

И.И. Бекбасаров¹, Н.А. Шаншабаев²

(¹д.т.н., профессор, ²PhD докторант,

^{1,2}Таразский региональный университет им. М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан)

ОБ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ЗАБИВКИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПИРАМИДАЛЬНО-ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СВАЙ

Аннотация. В статье изложены результаты забивки и статических испытаний моделей свай с разной продольной формой, проведенных в лабораторных условиях. Выявлено, что удельная энергоемкость забивки пирамидально-призматических свай может как превышать, так и быть меньше удельной энергоемкости забивки призматических свай. В отличие от пирамидальной сваи пирамидально-призматические сваи обладают меньшей удельной энергоемкостью забивки. Энергетические затраты на забивку пирамидально-призматических свай, а также их сопротивляемость действию вдавливающей вертикальной нагрузки зависят от длины пирамидального участка и с его увеличением повышаются. Установлено что, при одинаковой глубине забивки и при одинаковых осадках свай удельная несущая способность пирамидально-призматических свай выше, чем у призматических свай и меньше, чем у пирамидальной сваи. Выявленные особенности поведения пирамидально-призматических свай обусловлены влиянием продольной формы, и длины пирамидальной части их ствола на процесс забивки и работу под нагрузкой.

Ключевые слова: модель, грунт, свая, пирамидально-призматическая свая, призматическая свая, пирамидальная свая, удельная энергоемкость, несущая способность, удельная несущая способность, осадка.

Как известно, в практике свайного фундаментостроения широко применяются призматические и пирамидальные сваи. Призматические сваи, как правило, по несущей способности несколько уступают пирамидальным сваям. Так, несущая способность пирамидальных свай в зависимости от угла наклона их боковых граней в 1,35-2,5 раза превышает несущую способность призматических свай [1]. Но энергетические затраты сваебойных молотов на погружение пирамидальных свай в 2-3 раза выше, чем для призматических свай, что сопровождается снижением производительности молотов и увеличением продолжительности забивки свай [1]. Следовательно, призматические сваи, уступая пирамидальным сваям по несущей способности, обладают существенными преимуществами перед ними по энергоемкости и продолжительности забивки. Как видно, указанные различия в поведении рассматриваемых свай обусловлены их разной формой продольного сечения. Исходя из этого, очевидно, что актуальным является создание свайных конструкций такой формы, которые сочетали в себе преимущественные свойства как призматической, так и пирамидальной сваи в оптимальном сочетании. К подобным забивным сваям можно отнести пирамидально-призматические сваи, разработанные в геотехнической лаборатории Таразского регионального университета им. М.Х. Дулати под опоры гидротехнических сооружений [2]. Эти новые свайные конструкции обладают комбинированной (пирамидально-призматической) формой,

содержащей в себе как пирамидальную (верхнюю), так и призматическую (нижнюю) части. Учитывая новизну предложенных свай, авторами проводятся комплексные экспериментально-теоретические исследования по изучению особенностей их забивки и работы под нагрузкой.

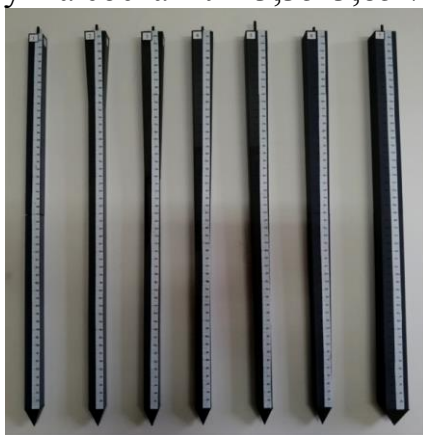
Результаты ранее выполненной предварительной расчетной оценки, представленные в работах [3, 4], показывают, что форма пирамидально-призматических свай (далее – ППС) оказывает влияние на их несущую способность и существенно отличается от несущей способности пирамидальных и призматических свай.

В рамках экспериментальных исследований, на начальном этапе, проведены эксперименты с применением моделей свай в лабораторных условиях, результаты которых представлены в настоящей работе.

