

И.И. Бекбасаров¹, Н.А. Шаншабаев²

¹д.т.н., профессор, ²PhD докторант,

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

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПИРАМИДАЛЬНО-ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СВАЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Аннотация. В статье изложены результаты испытаний моделей свай с разной продольной формой при действии горизонтальной нагрузки, выполненных в лабораторных условиях. Выявлено, что несущая способность пирамидально-призматических свай может быть как больше, так и меньше несущей способности призматических и пирамидальных свай. Установлено, что увеличение длины пирамидальной части сваи, а также размера ее сечения по верху оказывают существенное влияние на сопротивляемость свай горизонтальным перемещениям. Получены корреляционные зависимости, позволяющие производить оценку несущей способности пирамидально-призматических свай, относительно несущей способности свай с традиционными формами продольного сечения (призматическими и пирамидальными сваями).

Ключевые слова: модель, грунт, свая, пирамидально-призматическая свая, призматическая свая, пирамидальная свая, горизонтальная нагрузка, горизонтальное перемещение.

Изучение особенностей работы свай, обладающих нетрадиционными продольными формами (пирамидальные, ромбовидные, конусные, бипирамидальные и др.) представляет значительный интерес для геотехнической практики. Это связано с тем, что наличие наклонных боковых граней в таких сваях способствует повышению их сопротивляемости действующим нагрузкам, в том числе и горизонтальным [1].

К группе свай с наклонными боковыми гранями можно отнести и пирамидально-призматические сваи (далее – ППС), обладающие комбинированной формой, содержащей в себе как пирамидальную (верхнюю), так и призматическую (нижнюю) части [2]. Хотя справедливо отметить, что рассматриваемые сваи по продольной форме занимают промежуточное положение между пирамидальными и призматическими сваями. Эти новые свайные конструкции, разработанные в геотехнической лаборатории Таразского регионального университета им. М.Х. Дулати под опоры гидротехнических сооружений, обладают новизной, и к настоящему времени особенности их работы под нагрузкой не изучены в достаточной мере.

Результаты ранее выполненной предварительной расчетной оценки, представленные в работах [3, 4], показывают, что форма пирамидально-призматических свай оказывает существенное влияние на их несущую способность вертикальным вдавливающим нагрузкам.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных испытаний, выполненных впервые для выявления особенностей сопротивляемости различных моделей ППС при действии горизонтальной статической нагрузки.

Цель работы заключается в оценке сопротивляемости различных моделей пирамидально-призматических свай при действии горизонтальной нагрузки по результатам лабораторных испытаний.

Для достижения указанной цели в качестве задач исследований служили:

- проведение испытаний моделей ППС с разной длиной и разными размерами верха поперечного сечения пирамидального участка;
- проведение испытаний моделей пирамидальной и призматической свай;
- сравнительная оценка сопротивляемости моделей ППС и моделей свай пирамидальной и призматической форм;
- оценка влияния длины пирамидального участка и размеров верха поперечного сечения ППС на их сопротивляемость.

Методика исследований и характеристики моделей свай

Исследования проводились с использованием малых моделей свай. Масштаб моделирования принят равным 1:10. Программой исследований предусматривалось проведение трех серий испытаний. Первая серия испытаний выполнялась с применением моделей ППС, отличающихся между собой длиной пирамидального участка, вторая серия – размерами поперечного сечения верха пирамидального участка (при минимальной длине пирамидального участка) и третья серия – размерами поперечного сечения верха пирамидального участка (при максимальной длине пирамидального участка).

