

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛЕЙ СВАЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению закономерности распределения сил сопротивления по боковой поверхности модельных свай без учета вертикального нагружения, а также влияния выдергивающей и вдавливающей нагрузок.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ОПОРУ ПО БІЧНІЙ ПОВЕРХНІ МОДЕЛЕЙ ПАЛІ

Наведено результати експериментальних досліджень з виявлення закономірності розподілу сил опору по бічній поверхні модельних палі без урахування вертикального навантаження, а також впливу висмикувального та вдавливающего навантаження.

Ключові слова: *експеримент, модель, палі, бічна поверхня, сили опору, стан спокою, вертикальне навантаження.*

EXPERIMENTAL STUDIES OF RESISTANCE FORCES OVER THE LATERAL SURFACE OF PILE'S MODELS

The paper presents results of experimental studies on revealing the patterns of distribution of resistance forces over the lateral surface of pile's models without the vertical loading, as well as the influence of pulling and pressed load.

Keywords: *experiment, model, pile, lateral surface, the force of resistance, the quiescent state, the vertical load.*

Введение. Анализ последних публикаций [1 – 4] показывает большую заинтересованность исследователей вопросами распределения несущей способности между боковой поверхностью и подошвой свай, в основном, при вдавливающих нагрузках. Однако наши испытания двух идентичных натуральных свай на действие вдавливающих и выдергивающих нагрузок [5] позволили сделать вывод о том, что направление приложения вертикальной нагрузки при определении их несущей способности по

боковой поверхности имеет принципиальное значение, что указывает на неправомерность положения нормативного документа [6] о равенстве сил сопротивления грунта по боковой поверхности свай вне зависимости от направления нагрузки.

Обзор последних источников исследований и публикаций. В своих теоретических и экспериментальных исследованиях В.Н. Морозов [7, 8] отмечает, что сопротивление по стволу сваи определяется величиной горизонтального давления грунта на её боковую поверхность. На основании теоретического решения автор сделал вывод о различности бокового давления грунта на сваю при вдавливании и выдёргивании, что доказал экспериментально, определив зависимость между сопротивлением по боковой поверхности при вдавливании и выдёргивании сваи. Полученные им значения несущих способностей за счёт сил сопротивления по боковой поверхности при вдавливании и выдёргивании находятся в пределах $1,84 \leq T_{вд} / T_{выд} \leq 2,89$.

В работах А.В. Новского, Ю.Ф. Тугаенко и др. [1, 2] определяется значение сопротивления грунтов основания по боковой поверхности сваи по зависимости упругой составляющей сжатия ствола от нагрузки. Применение методики приложения циклически возрастающей нагрузки, отличие которой от стандартной заключается в снятии нагрузки после каждой ступени загрузки с измерением остаточной составляющей деформации позволило А.В. Новскому, Л.О. Логиновой [3], Ю.Ф. Тугаенко [4] получить дополнительные параметры совместного деформирования ствола сваи и околосвайного массива грунта. Такой метод так же дал возможность получить эпюры распределений усилий по глубине нагруженной сваи.

По результатам экспериментов авторы приводят графики зависимости сопротивления сдвига (сил сопротивления) на боковой поверхности свай по глубине, где имеет место повышение значений с глубиной, особенно на уровне подошвы сваи, что связано с передачей силами трения вдоль ствола сваи на уровень подошвы дополнительных напряжений в процессе вертикального нагружения, что описывается в работах В.Г. Березанцева [9, 10].

Выделение не решенных ранее частей проблемы, которым посвящена статья. В работах [1 – 11] проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения горизонтального давления, сил трения и сопротивления по боковой поверхности свай. Они отлична от методики Кулона, т.к. в них получены нелинейные зависимости изменения горизонтального давления по глубине ствола сваи.

Целью данной работы было проведение экспериментальных исследований развития сил сопротивления по боковой поверхности модельной сваи при различных направлениях внешних усилий.

Основной материал и результаты. Лабораторные исследования сил сопротивления грунта по боковой поверхности сваи были выполнены на основании предложенного запатентованного способа [11].