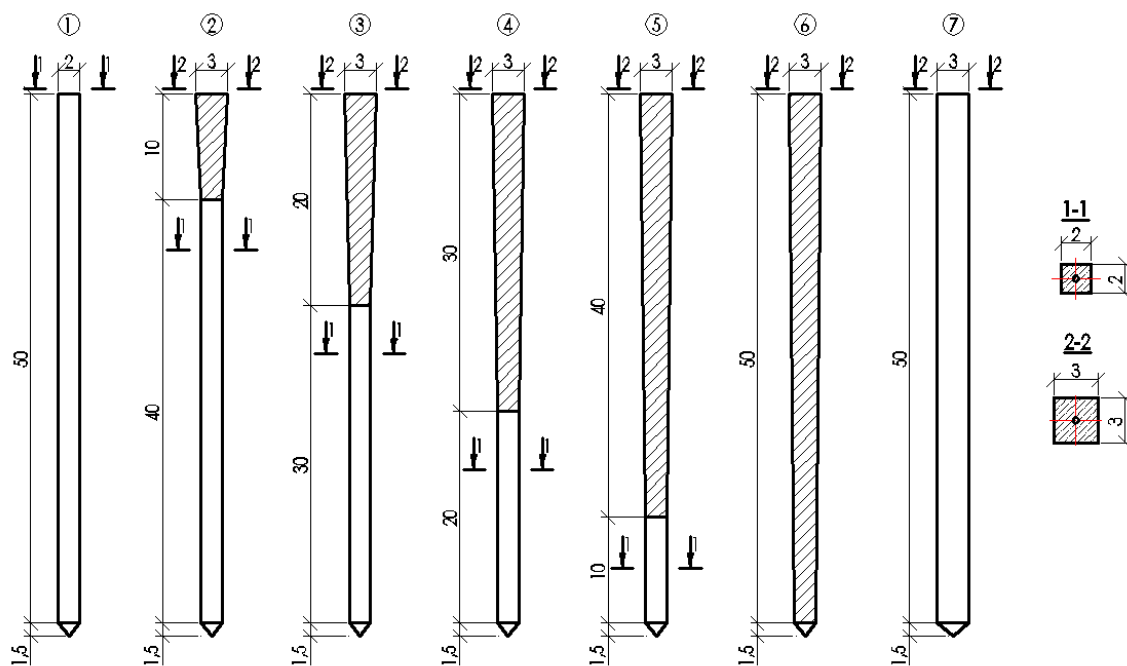
Модели свай изготовлены методом наплавления (FDM) и распечатаны на 3d принтере (StratasysLtd). Расходным материалом является пластик ABS Plus. Масштаб моделирования принят равным 1:10. Отклонения размеров моделей в технологическом процессе 3d-печати не превышают 0,02 мм. Модели ППС изготовлены с размерами сечения: пирамидального участка поверху – 30×30 мм; пирамидального участка понизу – 20×20 мм; призматического участка – 20×20 мм. Длина пирамидального участка моделей ППС принималась 10, 20, 30 и 40 см.

В качестве контрольных (сравниваемых) моделей приняты: модель призматической сваи с размерами поперечного сечения 20×20 мм, модель призматической сваи с размерами поперечного сечения 30×30 мм и модель пирамидальной сваи с размерами сечения в верхней части 30×30 мм, а в нижней части – 20×20 мм. Уклон боковых граней модели пирамидальной сваи к вертикали составил $i_p = 0,01$. Длина всех моделей составляла 50 см. Общий вид и схемы моделей свай представлены на рис. 1. Геометрические параметры моделей свай и их масса приведены в табл. 1.

Эксперименты проводились в грунтовом лотке, оснащенный многоцелевым навесным лабораторным оборудованием. Особенности, принцип и порядок работы использованного оборудования изложены в работе [5]. В качестве модели грунта в лотке принят послойно уплотненный насыпной грунт – песок средней крупности однородного состава. Осредненные значения влажности песчанного грунта составили 3,35-3,85 %, а плотность – 1,4-1,5 г/см³.