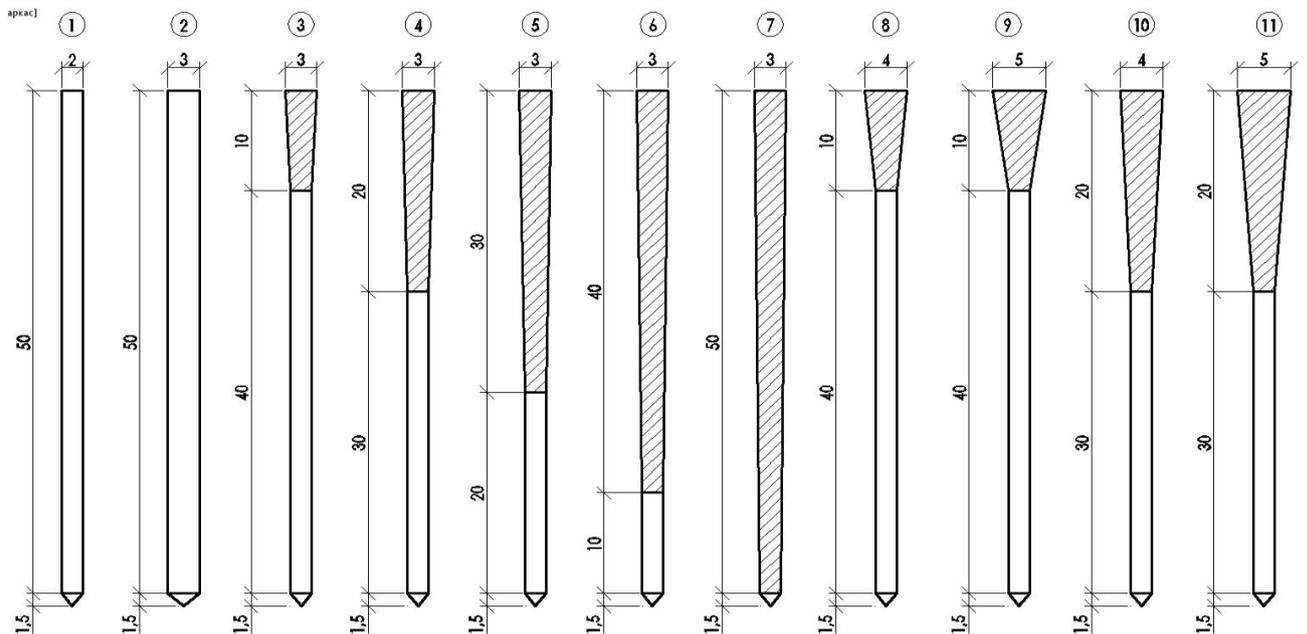
Модели свай изготовлены методом наплавления (FDM) и распечатаны на 3d принтере (StratasysLtd). Расходным материалом является пластик ABSPlus. Отклонения размеров моделей в технологическом процессе 3d-печати не превышает 0,02 мм.

Модели ППС первой серии испытаний 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.

Модели ППС второй серии испытаний изготовлены с размерами сечения: пирамидального участка поверху – 30×30 мм, 40×40 мм и 50×50 мм; пирамидального участка понизу – 20×20 мм; призматического участка – 20×20 мм. Длина пирамидального участка моделей ППС принята равным 10 см (минимальная длина, принятая в исследованиях).



a)



б)

1 – модель призматической сваи сечением 20×20 мм; 2 – модель призматической сваи сечением 30×30 мм; 3 – модель ППС размерами сечения поверху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 10 см; 4 – то же, модель с участком длиной 20 см; 5 – то же, модель с участком длиной 30 см; 6 – то же, модель с участком длиной 40 см; 7 – модель пирамидальной сваи с размерами сечения по верху 30×30 мм, понизу 20×20 мм; 8 – модель ППС размерами сечения поверху 40×40 мм и пирамидальным участком длиной 10 см; 9 – модель ППС размерами сечения поверху 50×50 мм и пирамидальным участком длиной 10 см; 10 – модель ППС размерами сечения поверху 40×40 мм и пирамидальным участком длиной 20 см; 11 – модель ППС размерами сечения поверху 50×50 мм и пирамидальным участком длиной 20 см.

Рис. 1 – Фрагменты испытаний моделей свай (а) и их схемы (б)

Модели ППС третьей серии испытаний изготовлены с размерами сечения: пирамидального участка поверху – 30×30 мм, 40×40 мм и 50×50 мм; пирамидального участка понизу – 20×20 мм; призматического участка – 20×20

мм. Длина пирамидального участка моделей ППС принята равным 20 см (максимальная длина, принятая в исследованиях).

В качестве контрольных (сравниваемых) моделей в первой серии испытаний 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 $i_p = 0,01$. Во второй и третьей сериях испытаний в качестве контрольных моделей были приняты: модель призматической сваи с размерами поперечного сечения 20×20 мм и модель призматической сваи с размерами поперечного сечения 30×30 мм.

