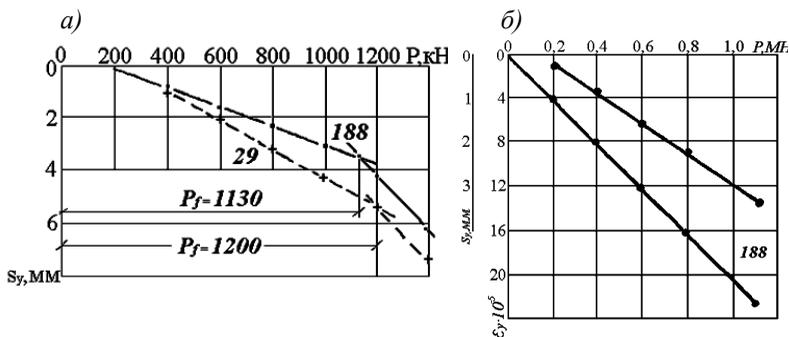


Рис.1. а) графики зависимости упругой составляющей осадки от нагрузки; б) графики зависимости упругой осадки (s_y) и относительной деформации (ϵ_y) от нагрузки. Цифрами показаны номера свай на свайном поле объекта

Принимая допущение о равенстве модуля упругости в пределах длины сваи, определяется длина сжатого участка для каждой ступени нагрузки по формуле 3:

$$\ell_{f,i} = E_y \cdot s_y / \sigma_{cp}; \quad (3)$$

Оценка сопротивления сдвигу с использованием значений относительной деформации. Относительная деформация упругого сжатия ствола при предельном сопротивлении сдвигу по его поверхности определяется отношением упругой части осадки к длине сваи по формуле 4:

$$\varepsilon_y = s_y / \ell_f \quad (4)$$

По полученным данным строят совмещенный график зависимостей упругой осадки и относительной деформации от нагрузки (рис.1.б). Для упругой составляющей осадки график строят по результатам измерений на каждой ступени нагрузки, а для относительной деформации - по двум точкам: начала координат и конечного значения P_f . По графикам рис.1,б определяется значение длины сжатого участка для любой нагрузки P_i по формуле 5:

$$\ell_{f,i} = s_{y,i} / \varepsilon_{y,i} \quad (5)$$

Используя формулу (5) строится график $\ell_f = f(P)$, по которому определяется величина предельного сопротивления сдвигу на любом участке длины ствола $\Delta \ell_{f,i}$ по формуле 6:

$$\Delta f_i = \Delta P_f / \Delta \ell_{f,i} \cdot u \quad (6)$$

где: u – периметр сваи.

По полученным значениям строится график изменения сопротивления сдвигу по длине ствола сваи.

В качестве примеров приведены результаты испытаний двух свай сечением $0,35 \times 0,35$ м длиной 16,0 и 15,0 м в г.г. Ильичевске и Южном Одесской области [4; 10]. Показатели свойств грунтов по материалам изысканий приведены в табл. 1, а геологическое строение на рис. 2, б, д. Геологические колонки показаны от поверхности дна котлованов глубиной 3,5 и 1,0 м.

Результаты измерений упругой составляющей осадки от нагрузки приведены в табл. 2. По полученным данным построены графики их зависимостей, приведенные на рис.1, а.