Экспериментальные исследования сил сопротивления сыпучего грунта по боковой поверхности сваи проводились в лабораторных условиях на многосекционной сборной модели сваи. Экспериментальный лоток высотой 1500 мм и размерами в плане 1500×1000 мм был выполнен из листов фанеры толщиной 12 мм и каркаса из металлических уголков. В качестве многосекционной модели сваи использовались одинаковые фторопластовые детали (секции) Ø46 мм и высотой 50 мм в количестве 21 штуки. Каждая секция была специальным образом проточена для обеспечения соединения предыдущей и последующей секций с зазором <0,2 мм. Внутри каждой секции было проточено отверстие определённой формы под поворотную штангу с приваренным шлицем на конце, который обеспечивал «захват» необходимой секции изнутри (рис.1).

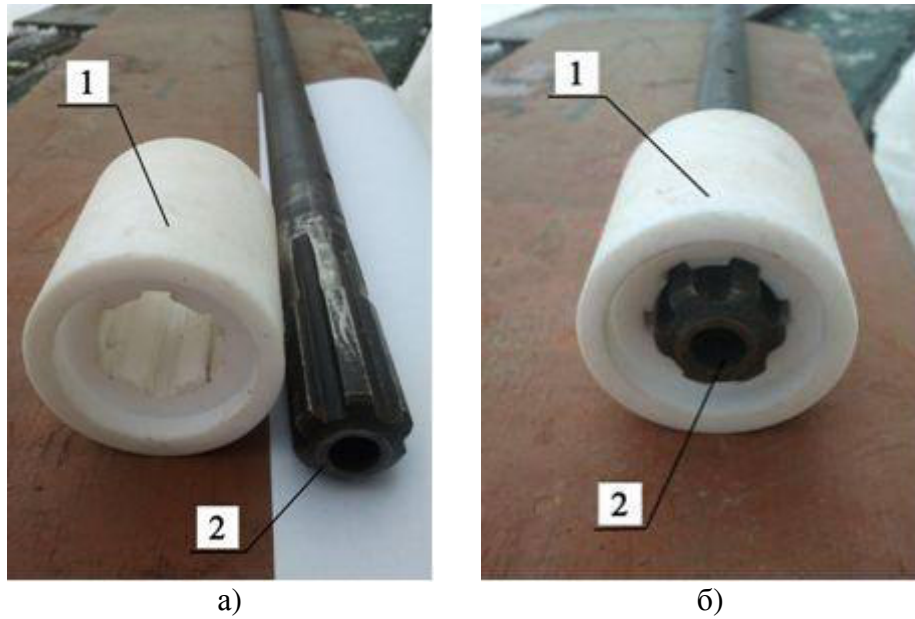


Рис. 1. Конструкция секции модельной сваи:
а) 1 – фторопластовая секция $\varnothing 46$ мм и $h=50$ мм; 2 – поворотная штанга;
б) поворотная штанга в рабочем положении

Модельная свая была выполнена с учётом требований теории подобия [12] в масштабе $M \approx 1:10$, т.е. соотношение двух численных значений модельной сваи, таких как длина сваи L и её диаметр D , было аналогично отношению таких же численных значений для реальной сваи. Расстояние между сваями и стенками лотка было 475 мм (по стороне в плане равной 1000 мм) и 725 мм (по стороне в плане равной 1500 мм).

В качестве засыпки использовался мелкий, сухой, однородный кварцевый песок ($\gamma=1,5$ тс/м³, $\varphi=30^\circ$). Средний размер зерна от 0,20 до 0,25 мм. Песок в лоток засыпался равномерно небольшими порциями «дождём» до необходимой высоты засыпки. После полной засыпки до начала первой серии экспериментальных испытаний установка выдерживалась в проектном положении минимум 30 минут.

Основной идеей лабораторного эксперимента было определение сил сопротивления грунта (несущей способности) по боковой поверхности модельной сваи в состоянии покоя и влияния вдавливающих и выдергивающих нагрузок на изменение несущей способности.