Длина всех моделей составила 50 см. Схемы моделей свай и фрагменты их испытаний представлены на рисунке 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 песчаного грунта составили 3,35-3,85%, а плотности – 1,4-1,5 г/см³.

Статические испытания моделей свай на действие горизонтальной нагрузки выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2012 [6]. При этом горизонтальная нагрузка на модели свай прикладывалась до перемещения их головной части не менее чем на 10 мм.

Результаты исследований. Результаты испытаний моделей свай первой серии на действие горизонтальной нагрузки представлены на рисунке 2 и в таблицах 1, 2. Сравнительная оценка сопротивляемости моделей свай действию горизонтальной нагрузки выполнялась на основе коэффициента относительной эффективности моделей свай по горизонтальному перемещению K_{sp} , принятому в виде отношения несущей способности модели ППС $F_{d,sp}$ (при горизонтальном перемещении 10 мм ее головной части) к аналогичному силовому параметру контрольной модели сваи. При этом несущая способность свай устанавливалась в соответствии с требованиями строительных правил [6].

По результатам первой серии испытаний (табл. 2) установлено следующее:

- ППС по несущей способности в 1,23-1,59 раза превышает несущую способность призматической сваи с размерами сечения 20×20 мм;
- по сравнению с призматической сваей сечением 30×30 мм и пирамидальной сваей (с размерами сечения в верхней части 30×30 мм, в нижней части - 20×20 мм) несущая способность ППС на 7-33% ниже;

- увеличение длины пирамидальной части ППС в 2-4 раза приводит к повышению их несущей способности в 1,09-1,29 раза.