а)



б)

1 – модель призматической сваи с сечением 20×20 см; 2 – модель ППС размерами сечения поверху 30×30 см и пирамидальным участком длиной 1 м; 3 – то же, модель с участком длиной 2 м; 4 – то же, модель с участком длиной 3 м; 5 – то же, модель с участком длиной 4 м; 6 – модель пирамидальной сваи с размерами сечения по верху 30×30 см, понизу 20×20 см; 7 – модель призматической сваи с сечением 30×30 см

Рис. 1. Общий вид (а) и схемы (б) моделей свай

Таблица 1. Геометрические параметры моделей свай и их масса

Вид модели сваи	Геометрические параметры, мм			Масса, г
	длина ствола (длина пирамидального участка)	длина острия	размеры поперечного сечения ствола	
Опытные модели:				
- ППС с размерами сечения поверху 30×30 см и пирамидальным участком длиной 1 м;	500 (100)	15	30×30 / 20×20	300
- то же, с пирамидальным участком длиной 2 м;	500 (200)			330
- то же, с пирамидальным участком длиной 3 м;	500 (300)			360
- то же, с пирамидальным участком длиной 4 м.	500 (400)			390
Контрольные модели:				
- призматической сваи;	500	15	20×20	270
- призматической сваи;			30×30	560
- пирамидальной сваи.			30×30 / 20×20	420
<i>Примечание:</i> перед чертой указаны размеры поперечного сечения модели в верхней части, после черты – в нижней части.				

Модели свай погружались в грунт путем их забивки ударником примерно на одинаковую глубину при постоянной энергии каждого удара. Масса ударника принималась равной 600 г, а высота ее сбрасывания – равным 500 мм. Глубина погружения моделей свай составила 469-470 мм (максимальная разница – 0,21%).

Результаты забивки опытных и контрольных моделей свай приведены на рисунке 2 и в таблицах 2 и 3. При этом сравнительная оценка энергоемкости забивки моделей свай выполнялась по следующим показателям:

- удельной энергоемкости забивки E_v , принятой в виде отношения полной потенциальной энергии ударов ударника, затраченной на забивку модели, к объему ее погруженной части в грунт;

- коэффициенту относительной энергоемкости забивки $K_э$, принятому в виде отношения полной потенциальной энергии ударов ударника, затраченной на забивку опытной модели сваи к аналогическому энергетическому параметру контрольной модели сваи.

Таблица 2. Результаты забивки моделей свай

Вид модели сваи	Полная энергия ударов, затраченная на забивку E , Дж, (количество ударов)	Глубина погружения L , мм	Объем погруженной части V , см ³	Удельная энергоемкость забивки E_v , Дж/см ³
Модель ППС с размерами сечения поверху 30×30 см и пирамидальным участком длиной 1 м	97,12(33)	469	208,7	0,465
То же, с пирамидальным участком длиной 2 м	108,89 (37)	470	232,03	0,470
То же, с пирамидальным участком длиной 3 м	123,60 (42)	470	256,0	0,482
То же, с пирамидальным участком длиной 4 м	153,03 (52)	469	272,7	0,549
Модель призматической сваи (с размерами сечения 20×20 см)	61,80 (21)	469	192,6	0,320
Модель призматической сваи (с размерами сечения 30×30 см)	235,44 (80)	470	434,25	0,542
Модель пирамидальной сваи	191,29 (65)	469	297,03	0,644

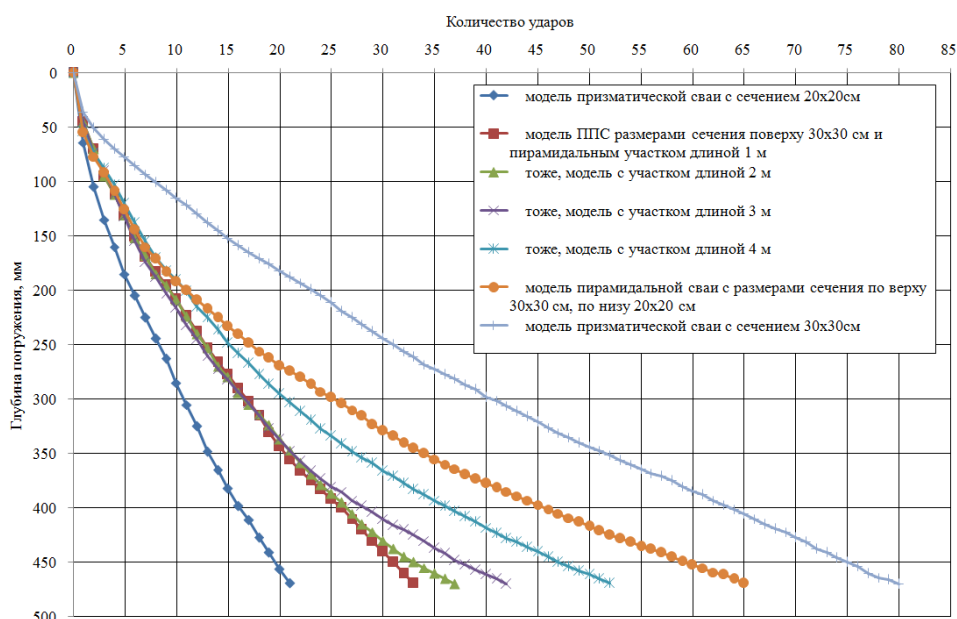


Рис. 2. Зависимость глубины погружения свай от количества ударов

Таблица 3. Значения коэффициентов относительной энергоёмкости забивки $K_{э}$ моделей свай