Определение сил сопротивления в состоянии покоя $T_{пок}$ заключалось в передаче моментного усилия M на каждую секцию многосекционной модельной сваи при данной высоте засыпки H с последующей обработкой и суммированием результатов для всех секций. Далее, прикладывая на сваю вдавливающее или выдергивающее усилия для данного уровня засыпки H , можно получить соответственно значения несущей способности $T_{вд}$ и $T_{выд}$.

Для исключения влияния дополнительных напряжений в грунте от собственного веса сваи при определении $T_{пок}$ она подвешивалась на некоторую высоту от дна лотка. Для передачи моментного (поворотного) усилия на прокручиваемую секцию использовался поворотный механизм. Начало движения (срыва) нагружаемой секции и всей модельной сваи при выдёргивании и вдавливании фиксировалось визуально с помощью простых условных датчиков, прикреплённых к поворотной штанге либо к телу модельной сваи (рис. 2).

Всего было проведено 7 серий по 20 определений. После каждой серии установка «отдыхала» минимум 30 минут. Схема и общий вид установки в процессе эксперимента по определению распределения по глубине z сил сопротивления грунта по боковой поверхности модельной сваи в состоянии покоя при высоте засыпки $H=1$ м и соотношении $z/D=21,74$ приведена на рис. 3.

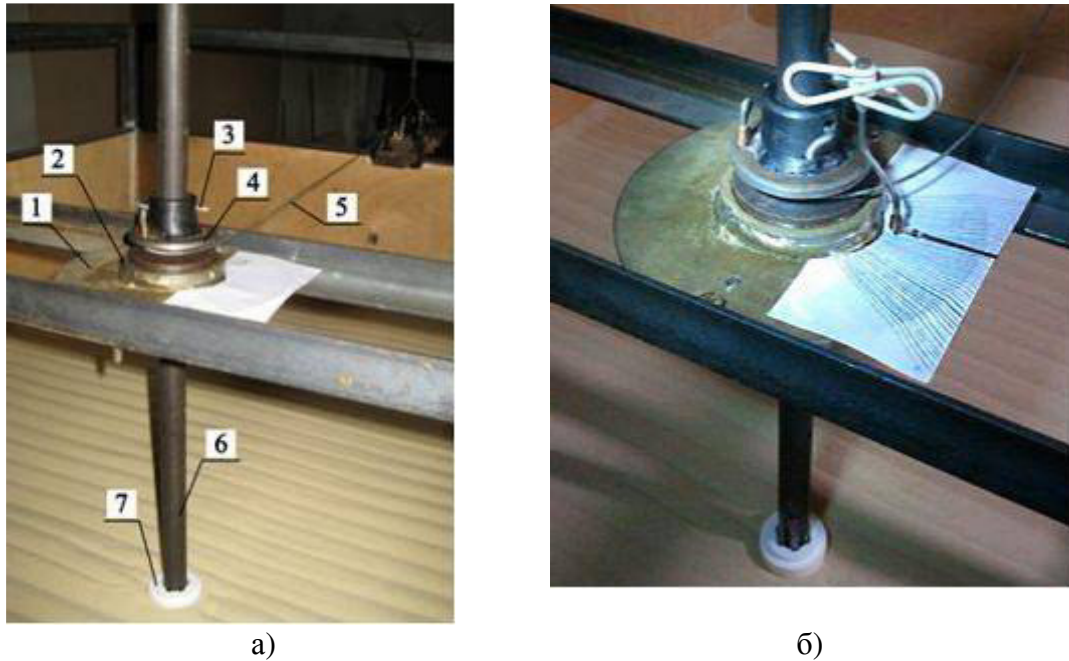


Рис. 2. Поворотный механизм и условный датчик: а) конструкция поворотного механизма: 1 – металлический диск; 2 – обойма с упорным подшипником внутри; 3 – штифт; 4 – шкив с развитой трубчатой частью; 5 – трос $\varnothing 2$ мм; 6 – поворотная штанга; 7 – свая; 2 – поворотная штанга; б) условный датчик фиксации начала движения (срыва)