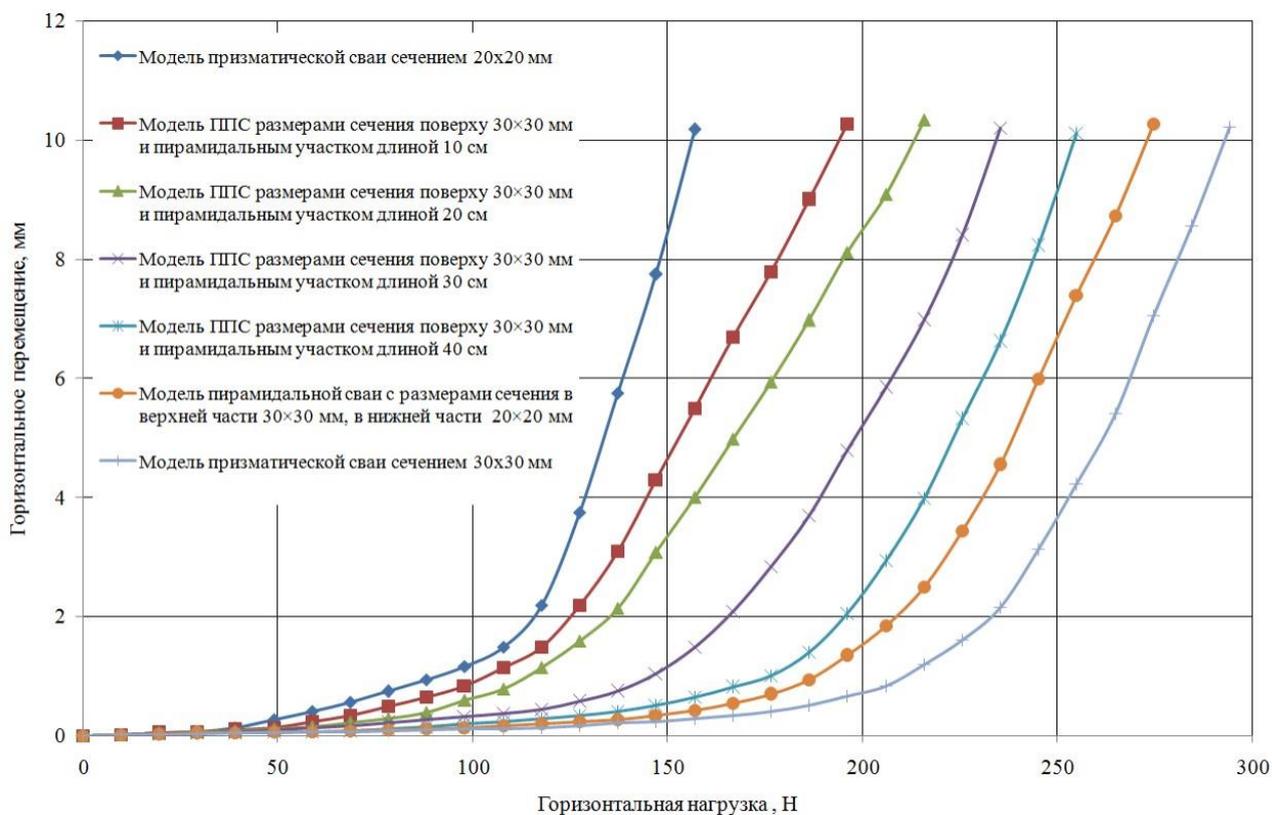


Рис. 2 – Зависимость перемещения головной части моделей свай от статической горизонтальной нагрузки (первая серия испытаний)

Таблица 1 – Значения несущей способности моделей свай $F_{d,sp}$ при горизонтальном перемещении их головы на 10 мм

№	Вид модели сваи	Несущая способность, $F_{d,sp}$, Н
1	Модель призматической сваи с размерами сечения 20×20 мм	157,0
2	Модель призматической сваи с размерами сечения 30×30 мм	293,0
3	Модель пирамидальной сваи с размерами сечения в верхней части 30×30 мм, в нижней части – 20×20 мм	273,1
4	Модель ППС с размерами сечения поперху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 10 см	194,0
5	Модель ППС с размерами сечения поперху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 20 см	213,0
6	Модель ППС с размерами сечения поперху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 30 см	234,1
7	Модель ППС с размерами сечения поперху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 40 см	255,2

Данные, представленные в таблице 2, математически описывают следующей линейной функцией

$$K_{gp} = al + v, \quad (1)$$

где l – длина пирамидального участка ППС, см; a и v – коэффициенты, принимаемые по таблице 3.

Таблица 2 – Значения коэффициентов относительной эффективности по горизонтальному перемещению

Коэффициенты относительной эффективности по горизонтальному перемещению	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с длиной пирамидального участка			
	10 см	20 см	30 см	40 см
K_{gp1}	1,23	1,34	1,47	1,59
K_{gp2}	0,67	0,73	0,80	0,87
K_{gp3}	0,72	0,78	0,86	0,93

Примечание: $K_{gp1}, K_{gp2}, K_{gp3}$ – коэффициенты, относящиеся соответственно к моделям свай призматической формы с размерами сечения 20×20 мм, свай призматической формы с размерами сечения 30×30 мм и свай пирамидальной формы с размерами сечения в верхней части 30×30 мм, в нижней части – понизу – 20×20 мм.

Таблица 3 – Значения коэффициентов a и v в формуле (1)

Коэффициенты относительной эффективности по горизонтальному перемещению	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации(R^2)
	a	v	
K_{gp1}	0,012	1,105	0.999
K_{gp2}	0,006	0,6	0.998
K_{gp3}	0,007	0,645	0.997

Результаты испытаний, представленные в таблице 2, позволяют получить следующие корреляционные зависимости

$$F_{ППС} = F_{gp1} + \Delta_F, \quad (2)$$

$$F_{ППС} = F_{gp2} - \Delta_F, \quad (3)$$

$$F_{ППС} = F_{gp3} - \Delta_F, \quad (4)$$

$$\Delta_F = \varepsilon l + \delta, \quad (5)$$

где $F_{gp1}, F_{gp2}, F_{gp3}$ – несущая способность соответственно модели свай призматической формы с размерами сечения 20×20 мм, модели свай призматической формы с размерами сечения 30×30 мм и модели свай пирамидальной формы с размерами сечения в верхней части 30×30 мм, в нижней части – понизу – 20×20 мм, Н; Δ_F – разница между значениями несущей способности опытных и контрольных свай, Н; ε и δ – коэффициенты, принимаемые по таблице 4; l – то же, что и в формуле (1).

Таблица 4 – Значения коэффициентов в формуле (5)

Величина Δ_f в формуле	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации (R^2)
	ε	δ	
(2)	2,046	15,9	0,999
(3)	-2,047	120,1	0,999
(4)	-2,047	100,2	0,999

Результаты испытаний моделей свай второй серии на действие горизонтальной нагрузки представлены на рисунке 3 и в таблицах 5 и 6.