Коэффициенты относительной энергоёмкости забивки моделей	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с длиной пирамидального участка			
	1 м	2 м	3 м	4 м
$K_{э1}$	1,57	1,76	2,0	2,48
$K_{э2}$	0,41	0,46	0,52	0,65
$K_{э3}$	0,51	0,57	0,65	0,80

Примечание: Коэффициенты $K_{э1}$, $K_{э2}$ и $K_{э3}$ соответственно относятся к моделям призматической свай с размерами сечения 20×20 см, призматической свай с размерами сечения 30×30 см и пирамидальной свай свая с размерами сечения поверху 30×30 см и понизу 20×20 см

Сравнительный анализ значений удельной энергоёмкости забивки моделей опытных и контрольных свай позволяет выделить следующие закономерности (табл. 2):

- удельная энергоёмкость забивки опытных свай при одинаковой глубине погружения с увеличением длины пирамидального участка с 1 до 2, 3 и 4 м повышается соответственно на 1,08, 3,66 и 18,06%;
- среди опытных свай наибольшая удельная энергоёмкость характерна для свай с длиной пирамидального участка 4 м;
- удельная энергоёмкость забивки опытной свай с пирамидальным участком длиной 4 м на 71,56% больше, чем удельная энергоёмкость забивки призматической свай с размерами сечения 20×20 см и на 1,29% больше, чем у призматической свай с размерами сечения 30×30 см;
- удельная энергоёмкость забивки опытной свай длиной пирамидального участка 4 м на 14,7% меньше, чем удельная энергоёмкость забивки пирамидальной свай с размерами сечения поверху 30×30 см и понизу 20×20 см.

Сопоставление полных энергетических затрат на погружение моделей свай позволяет установить следующие особенности забивки опытных свай (табл. 2 и 3):

- затраты энергии на погружение опытных свай на одинаковую глубину с увеличением длины пирамидального участка от 1 до 2,3 и 4 м повышаются соответственно на 12,12, 13,51 и 23,81%;

- затраты энергии на погружение опытных свай в 1,57-2,48 раза выше, чем на погружение призматической сваи с размерами сечения 20×20 см;

- затраты энергии на погружение опытных свай на 35,0-59,0% и 20,0-49,0% меньше, чем на забивку призматической сваи с размерами сечения 30×30 см и пирамидальной сваи с размерами сечения поверху 30×30 см и понизу 20×20 см.

Для оценки несущей способности моделей свай выполнены их статические испытания на действие вертикальных вдавливающих нагрузок. Вдавливающая нагрузка передавалась на модели свай в ступенчато-возрастающем режиме с обеспечением условной стабилизации их осадок в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2012 [6]. Статическая загрузка моделей производилась до осадок не менее 40 мм.

Результаты испытаний представлены на рисунке 3 и в таблицах 4-6. Сравнительная оценка сопротивляемости моделей свай действию вдавливающей нагрузки выполнялась по следующим показателям:

- несущей способности F_d , устанавливаемой с учетом требований МСП 5.01-101-2003 [7];

- удельной несущей способности F_d^v , принятой в виде отношения несущей способности модели сваи к объему ее погруженной части в грунт;

- коэффициенту относительной эффективности моделей по несущей способности K_e , принятому в виде отношения несущей способности опытной модели сваи к аналогичному силовому параметру контрольной модели сваи.