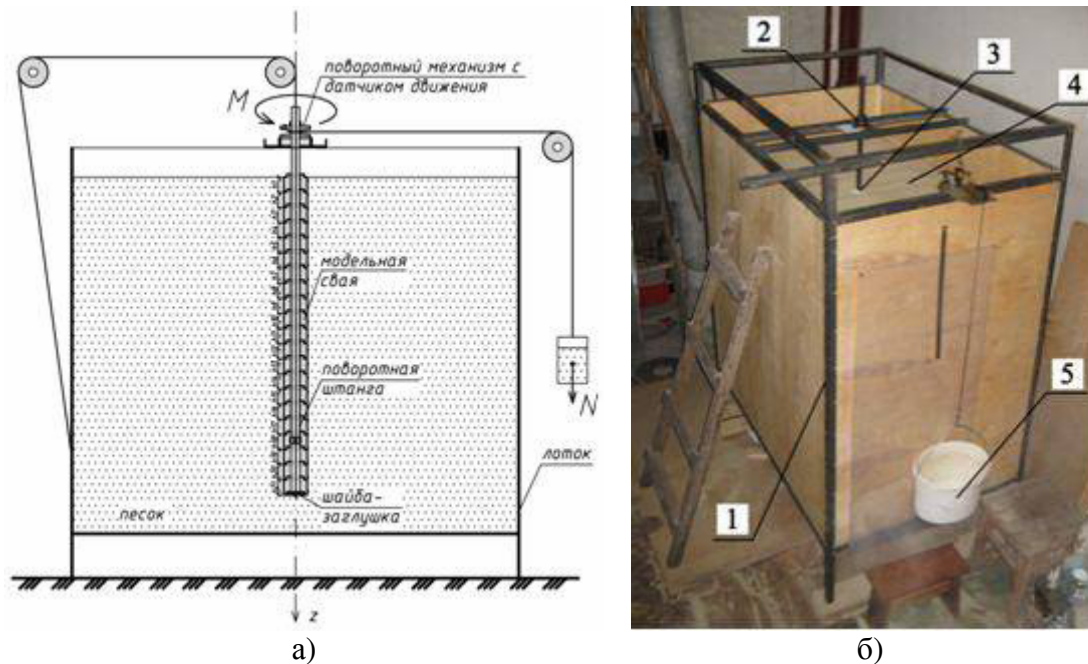


Рис. 3. Установка в процессе эксперимента: а) схема работы установки; б) установка в процессе эксперимента: 1 – лоток; 2 – поворотный механизм; 3 – модельная свая; 4 – песок; 5 – ёмкость для нагружения и передачи моментного усилия через блок

Таким же способом были проведены эксперименты по определению распределения по глубине z сил сопротивления грунта по боковой поверхности модельной сваи в состоянии покоя при высоте засыпки $H=0,8$ м и соотношении $z/D=17,39$ (16 серий по 7 определений); $H=0,6$ м и соотношении $z/D=13,04$ (12 серий по 7 определений); $H=0,4$ м и соотношении $z/D=8,70$ (8 серий по 7 определений); $H=0,2$ м и соотношении $z/D=4,35$ (4 серий по 7 определений). Засыпка лотка и последующие определения производились от меньшего к большему, т.е. от $H=0,2$ м до $H=1$ м. За весь эксперимент было проведено 420 определений, что позволило, руководствуясь нормами [13], качественно провести статистическую обработку частных значений эксперимента. Распределения по глубине сил сопротивления сыпучего грунта $T_{пок,i}$ по стволу модельной сваи в состоянии покоя сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента по определению $T_{пок}$