Таблица 1

Показатели свойств грунтов лессовой толщи

№ п/п	Вид грунта	ρ_s , г/см ³	ρ_d , г/см ³	w_L -	w_p -	S_r -	E, МПа	φ , град	c, кПа
г. Ильичевск, Одесской области (свая №188)									
2	суглинок	2,69	1,44	0,34	0,21	0,68	14/8	22	22
3	супесь	2,67	1,40	0,25	0,18	0,81	4	17	8
4	суглинок	2,68	1,42	0,33	0,21	0,72	13	22	22
5	супесь	2,67	1,40	0,26	0,18	0,80	4	17	8
6	суглинок	2,68	1,41	0,30	0,20	0,62	10	17	15
7	супесь	2,67	1,40	0,25	0,18	0,80	4	17	8
8	суглинок	2,72	1,53	0,38	0,23	0,80	16	23	25
9	глина	2,73	1,63	0,40	0,22	0,81	23	19	50
г. Южный, Одесской области (свая № 29)									
2	суглинок	2,70	1,50	0,33	0,21	0,68	12/8	20	24
3	супесь	2,69	1,46	0,28	0,20	0,93	4	20	6
4	суглинок	2,70	1,61	0,34	0,22	0,96	13	18	23
5	супесь	2,69	1,54	0,28	0,20	0,87	7	15	9
6,6 а	суглинок	2,72	1,57	0,42	0,26	0,93	14	21	35
7	глина	2,73	1,55	0,46	0,27	0,93	20	18	30

Примечание: основанием свай служит грунтовая толща сложенная лессовыми грунтами: суглинками и супесями с высоким уровнем подземных вод.

Упругое деформирование сваи по длине ее ствола происходит неравномерно и зависит от сопротивления слоев грунтов сдвигу пройденных свай. При равных приращениях нагрузки в слоях с меньшим сопротивлением сдвигу приращение длины сжимаемого участка больше, чем в слоях с большим его значением. На рис. 2,а. приведены зависимости длины сжатого участка от нагрузки.

По графику рис.2, а можно определить величину сопротивления сдвигу на любом участке длины ствола по формуле 5. На рис.2, в, д. приведены их значения по длине сваи определенные по результатам исследований.

Оценка предельного сопротивления сжатию и структурной прочности. Ствол сваи, после ее погружения окружает уплотненный грунт, а ниже острия уплотненное ядро. Схема состояния грунтов в ее

нижней части приведена на рис.3, в. При нагрузке превышающей предельное сопротивление сдвигу по боковой поверхности $P > P_f$ ниже острия сваи наблюдаются упругие и остаточные деформации. В глинистых грунтах при формировании уплотненного ядра происходит повышение плотности скелета грунта и снижение структурной прочности, значение которой ниже, чем в окружающем природном грунте [6]. Поэтому вначале остаточные деформации возникают внутри уплотненного ядра, до нагрузки, при которой напряжения на границе зоны уплотнения уравниваются структурной прочностью окружающего грунта. Для лессовых супесей и суглинков глубина уплотненного ядра H_{com} колеблется в пределах $1,9...2,0 d$ [7...10; 12]. Тогда напряжение на нижней границе зоны уплотнения будет равным:

$$\sigma_{zp} = \alpha \cdot P_R / d^2 \quad (7)$$

где: α – коэффициент, учитывающий изменение по глубине дополнительного давления в грунте (рис. 3, д), определяется по ДБН [13].

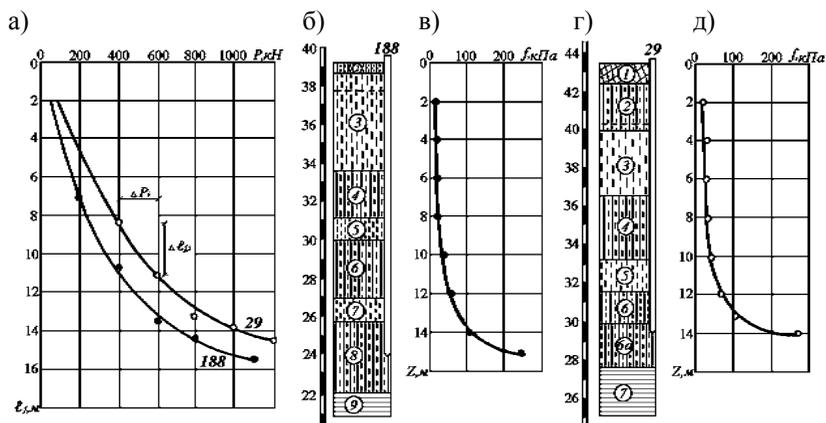


Рис.2. Определение сопротивления сдвигу по длине сваи: а) графики зависимости длины упруго-сжатого участка ствола сваи от нагрузки; б, г) инженерно - геологическое строение участков строительства; в, д) графики изменения сопротивления сдвигу по глубине для свай 188 и 29. Пунктирной линией показан уровень подземных вод

Испытания грунтов сваями с приложением вертикальной вдавливающей и выдергивающей нагрузок проведены на четырех площадках участка застройки комплекса жилых зданий по ул.