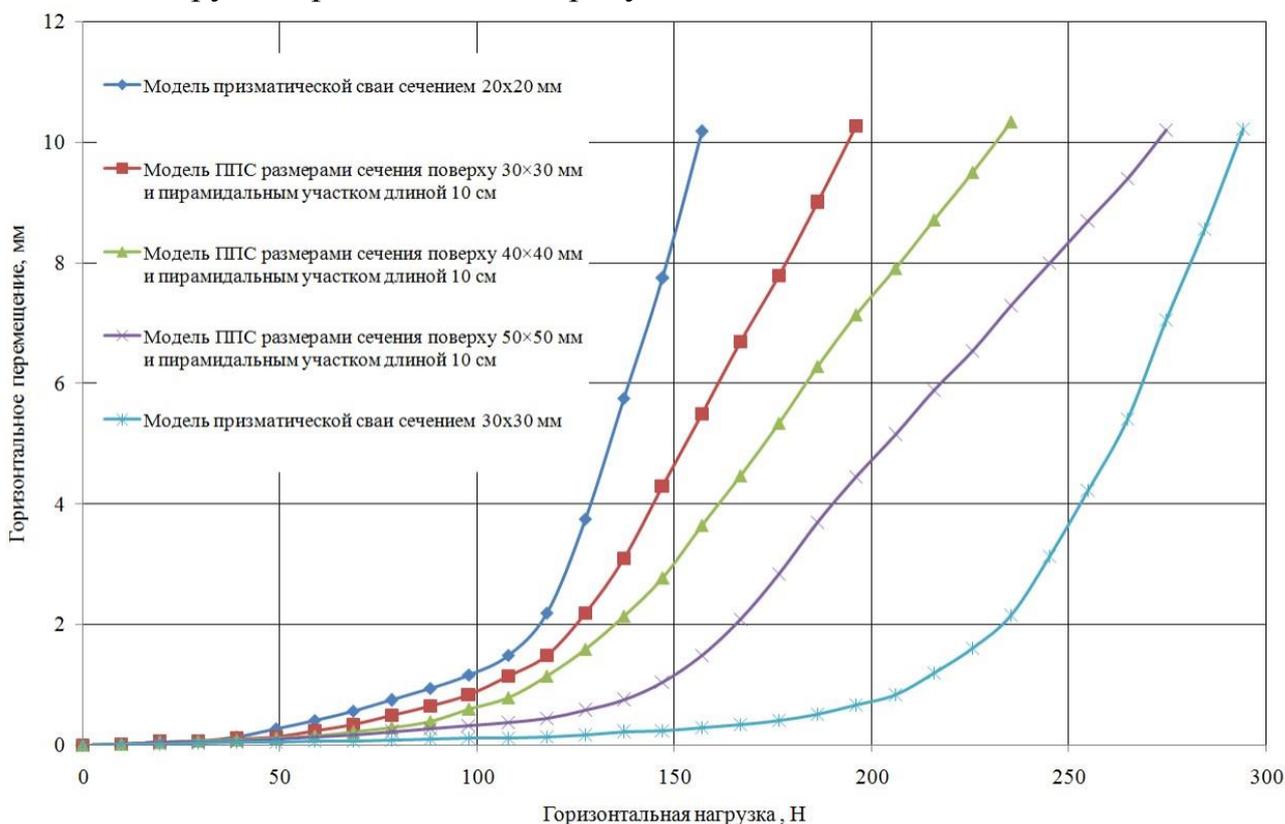


Рис. 3 – Зависимость перемещения головной части моделей свай от статической горизонтальной нагрузки (вторая серия испытаний)

Таблица 5 – Значения несущей способности моделей свай $F_{d,sp}$ при горизонтальном перемещении их головы на 10 мм

№	Вид модели сваи	Несущая способность, $F_{d,sp}$, Н
1	Модель призматической сваи с размерами сечения 20×20 мм	157,0
2	Модель призматической сваи с размерами сечения 30×30 мм	293,0
3	Модель ППС с размерами сечения поверху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 10см	194,0
4	Модель ППС с размерами сечения поверху 40×40 мм и пирамидальным участком длиной 10см	232,1
5	Модель ППС с размерами сечения поверху 50×50 мм и пирамидальным участком длиной 10см	272,5

Результаты второй серии испытаний позволяют выявить следующее:

- ППС по несущей способности в 1,22-1,70 раза превышает несущую способность призматической сваи сечением 20×20 мм;
- по сравнению с призматической свайей сечением 30×30 мм несущая способность ППС на 7-33% ниже;
- увеличение размера сечения верхней части пирамидального участка ППС в 1,33 и 1,66 вызывает увеличение их несущей способности соответственно 1,20 и 1,39 раза.