z, м	№ секции	z/D, м	H=0,2м; z/D=4,35		H=0,4м; z/D=8,70		H=0,6м; z/D=13,04		H=0,8м; z/D=17,39		H=1м; z/D=21,74	
			M _{пок} , кгс·м	T _{пок} , кгс	M _{пок} , кгс·м	T _{пок} , кгс	M _{пок} , кгс·м	T _{пок} , кгс	M _{пок} , кгс·м	T _{пок} , кгс	M _{пок} , кгс·м	T _{пок} , кгс
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,025	1	0,54	0,002	0,046	0,003	0,073	0,003	0,067	0,004	0,094	0,003	0,071
0,075	2	1,63	0,005	0,101	0,006	0,123	0,005	0,117	0,008	0,163	0,006	0,122
0,125	3	2,72	0,006	0,128	0,006	0,140	0,007	0,155	0,009	0,197	0,006	0,140
0,175	4	3,80	0,009	0,191	0,007	0,149	0,009	0,191	0,010	0,214	0,011	0,231
0,225	5	4,89			0,012	0,256	0,011	0,244	0,012	0,255	0,015	0,332
0,275	6	5,98			0,013	0,282	0,014	0,311	0,015	0,322	0,016	0,353
0,325	7	7,07			0,018	0,383	0,014	0,307	0,016	0,347	0,022	0,472
0,375	8	8,15			0,019	0,413	0,020	0,435	0,017	0,364	0,022	0,474
0,425	9	9,24					0,022	0,469	0,022	0,472	0,023	0,499
0,475	10	10,33					0,023	0,501	0,024	0,520	0,027	0,590
0,525	11	11,41					0,028	0,618	0,024	0,516	0,027	0,591
0,575	12	12,50					0,032	0,686	0,029	0,628	0,028	0,613
0,625	13	13,59							0,031	0,670	0,032	0,696
0,675	14	14,67							0,033	0,708	0,034	0,745
0,725	15	15,76							0,033	0,725	0,036	0,775
0,775	16	16,85							0,041	0,892	0,038	0,816
0,825	17	17,93									0,038	0,832
0,875	18	19,02									0,038	0,821
0,925	19	20,11									0,038	0,817
0,975	20	21,20									0,039	0,837
Сумм. силы сопротивл.			Σ	0,466	Σ	1,819	Σ	4,100	Σ	7,085	Σ	10,829

На основании полученных экспериментальных значений $T_{пок}$ и их анализа предложена единая зависимость распределения сил сопротивления сыпучего грунта (песка) по глубине z в состоянии покоя при $H=1$ м и соотношении $z/D=21,74$, которая справедлива для значений $T_{пок}$ и при других значениях H и соотношениях z/D , полученных в ходе эксперимента

$$T_{пок} = -0,0014(z/D)^2 + 0,0694(z/D) + 0,0047. \quad (1)$$

Распределение $T_{пок}$ по глубине z при соотношении $z/D \leq 21,74$ представлено в виде графика на рис. 4.

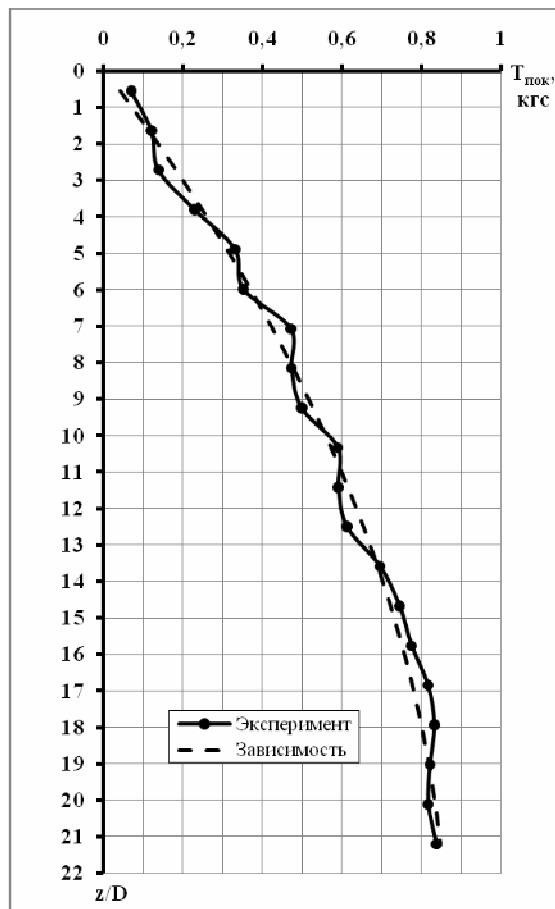


Рис. 4. Распределение сил сопротивления сыпучего материала (песка) в состоянии покоя $T_{пок}$ по глубине z при $z/D \leq 21,74$

При соотношениях $z/D \leq 17,39$ характер распределения $T_{пок}$ по глубине z имеет практически линейную зависимость, а при $z/D > 17,39$ характер меняется на затухающий.

