

И.И. Бекбасаров¹, М.И. Никитенко², Е.И. Атенев¹

¹Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати,
г. Тараз, Казахстан

²Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

УДАРНАЯ ПОГРУЖАЕМОСТЬ СВАЙ С УШИРЕНИЯМИ СТВОЛА И ИХ СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ВДАВЛИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

Аннотация. Изложены результаты экспериментов, выполненных с применением крупномасштабных моделей железобетонных забивных свай с несколькими плоскими пирамидальными уширениями ствола в полевых условиях. Оценена ударная погружаемость и несущая способность свай действию вдавливающей нагрузки. Установлено, что сваи с уширениями ствола обладают большими (на 5,88 - 39,74%), так и меньшими (на 3,13 - 23,46%) затратами энергии на их погружение по сравнению с обычными призматическими и пирамидальными сваями. Выявлено увеличение несущей способности исследуемых свай на 11,73-29,88% в зависимости от количества их уширений по стволу. Результаты выполненной работы представляют интерес для специалистов для выработки обоснованных предложений по расчету и проектированию рассматриваемых свай.

Ключевые слова: модель, свая с уширениями, грунт, забивка, испытание, нагрузка, осадка, несущая способность.

• • •

Түйіндеме. Мақалада діңгепнің бірнеше жалпақ пирамидалық кеңейтілген бөліктері бар қағылмалы темірбетон қадалардың ірі масштабтағы модельдерін пайдалана отырып, далалық жағдайда жүргізілген эксперименттер нәтижелері баяндалған. Қадаларды соққылап қағу және оларды батыру кезіндегі жүк кетеру қабілеті салыстырмалы бағаланған. Діңгегі кеңейтілген қадаларды қағу кезіндегі энергия шығыны қарапайым призмалық және пирамидалық қадалармен салыстырғанда 5,88-39,74% артық және 3,13-23,46% кем болатыны анықталды. Діңгегі кеңейтілген қадалардың анықталған жоғары керсеткіштері оларды қағу кезіндегі топырақтың тиімді тығыздалуымен және еңіс беткейлерінің астындағы топырақтың қарсылық әрекет ету күшінің туындауымен түсіндіріледі. Орындалған жұмыс нәтижелері қарастырылып отырған қадаларды есептеу және жобалау бойынша нақтыланған ұсыныстар дайындау үшін маңызды болып табылады.

Түйінді сөздер: модель, діңгегі кеңейтілген қадалар, топырақ, қағу, сынақ, жүктеме, шегу, жүк кетеру қабілеті.

• • •

Abstract. The article sets forth the results of experiments performed using large-scale models of reinforced concrete driven piles with several flat pyramidal broadening of the shaft in the field conditions. Impact immersion and bearing capacity of piles to the effect of pressing load are estimated. It has been established that piles with broadening of the shaft have greater (by 5.88 - 39.74%) and lesser (by 3.13 - 23.46%) energy consumptions for their immersion compared to conventional prismatic and pyramidal piles. Favourable advantage in the performance of piles with broadening of the shaft compared to traditional piles is due to the effective compaction and significant manifestation of the forces of soil repulsion under the inclined faces of each broadening of the pile during their interaction with the ground. The results of the study may be interesting to specialists for the development of reasonable proposals for the calculation and design of piles with the broadening of the shaft.

Keywords: model, pile with broadening, soil, driving, testing, load, settlement, bearing capacity.

Введение. В области свайного фундаментостроения наряду с традиционными призматическими сваями достаточно широко используются сваи с иной необычной продольной формой ствола [1-11]. Одним из разновидностей таких свайных конструкций являются сваи с уширением ствола в верхней части [1-7,9] и с уширением у острия [8-10]. Форма уширений ствола свай принимается пирамидальной, цилиндрической, спунчатопризматической, пирамидально-призматической и др. Результаты исследований, представленные в работах [1-7,9] свидетельствуют о том, что наличие уширения в верхней части сваи обеспечивает эффективное уплотнение слабых грунтов, залегающих у дневной поверхности толщи, и тем самым вызывает повышение несущей способности сваи в 1,1-5,0 раза. При этом несущая способность свай зависит от вида и состояния грунтов, а также от формы и размеров уширения.