Таблица 4. Значения несущей F_d и удельной несущей способности F_d^v моделей свай

Вид модели сваи	Несущая способность модели сваи F_d , Н, при осадке		Удельная несущая способность модели сваи F_d^v , Н/см ³ , при осадке	
	20 мм	40 мм	20 мм	40 мм
Модель ППС размерами сечения поверху 30×30 см и пирамидальным участком длиной 1 м	112,1	127,5	0,536	0,611
То же, с пирамидальным участком длиной 2 м	137,1	157,4	0,591	0,678
То же, с пирамидальным участком длиной 3 м	178,2	196,9	0,696	0,769
То же, с пирамидальным участком длиной 4 м	195,0	216,6	0,715	0,792
Модель призматической сваи (с размерами сечения 20×20 см)	77,5	87,5	0,402	0,454
Модель призматической сваи (с размерами сечения 30×30 см)	178,0	188,2	0,410	0,433
Модель пирамидальной сваи	235,8	255,0	0,794	0,858

Таблица 5. Значения коэффициентов относительной эффективности моделей свай по несущей способности $K_{э}$ при осадке 20 мм

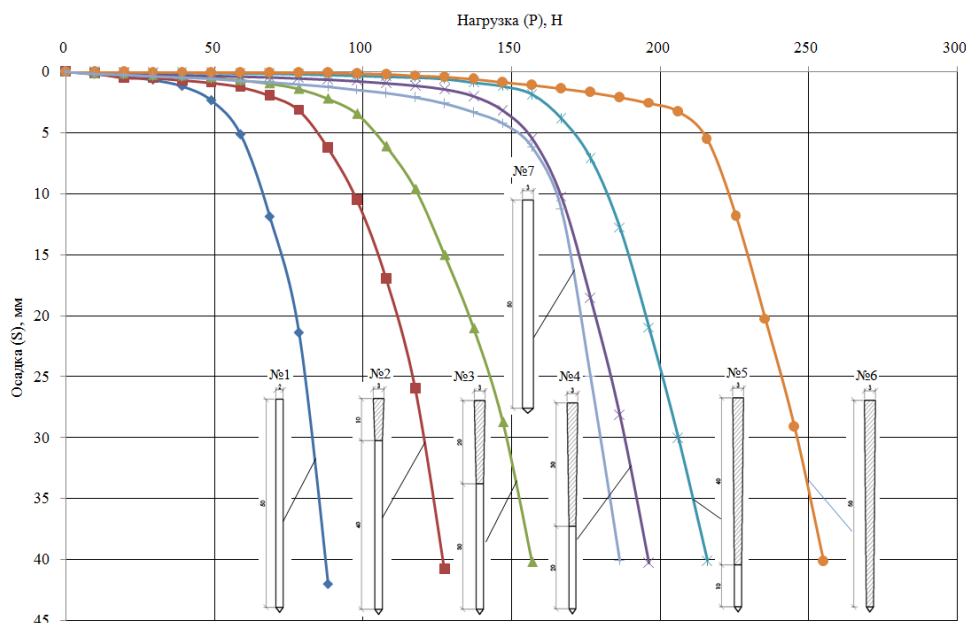
Коэффициенты относительной эффективности несущей способности моделей	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с длиной пирамидального участка			
	1 м	2 м	3 м	4 м
$K_{э1}$	1,45	1,77	2,30	2,52
$K_{э2}$	0,63	0,77	1,0	1,10
$K_{э3}$	0,47	0,58	0,75	0,83

Примечание: Коэффициенты $K_{э1}$, $K_{э2}$ и $K_{э3}$ соответственно относятся к моделям призматической сваи с размерами сечения 20×20 см, призматической сваи с размерами сечения 30×30 см и пирамидальной сваи свая с размерами сечения поверху 30×30 см и понизу 20×20 см

Таблица 6. Значения коэффициентов относительной эффективности моделей свай по несущей способности $K_{э}$ при осадке 40 мм

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности моделей	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с длиной пирамидального участка			
	1 м	2 м	3 м	4 м
$K_{э1}$	1,46	1,80	2,25	2,47
$K_{э2}$	0,68	0,84	1,05	1,15
$K_{э3}$	0,5	0,62	0,77	0,85

Примечание: Коэффициенты $K_{э1}$, $K_{э2}$ и $K_{э3}$ соответственно относятся к моделям призматической сваи с размерами сечения 20×20 см, призматической сваи с размерами сечения 30×30 см и пирамидальной сваи свая с размерами сечения поверху 30×30 см и понизу 20×20 см



1 – модель призматической сваи с сечением 20×20 см; 2 – модель ППС размерами сечения поверху 30×30 см и пирамидальным участком длиной 1 м; 3 – то же, модель с участком длиной 2 м; 4 – то же, модель с участком длиной 3 м; 5 – то же, модель с участком длиной 4 м; 6 – модель пирамидальной сваи с размерами сечения по верху 30×30 см, по низу 20×20 см; 7 – модель призматической сваи с сечением 30×30 см