Также исследовали несущую способности сваи за счёт сопротивления грунта по боковой поверхности при действии вдавливающих и выдёргивающих нагрузок. Для исключения работы сваи по подошве при вдавливании в днище лотка была вмонтирована специальная пропускная конструкция с использованием резинового сальника.

Статическая вдавливающая нагрузка $N_{вд}$ прикладывалась к нижнему концу модельной сваи для исключения перекосов и кренов, которые могли возникнуть в случае приложения нагрузки к голове модельной сваи. Статическая вертикальная выдёргивающая нагрузка $N_{выд}$ прикладывалась к голове модельной сваи через трос. Исследования были проведены при различных параметрах H и z/D , аналогичных первой части эксперимента. Значения фиксировались в момент начала движения (срыва) модельной сваи. Схемы работы установки при вдавливании и выдёргивании при высоте засыпки $H=1$ м приведены на рис. 5.

На основании проведенных экспериментов были установлены зависимости между суммарными силами сопротивления по боковой поверхности (несущая способность) при выдёргивании $T_{выд}$, при вдавливании $T_{вд}$ и в состоянии покоя $T_{пок}$. Полученные значения сведены в табл. 2 и представлены на графиках рис. 6.

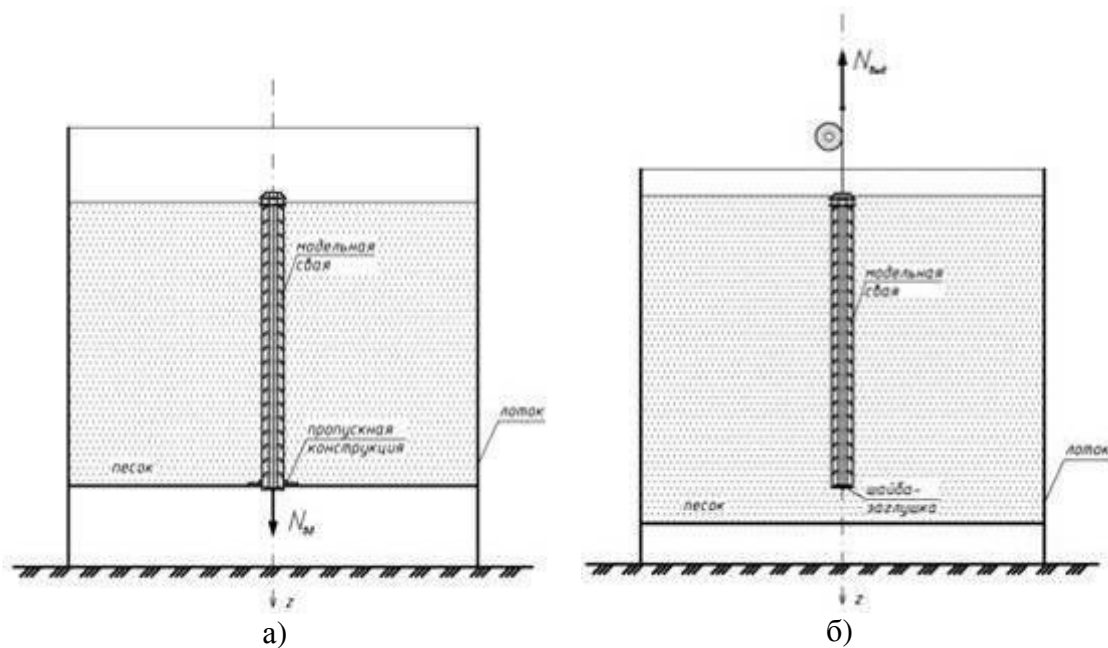


Рис. 5. Схемы приложения вертикальных нагрузок:
а) вдавливание; б) выдёргивание

Таблица 2. Несущая способность модельной сваи за счёт сил трения по боковой поверхности при вдавливании $T_{вд}$ и выдёргивании $T_{выд}$