Таблица 6 – Значения коэффициентов относительной эффективности по горизонтальному перемещению

Коэффициенты относительной эффективности по горизонтальному перемещению	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с размерами пирамидального участка		
	30х30/ 20х20 (10см)	40х40/ 20х20 (10см)	50х50/ 20х20 (10см)
K_{gp1}	1,22	1,46	1,70
K_{gp2}	0,67	0,80	0,93

Примечания:

1. K_{gp1} , K_{gp2} - коэффициенты, относящиеся соответственно к моделям сваи призматической формы с размерами сечения 20×20 мм и сваи призматической формы с размерами сечения 30×30 мм;
2. Перед чертой указаны размеры поперечного сечения пирамидального участка модели сваи в верхней части, а после черты – в нижней части (в мм);
3. В скобках указана длина пирамидального участка модели сваи.

Данные, представленные в таблице 6, математически описывают следующей линейной функцией

$$K_{gp} = cd + t, \quad (6)$$

где d – размер сечения верхней части пирамидального участка, см; c и t – коэффициенты, принимаемые по таблице 7.

Таблица 7 – Значения коэффициентов c и t в формуле (6)

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности свай	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации (R^2)
	c	t	
K_{gp1}	0,24	0,5	1,0
K_{gp2}	0,13	0,28	1,0

Результаты испытаний (второй серии), представленные в таблице 6, позволяют получать следующие корреляционные зависимости

$$F_{ППС} = F_{gp1} + \Delta_F, \quad (7)$$

$$F_{ППС} = F_{gp2} - \Delta_F, \quad (8)$$

$$\Delta_F = nd + m, \quad (9)$$

где F_{gp1} , F_{gp2} , Δ_F – то же, что и формулах (2) и (3); n и m – коэффициенты, принимаемые по таблице 8; d – то же, что и в формуле (6).

Таблица 8 – Значения коэффициентов n и m в формуле (9)

Величина Δ_F в формуле	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации (R^2)
	n	m	
(7)	39,25	-81,13	0,999
(8)	-39,25	217,1	0,999

Результаты испытаний моделей свай третьей серии на действие горизонтальной нагрузки представлены на рисунке 4 и в таблицах 9 и 10.