Затонского, угол Крымского бульвара в г. Одессе. Сваи с поперечным сечением 0,35 м и длиной 12,0 м. Геологическое строение на двух опытных площадках с противоположных сторон участка приведены на рис. 3, а б, а показатели свойств грунтов в табл. 3. Уровень подземных вод в период испытаний залегал на глубине 1,8 м ниже природного рельефа (0,4...0,6 м ниже дна котлована). По результатам исследований определены значения предельной нагрузки F_u и структурной прочности p_{str} несущего слоя. С этой целью, после достижения критической нагрузки, при постоянстве которой наблюдается незатухающее нарастание осадки, нагрузка сохраняется до достижения осадки 5,0 – 7,0 мм, после чего прекращается подкачка масла в камеру домкрата. В результате релаксаций напряжений значительно сокращается длительность стабилизации деформации. Величина нагрузки после достижения равновесия является предельной и уравнивается суммой сопротивлений сдвигу по поверхности ствола (P_f) и сжатию ниже острия сваи (P_R) и определяется по формуле 8:

$$F_u = P_f + P_R \quad (8)$$

Таблица 2

Параметры деформирования ствола сваи и грунтов основания

№ сваи	P, MN	$s_y, см$	$\ell_{fi}, см$	$\Delta P_i, кН$	$\Delta \ell_{fi}, см$	$f_i, кПа$
г. Ильичевск, Одесской области						
188	0,2	0,029	699	200	699	20,4
	0,4	0,085	1052	200	353	40,5
	0,6	0,16	1336	200	284	50,3
	0,8	0,226	1419	-	-	-
	1,13	0,346	1540	530	204	185,6
					1540	1130
г. Южный, Одесской области						
29	0,4	0,103	822	400	822	34,8
	0,6	0,210	1144	200	322	44,4
	0,8	0,319	1312	200	168	85,0
	1,0	0,420	1382	-	-	-
	1,2	0,527	1440	400	128	223,2
					1440	1200

Структурная прочность равна напряжению на границе уплотненного ядра от предельного значения части нагрузки на острие сваи P_R . Результаты определений приведены в табл. 4.

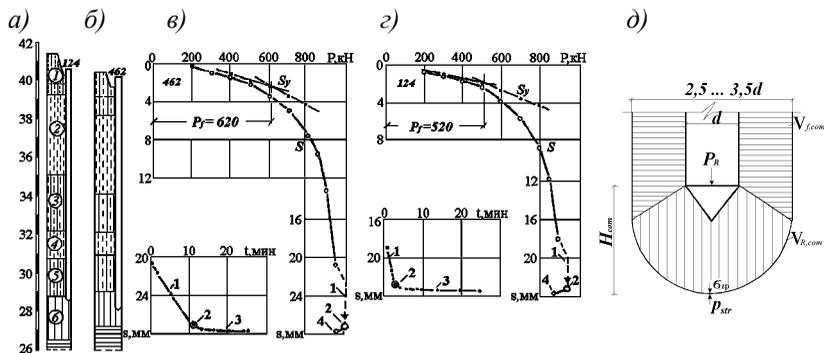


Рис.3. Результаты испытаний грунтов сваями на вертикальную вдавливающую нагрузку: а, б) инженерно - геологические колонки участков испытания свай; в, г) графики зависимости осадки от нагрузки. 1. «срыв» сваи. 2. Прекращение подкачки масла в камеру домкрата. 3. Процесс снижения нагрузки и стабилизации деформаций. 4. Нагрузка, уравновешенная силами сопротивлением грунтов; д) состояние грунтовой среды после погружения свай. $V_{f.com}$ – объем уплотненного грунта вокруг ствола свай. $V_{R.com}$ – уплотненное грунтовое ядро под острием сваи