Рис. 3. Зависимость осадки моделей свай от статической вдавливающей нагрузки

Сравнение значений несущей способности моделей опытных и контрольных свай позволяет установить следующие особенности (табл. 4-6):

- несущая способность опытных свай с увеличением длины пирамидального участка от 1 м до 2,3 и 4 м повышается соответственно в 1,22, 1,59 и 1,74 раза при осадках свай 20 мм, и в 1,23, 1,54 и 1,69 раза – при осадках свай 40 мм;

- среди опытных свай наибольшей несущей способностью обладают свая с длиной пирамидального участка 4 м;

- несущая способность опытных свай превышает несущую способность призматической сваи с размерами сечения 20×20 см: при осадках свай 20 мм – в 1,45-2,52 раза; при осадках 40 мм – в 1,46-2,47 раза;

- несущая способность опытных свай длиной призматического участка 1 и 2 м меньше несущей способности призматической сваи с размерами поперечного сечения 30х30 см: при осадках свай 20 мм – на 23,0-37,0%; при осадках свай 40 мм – на 16,0-32,0%;

- несущая способность опытных свай меньше несущей способности пирамидальной сваи с размерами поверху 30×30 см и понизу 20×20 см: при осадках 20 мм – на 17,0-53,0%; при осадках 40 мм – на 15,0-50,0%.

Данные, представленные в табл. 7 и 8, математически описывают следующей линейной функцией:

$$K_{\text{э}} = L_{\text{пр}} a + b, \quad (1)$$

где $K_{\text{э}}$ – коэффициент относительной эффективности несущей способности модели сваи; a и b – коэффициенты, принимаемые по табл. 7 и 8; $L_{\text{пр}}$ – длина пирамидальной части сваи.

Таблица 7. Значения коэффициентов a и b в формуле (1) при осадке 20 мм

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности моделей свай	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации (R^2)
	a	b	
$K_{\text{э}1}$	0.374	1.075	0.977
$K_{\text{э}2}$	0.164	0.465	0.979
$K_{\text{э}3}$	0.125	0.345	0.983

Таблица 8. Значения коэффициентов a и b в формуле (1) при осадке 40 мм

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности моделей свай	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации (R^2)
	a	b	
$K_{\text{э}1}$	0.348	1.125	0.984
$K_{\text{э}2}$	0.162	0.525	0.983
$K_{\text{э}3}$	0.12	0.385	0.987

Из табл. 7 и 8 видно, что показатели величины достоверности аппроксимации R^2 близки к 1,0, что свидетельствует о высокой надежности результатов, получаемых по формуле (1). Формула может быть использована для прогноза несущей способности опытных свай при известных значениях несущей способности контрольных свай.

Сопоставление значений удельной несущей способности опытных и контрольных свай позволяет выделить следующие особенности (табл. 3):

- удельная несущая способность опытных свай с увеличением пирамидального участка от 1 м до 2, 3 и 4 м повышается соответственно в 1,1, 1,29 и 1,33 раза при осадках свай 20 мм, и в 1,11, 1,26 и 1,29 раза – при осадках 40 мм;

- удельная несущая способность опытных свай больше удельной несущей способности призматической сваи с размерами сечения 20×20 см: при осадках свай 20 мм – в 1,33-1,78 раза; при осадках свай 40 мм – в 1,34-1,74 раза;

- удельная несущая способность опытных свай больше удельной несущей способности призматической сваи с размерами сечения 30×30 см: при осадках свай 20 мм – в 1,31-1,74 раза; при осадках 40 мм – в 1,41-1,83 раза;

- удельная несущая способность опытных свай меньше удельной несущей способности пирамидальной сваи с размерами сечения попереху 30×30 см и понизу – 20×20 см: при осадках свай 20 мм – в 1,11-1,48 раза; при осадках 40 мм – в 1,08-1,40 раза.

На основе представленных результатов исследований можно сформулировать следующие основные **выводы**:

- энергетические затраты на забивку пирамидально-призматических свай, а также их сопротивляемость действию вдавливающей вертикальной нагрузки зависят от длины пирамидального участка и с его увеличением повышаются;

- при одинаковой глубине погружения удельная энергоемкость забивки пирамидально-призматических свай меньше, чем у пирамидальной сваи, и может быть как меньше, так и несколько выше, чем у призматических свай (в зависимости от размеров их поперечного сечения);

- при одинаковой глубине забивки и при одинаковых осадках свай удельная несущая способность пирамидально-призматических свай выше, чем у призматических свай и меньше, чем у пирамидальной сваи.