Экспериментальные значения при вдавливании по данным 3-х определений $N_{вд}$, кгс			\bar{N} , кгс	$T_{саль}$, кгс	G , кгс	Принятое $T_{вд}$, кгс	$T_{вд} / T_{пок}$	Экспериментальные значения при выдёргивании по данным 3-х определений $N_{выд}$, кгс			\bar{N} , кгс	G , кгс	Принятое $T_{выд}$, кгс	$T_{выд} / T_{пок}$	$T_{вд} / T_{выд}$
1	2	3						1	2	3					
$H=0,2$ м; $z/D=4,35$; $T_{пок}=0,466$ кгс															
7,50	7,50	7,30	7,43	0,97	2,88	9,34	20,04	5,10	4,70	4,40	6,09	2,88	3,21	6,89	2,91
$H=0,4$ м; $z/D=8,70$; $T_{пок}=1,819$ кгс															
15,10	14,80	15,30	15,07	0,97	2,88	16,98	9,33	8,00	6,80	7,50	7,40	2,88	4,52	2,48	3,76
$H=0,6$ м; $z/D=13,04$; $T_{пок}=4,100$ кгс															
24,10	22,40	25,30	23,93	0,97	2,88	25,84	6,30	14,70	14,90	14,50	14,70	2,88	11,82	2,88	2,19
$H=0,8$ м; $z/D=17,39$; $T_{пок}=7,085$ кгс															
31,20	31,40	31,00	31,2	0,97	2,88	33,11	4,67	17,50	18,00	17,80	17,80	2,88	14,92	2,11	2,22
$H=1$ м; $z/D=21,74$; $T_{пок}=10,829$ кгс															
36,20	36,00	35,80	36,00	0,97	2,88	37,91	3,50	20,20	20,00	19,80	20,00	2,88	17,12	1,58	2,21

G – собственный вес модельной сваи, кгс; $T_{саль}$ – сила сопротивления сальника пропускной конструкции при вдавливании модельной сваи, кгс.