Таблица 3

Показатели свойств грунтов

№ИГЭ	Вид грунта	ρ_s г/см ³	ρ_d г/см ³	w_L -	w_p -	S_r -	E, МПа	φ , град	c, кПа
г. Одесса (сваи №№ 124 и 624)									
1	суглинок	2,70	1,41	0,32	0,20	0,62	6	18	15
2	супесь	2,69	1,38	0,27	0,19	0,79	3	15	6
3	суглинок	2,69	1,53	0,29	0,17	0,78	7	17	18
4	супесь	2,70	1,52	0,28	0,19	0,80	5	16	9
5	суглинок	2,71	1,57	0,33	0,18	0,82	10	19	24
6	суглинок	2,71	1,59	0,35	0,19	0,85	12	20	36
7	глина	2,73	1,58	0,40	0,21	0,90	15	20	41

Колебания значений структурной прочности по результатам испытаний сваями для ИГЭ-6 (240...330 кПа) близко совпадают с результатами определения опытными штампами 250 кПа [11].

Достоверность характеристик сопротивления грунтов по результатам испытаний их сваями методикой циклически-возрастающей нагрузки. Достоверность примененной методики определения среднего значения сопротивления сдвигу по поверхности ствола подтверждена результатами испытаний грунтов сваями на вдавливающую и выдергивающую нагрузки [4].

Таблица 4

Сопротивление грунтов по результатам испытаний сваями

№ сваи	P_{lim} , кН	$P_{кр.}$, кН	F_w , кН	P_f , кН	P_R , кН	P_R/d^2 , кПа	p_{str} , кПа	$p_{str,ср.}$, кПа
124	900	950	880	520	360	2939	317	293
404	850	900	850	580	270	2204	238	
462	950	1000	950	620	330	2694	291	
129	900	950	930	570	370	3020	326	

Испытания на вертикальную выдергивающую нагрузку проведены в непосредственной близости от сваи № 462 и выполнены дважды, рис. 4. Первый раз через 11 дней после погружения и повторно, после интервала продолжительностью 12 дней. Результаты испытаний приведены в таблице 5.

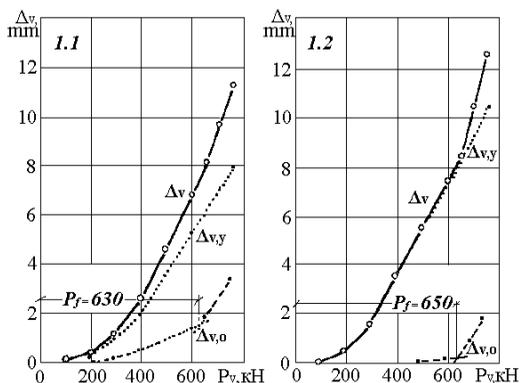


Рис.4. Результаты испытаний сваи на вертикальную выдергивающую нагрузку: 1.1 - первое испытание; 1.2 – повторное

Исследования выполнены по методике циклически возрастающей нагрузки. При испытании на выдергивание растягивающие усилие воспринимает рабочая арматура в упругой стадии деформирования. При первом испытании наблюдались значительные остаточные деформации, объяснить которые можно появлением микротрещин в бетоне сваи на контакте с арматурой при приложении выдергивающей нагрузки.

Таблица 5

Сопротивление сдвигу по поверхности ствола свай

№ дома	№ сваи	P_f , кН	l_f , м	A_f , м ²	$P_f + G_{св}$, кН	$P_f - G_{св}$, кН	$f_{ср.}$, кПа
3	124	520	11,67	16,3	555	-	34
3а	404	580	11,58	16,2	615	-	38
7	462	620	11,38	15,9	655	-	41
8	129	560	11,56	16,2	595	-	37
7	1.1	630	11,52	16,1	-	595	37
7	1.2	650	11,52	16,1	-	615	38