Выявленные особенности поведения пирамидально-призматических свай обусловлены влиянием продольной формы, и длины пирамидальной части их ствола на процесс забивки и работу под нагрузкой.

Литература:

1. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Аманбай А. Оценка влияния параметров свай и штампов на их погружаемость и несущую способность фундаментных конструкций. – Тараз: Изд-во «Тараз университеті», 2014. – 146 с.
2. Патент на полезную модель Республики Казахстан №4521. Забивная железобетонная свая / И.И. Бекбасаров, Н.А. Шанишабаев. Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан: 29.11.2019г.

3. Бекбасаров И.И., Шанибаев Н.А. О расчетной оценке несущей способности забивных свай с пирамидальным участком ствола// Сб. мат. Междунар. научн. практ. конф. «IV Глобальная наука и инновации 2019: Центральная Азия». – Астана, 2019. – С. 10-15.
4. Бекбасаров И.И., Шанибаев Н.А. О несущей способности пирамидально-призматических свай// «I Международное книжное издание стран Содружества Независимых Государств «Лучший молодой ученый – 2020». – Нур-Султан, 2020. – С. 79-83.
5. Бекбасаров И.И., Атенев Е.И., Шанибаев Н.А. О лабораторном оборудовании для забивки и испытаний моделей свай// Научный журнал «Механика и технологии». – 2019. – №4. – С. 125-133.
6. ГОСТ 5686-2012 Грунты. Методы полевых испытаний сваями. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014. – 47 с.
7. МСП 5.01-101-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов. – Астана, 2007. – 109 с.

Мақалада бойлық пішіні әртүрлі қада модельдерін зертхана жағдайында соққылап қағу және статикалық сынау жұмыстарының нәтижелері баяндалған. Пирамидальды-призмалық қадаларды қағудағы меншікті энергия шығыны призмалық қадаларды қағудағы меншікті энергия шығынына қарағанда көп те, аз да болатыны анықталды. Пирамидальды қадаға қарағанда пирамидальды-призмалық қаданы қағу меншікті энергия шығыны аз. Пирамидальды-призмалық қадаларды қағудағы кететін энергетикалық шығын, сонымен қатар тік батыру жүктемесінің кедергісі пирамидальды бөліктің ұзындығына байланысты және оның ұлғаюымен артады. Қадаларды бірдей тереңдікке қағуда және бірдей шөгуде пирамидальды-призмалық қадалардың меншікті көтеру қабілеті, призмалық қадаға қарағанда жоғары, ал пирамидальды қадаға қарағанда төмен. Анықталған ерекшеліктер пирамидальды-призмалық қадалардың бойлық пішініне, діңгектің пирамидальды бөлігіне, қағу үрдісіне және қаданың жүктеме астында жұмыс істеуіне байланысты екені анықталды.

Түйін сөздер: модель, топырақ, қада, пирамидальды-призмалық қада, призмалық қада, пирамидальды қада, меншікті энергия шығыны, жүк көтеру қасиеті, меншікті жүк көтеру қасиеті, шөгуде.

The article presents the results of driving and static tests of pile models with different longitudinal shapes, carried out in laboratory conditions. It was revealed that the specific energy consumption of driving a pyramidal-prismatic pile can either exceed or be less than the specific energy consumption of driving a prismatic pile. Unlike pyramidal piles, pyramidal-prismatic piles have less specific energy consumption for driving. Energy costs for driving pyramidal-prismatic piles, as well as their resistance to pressing vertical loads depend on the length of the pyramidal section and rise with its increase. It has been established that, with the same depth of driving and with the same piles, the specific bearing capacity of the pyramidal-prismatic piles is higher than the prismatic piles and less than the pyramidal pile. The revealed features of the behavior of the pyramidal-prismatic piles are due to the influence of the longitudinal shape and the length of the pyramidal part of their shaft on the driving process and behavior under the loads.

Key words: model, soil, pile, pyramidal-prismatic pile, prismatic pile, pyramidal pile, specific energy intensity, bearing capacity, specific bearing capacity, settlement.