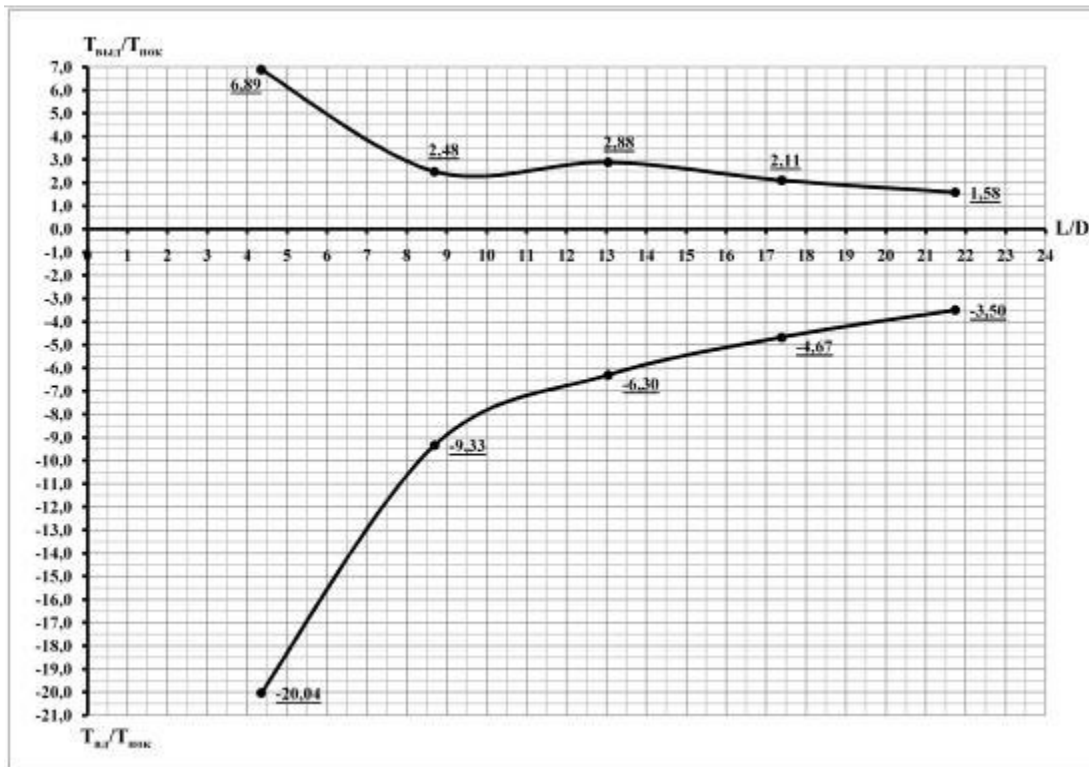


Рис. 6. Залежність відносних сил опору ґрунту по боковій поверхні модельних свай при вдавлюванні $T_{вд}/T_{пок}$ і видіргиванні $T_{вд}/T_{пок}$ от различного соотношения длины свай L (высота засыпки H) к её диаметру D

На основании проведенной работы и полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработана конструкция установки и реализован запатентованный нами способ для определения сил сопротивления сыпучего ґрунта по боковой поверхности модельных свай.

2. Выявлен характер распределения сил сопротивления сыпучего ґрунта по длине модельной свай в «состоянии покоя», которое предложено рассматривать впервые.

3. Установлена зависимость между силами сопротивления сыпучего ґрунта по боковой поверхности свай при действии вдавливающих и выдёргивающих вертикальных нагрузок. При этом соотношение несущих способностей за счёт сил сопротивления по боковой поверхности при вдавливании $T_{вд}$ и выдёргивании $T_{вд}$ находится в пределах $2,19 \leq T_{вд}/T_{вд} \leq 3,76$, что существенно отличается от соотношения, основанного на нормах [6], где $F_d/F_{дл} = 1/0,8 = 1,25$.

4. С учетом значительной разницы несущей способности по боковой поверхности вдавливаемых и выдёргиваемых свай необходима разработка соответствующей методики расчёта в зависимости от направления вертикальных нагрузок.

Литература

1. Сопротивление по боковой поверхности свай в условиях водонасыщенных ґрунтов 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.
2. Новський В.О. Несуча здатність буронабивних паль у вапняку-черепашинику: автореферат на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Одеса: ОДАБА, 2010. – 20 с.

3. Логінова Л.О. Удосконалення методів визначення характеристик опору ґрунтів в основі паль з урахуванням фактору часу: автореферат на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Одеса: ОДАБА, 2013. – 20 с.
4. Тугаенко Ю.Ф. Развитие деформаций в системе «свая – ґрунты основания» под действием вертикальной вдавливающей нагрузки // Ю.Ф. Тугаенко, А.П. Ткалич // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 18. – Одеса, 2006. – С. 253 – 258.
5. Самородов А.В. Полевые исследования несущей способности буроналивных 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.
6. ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
7. Морозов В.Н. Теоретическое определение изменения величины бокового давления ґрунта на сваю при вертикальных нагрузках / В.Н. Морозов // Научные труды ЛИСИ. – № 22. – Л.: ЛИСИ. - 1959. – С. 139 – 146.
8. Морозов В.Н. Экспериментальное определение величины бокового давления ґрунта на сваю / В.Н. Морозов // Научные труды ЛИСИ. – № 22. – Л.: ЛИСИ, 1959. – С. 147 – 153.
9. Березанцев В.Г. Расчет прочности оснований сооружений. – Л.-М.: Госстройиздат, 1960. – 138 с.
10. Березанцев В.Г. К вопросу об определении несущей способности свай / В.Г. Березанцев, Го Нин // Основания и фундаменты. – 1959 – № 22. – С. 3 – 6.
11. Пат. 96859 Україна, МПК (2011.01) G01L/ 7/00, E02D 1/00. Спосіб визначення нормального тиску сипучих матеріалів на конструкції огорож / О.В. Самородов, І.Я. Лучковський, А.В. Убийвовк, С.В. Табачников, патентовласник Харківський національний університет будівництва та архітектури. – №96859; заяв. 20.05.2010; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23 – 4 с.
12. Седов Л.Н. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
13. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с.

Надійшла до редакції 24.12.2014
© С.В. Табачников