Примечания: P_f - предельная нагрузка уравновешенная сопротивлением по боковой поверхности сваи; l_f и A_f - длина подземной части сваи и площадь ее боковой поверхности; $G_{св}$ - вес сваи, равный 35 кН; $f_{ср.}$ - среднее значения сдвигу по боковой поверхности

При повторном испытании остаточные деформации составили доли миллиметра. Зависимость остаточных деформаций от нагрузки имеет две ветви. Первая характеризует совместную деформацию рабочих стержней арматуры с бетоном сваи, а вторая определяет «выход» сваи из грунтового основания. Их пересечение фиксирует нагрузку соответствующую началу «выхода» сваи из основания. Полученное значение нагрузки за вычетом веса сваи определяет предельную величину выдергивающей нагрузки, по которой определено среднее значение сопротивления сдвигу по поверхности ствола. Результаты определений приведены в табл.5. Расхождения между результатами предельного значения сопротивления сдвигу по поверхности ствола, по результатам испытаний вдавливающей и выдергивающей нагрузок двух рядом расположенных свай составило около 8%.

Выводы

1. Методика циклически – возрастающей нагрузки позволяет определить целый ряд параметров напряженно-деформированного состояния системы свая - грунты основания

2. Ее применение возможно при использовании стандартных стендов и не требует дополнительного оборудования и измерительных систем.

3. Достоверность полученных результатов проверена натурными исследованиями.

SUMMARY

New methodology over of determination of resistance of soils to the change along the surface of barrel of pile and compression below of her edge is brought, that is worked out on results the field researches, with the use of the equipment applied at standard tests.

Литература

1.Новожилов Г.Ф., Платонов Ю.Н. Испытания тензометрических свай в различных грунтовых условиях Ленинграда / Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях. Тезисы докладов научно-технического семинара. Ленинград. 1974. С. 56 – 60.

2.Работников А.И., Кованев Б.М., Нахмуров А.Н. О сопротивлении грунта по боковой поверхности и под пятой буронабивной сваи / Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях. Тезисы докладов научно-технического семинара. Ленинград. 1974. С. 39 – 42.

3. Ермолаев Н.Н., Прокудин И.В. Основные направления развития и задачи науки по динамике оснований и фундаментов // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Строительство и архитектура. 1976. №1. С. 3 –20.

4. Григорян А.А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах. М.: Стройиздат,1984. 162 с.

5. Трофименков Ю.Г., Бахолдин Б.В., Швец В.Б., Мариупольский Л.Г., Работников А.И., Алексеев А.И., Лобов О.И. Совершенствование методов определения несущей способности свай / Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. М. 1973. С. 150–161.

6. Тугаенко Ю.Ф., Марченко М.В. Некоторые особенности развития деформаций в основаниях опытных фундаментов // Инженерная геология. 1988. №3. С. 46 – 54.

7. Аршакуни Д.Е., Нагорных И.М., Голубков В.Н., Тугаенко Ю.Ф. Исследования совместной работы забивных коротких свай с грунтами основания // Транспортное строительство. 1974. № 4. С. 41–42.

8. Григорян А.А., Мамонов В.М. О работе висячей сваи в просадочном грунте / Сборник докладов и сообщений по свайным фундаментам. М. 1968. С. 246–252.

9. Голубков В.Н. Основа целенаправленного проектирования свайных фундаментов уплотнения / Расчет и проектирование свай и свайных фундаментов. Труды II Всесоюзной конференции: «Современные проблемы свайного фундаментостроения в СССР». Пермь. 1990. С. 14–15.

10. Тугаенко Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов. Одесса. Астропринт. 2008. 216 с.

11. Работников А.И., Корякин В.С. Исследования деформации лессовых грунтов в скважинах штампами// Межведомственный Республиканский научный сборник. Основания и фундаменты. Киев. 1969. Вып.2. С. 77– 80.

12. Тугаенко Ю.Ф., Новский А.В., Ткалич А.П., Василевская Л.А. Дифференциальный подход к оценке повышения сил трения по боковой поверхности свай во времени /Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 19. Полтава. ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка. 2007. С. 114–120.

13. Основи 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.