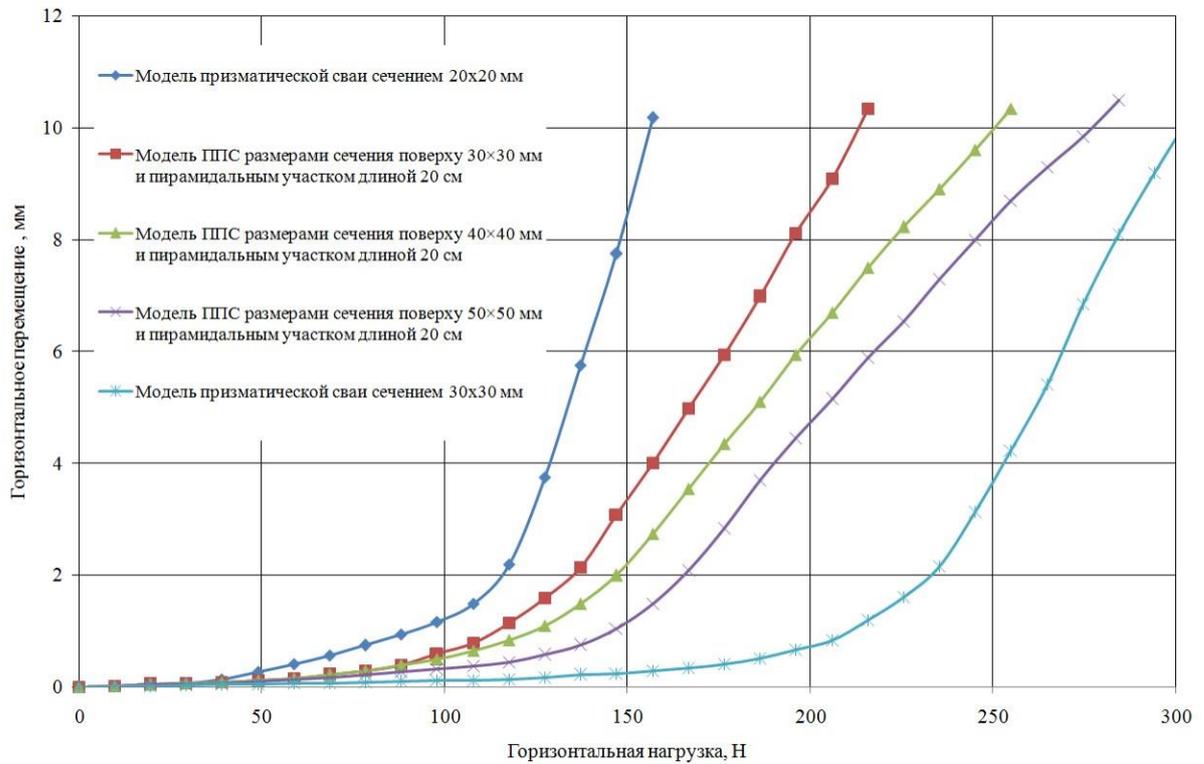


Рис. 4 – Зависимость перемещения головы моделей свай от статической горизонтальной нагрузки (третья серия испытаний)

Таблица 9 – Значения несущей способности моделей свай $F_{d,gp}$ при горизонтальном перемещении их головы на 10 мм

№	Вид модели сваи	Несущая способность, $F_{d,gp}$, Н
1	Модель призматической сваи с размерами сечения 20×20 мм	157,0
2	Модель призматической сваи с размерами сечения 30×30 мм	293,0
3	Модель ППС с размерами сечения поверху 30×30 мм и пирамидальным участком длиной 20см	213,0
4	Модель ППС с размерами сечения поверху 40×40 мм и пирамидальным участком длиной 20см	251,0
5	Модель ППС с размерами сечения поверху 50×50 мм и пирамидальным участком длиной 20см	277,5

Результаты испытаний третьей серии позволяют установить следующее:

- ППС по несущей способности в 1,34-1,73 раза превышает несущую способность призматической сваи сечением 20×20 мм;
- по сравнению с призматической свайей сечением 30×30 мм несущая способность ППС на 5-27% ниже;
- увеличение размеров сечения верхней части пирамидального участка ППС в 1,33 и 1,66 раза вызывает увеличение их несущей способностей в 1,16-1,29 раза.

Таблица 10 – Значения коэффициентов относительной эффективности по горизонтальному перемещению

Коэффициенты относительной эффективности по горизонтальному перемещению	Значения коэффициентов для опытных моделей свай с размерами пирамидального участка		
	30×30/ 20×20 (20см)	40×40/ 20×20 (20см)	50×50/ 20×20 (20см)
K_{gp1}	1,34	1,56	1,73
K_{gp2}	0,73	0,86	0,95

Примечания: K_{gp1}, K_{gp2} – коэффициенты, относящиеся соответственно к моделям свай призматической формы с размерами сечения 20×20 мм и свай призматической формы с размерами сечения 30×30 мм; 2. Перед чертой указаны размеры поперечного сечения пирамидального участка сваи в верхней части, а после черты – в нижней части (в см); 3. В скобках указана длина пирамидального участка сваи.

Данные, представленные в таблице 10, математически описывают следующей линейной функцией

$$K_{gp} = rd + f, \quad (10)$$

где K_{gp} – коэффициент относительной эффективности несущей способности ППС; d – то же, что и в формуле(9); r и f – коэффициенты, принимаемые по таблице 11.

Таблица 11 – Значения коэффициентов r и f в формуле (10)

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности свай	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации(R^2)
	r	f	
K_{gp1}	0,195	0,763	0,994
K_{gp2}	0,11	0,406	0,989

Результаты испытаний (третьей серии), представленные в таблице 10, позволяют получать следующие корреляционные зависимости

$$F_{ППС} = F_{gp1} + \Delta_F, \quad (11)$$

$$F_{ППС} = F_{gp2} - \Delta_F, \quad (12)$$

$$\Delta_F = kd + p, \quad (13)$$

где F_{gp1} , F_{gp2} , Δ_F – то же, что и формулах (7) и (8); k и p – коэффициенты, принимаемые по таблице 12; d – то же, что и в формуле (9).

Таблица 12 – Значения коэффициентов k и p в формуле (13)

Величина Δ_F в формуле	Значения коэффициентов		Величина достоверности аппроксимации(R^2)
	k	p	
(11)	32,25	-39,83	0,989
(12)	-32,25	174,8	0,989

Заключение

Представленные результаты лабораторных исследований позволяют установить следующие закономерности поведения ППС при действии на них горизонтальных статических нагрузок:

- несущая способность ППС выше несущей способности призматической сваи сечением 20×20 мм в 1,22-1,73 раза;
- сопротивляемость ППС горизонтальным перемещениям ниже сопротивляемости призматической сваи сечением 30×30 мм и пирамидальной сваи (с размерами сечения по верху 30×30 мм и по низу – 20×20 мм) на 5-33%;
- с увеличением длины пирамидальной части ППС их несущая способность возрастает в 1,09-1,29 раза;
- увеличение размера сечения в верхней части пирамидального участка ППС сопровождается повышением их сопротивляемости горизонтальным перемещениям в 1,16-1,39 раза.

Представленные корреляционные зависимости рекомендуется использовать для оценки несущей способности ППС относительно несущей способности железобетонных забивных свай с традиционными формами продольного сечения (призматических и пирамидальных свай).

Литература:

1. Готман А.Л., Соколов Л.Я. Расчет камбинированных свай переменного сечения на горизонтальную нагрузку// «Вестник ПНИИ». – 2014. – №2. – С. 79-90.
2. Патент на полезную модель Республики Казахстан №4521. Забивная железобетонная свая/ И.И. Бекбасаров, Н.А. Шаншабаев. Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан: 29.11.2019г.
3. Бекбасаров И.И., Шаншабаев Н.А. О расчетной оценке несущей способности забивных свай с пирамидальным участком ствола// Сб. мат. IV Междунар. научн. практ. конф. «Глобальная наука и инновации 2019: Центральная Азия». – Астана, 2019. – С. 10-15.
4. Бекбасаров И.И., Шаншабаев 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., Шаншабаев Н.А. О лабораторном оборудовании для забивки и испытаний моделей свай// «Механика и технологии». – 2019. – №4. – С. 125-133.

6. ГОСТ 5686-2012 Грунты. Методы полевых испытаний сваями. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014. – 47 с.

Мақалада бойлық пішіні әртүрлі қада модельдерін зертхана жағдайында жүргізілген көлденең жүктеме әсері нәтижелері баяндалған. Пирамидальды-призмалық қадалардың көтеру қасиеттері призмалық және пирамидалық қадаларға қарағанда көпте, аз да болатыны анықталды. Пирамидальды-призмалық қадалардың пирамидалық бөлігінің ұзындығы және пирамидалық бөліктің жоғарғы қимасының өлшемдері артқан сайын қаданың көлденең орын ауыстыру кедергісіне айтарлықтай әсер етеді. Пирамидальды-призмалық қадалардың дәстүрлі қадаларға (призмалы және пирамидалық қадалар) қарағанда жүк көтеру қасиеттерін анықтауға мүмкіндік беретін корреляциялық тәуелділіктер алынды.

Түйін сөздер: модель, топырақ, қада, пирамидальды-призмалық қада, призмалық қада, пирамидальды қада, көлденең жүктеме, көлденең орын ауыстыру.

The article presents the results of testing models of piles with different longitudinal shapes under the action of a horizontal load, performed in laboratory conditions. It was revealed that the bearing capacity of the pyramidal-prismatic piles can be either more or less than the bearing capacity of the prismatic and pyramidal piles. It was found that an increase in the length of the pyramidal part of the pile, as well as the size of its section at the top, have a significant effect on the resistance of the piles to horizontal displacements. Correlations dependences have been obtained that allow assessing the bearing capacity of pyramidal-prismatic piles relative to the bearing capacity of piles with traditional forms of longitudinal section (prismatic and pyramidal piles).

Key words: model, soil, pile, pyramidal-prismatic pile, prismatic pile, pyramidal pile, horizontal load, horizontal displacement.