Наличие уширения у острия при забивке сваи приводит к образованию уплотненного грунтового ядра под ее нижним концом. Это в свою очередь позволяет вовлекать в работу сваи больший объем грунтовой толщи [8-10], что обеспечивает увеличение лобового сопротивления толщи внедрению острия сваи. В результате существенно повышается общая несущая способность сваи. Представленные результаты исследований, относятся к сваям, имеющим лишь одно уширение, расположенное либо в верхней, либо в нижней части ствола. Следовательно эти данные не могут быть распространены на

сваи, обладающие несколькими уширениями по стволу [12-14]. Сваи с несколькими плоскими пирамидальными уширениями по стволу, разработанные в ТарГУ им. М.Х. Дулати, в настоящее время исследованы, в основном, только теоретически, на основе серии численных экспериментов. Поэтому экспериментальное изучение особенностей их погружаемости и сопротивляемости в полевых условиях представляет актуальный интерес для специалистов для выработки обоснованных предложений по расчету и проектированию рассматриваемых свай. **Целью работы** - оценка энергоемкости забивки (погружаемости) и несущей способности свай с плоскими пирамидальными уширениями ствола на крупномасштабных моделях в полевых условиях.

Характеристика моделей свай, оборудования и методика исследований. Модели свай изготовлены сплошными цельными из железобетона с ненапрягаемой арматурой и поперечным армированием ствола. Масштаб моделей (далее – сваи) принят 1:3. Опытные сваи изготовлены с количеством уширений от 1 до 4 (рисунок 1).

Для сравнения результатов исследований в качестве контрольных свай приняты три модели: призматическая свая с размерами поперечного сечения 6,7×6,7 см, призматическая свая с размерами поперечного сечения 10,0×10,0 см, и пирамидальная свая с размерами сечения в верхней части 10,0×10,0 см, нижней части – 6,7×6,7 см. Уклон боковых граней пирамидальной сваи к вертикали составил $i_p = 0,01$. Геометрические параметры и вес свай приведены в таблице 1.

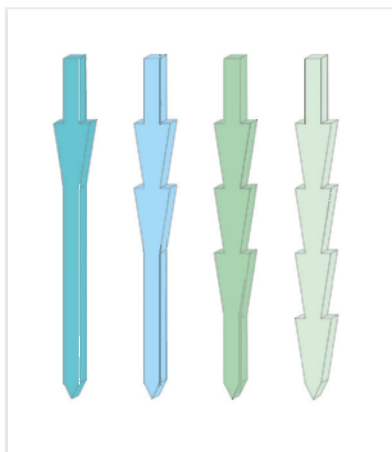


Рисунок 1 – Схемы свай с плоскими пирамидальными уширениями

Таблица 1 – Геометрические параметры и вес свай

Вид свай	Геометрические параметры, см				Вес свай, Н
	длина ствола (острия)	размеры поперечного сечения ствола	ширина уширения	высота уширения	
Экспериментальные:					209,93
- с 1 уширением;	166,7 (5,0)	6,7×6,7	15,0	33,3	226,61
- с 2 уширениями;					242,31
- с 3 уширениями;					258,0
- с 4 уширениями.					
Контрольные:					
- призматическая;		6,7×6,7			180,50
- призматическая;	166,7 (5,0)	10,0×10,0	-	-	386,51
- пирамидальная		10,0×10,0/ 6,7×6,7			258,0

Примечание: перед чертой указаны размеры поперечного сечения в верхней части, после черты – в нижней части.

Полевые испытания проводились на полигоне производственной базы Южно-Казахстанского филиала предприятия «КазНИИСА». Опытная площадка, с размерами в плане 6,0×3,0 м и глубиной 3,0 м, была сложена песчанистой супесью. Подготовка площадки включала в себя послойную укладку и равномерное уплотнение грунта со дна предварительно отрытого котлована. Физико-механические характеристики грунта устанавливались методом пенетрации с использованием прибора ПСГ МГ-4 (таблица 2).

Таблица 2 – Физико-механические характеристики грунта опытной площадки

Характеристики	Значения
Влажность, W , %	3,16-5,58
Плотность, ρ , кг/м ³	1400-1670
Влажность на границе текучести, $W_{m'}$, %	24,18-24,37
Влажность на границе раскатывания, W_p , %	17,30-17,47
Число пластичности, I_p	6,88-6,90
Максимальное сопротивление пенетрации, P_{max} , МПа	1,47-1,62
Коэффициент уплотнения, K	0,89-0,94

Индекс (степень) влажности, I	0,75-0,84
Модуль деформации, E , МПа	31,6-33,6
Угол внутреннего трения, f , град	17,1-17,6
Удельное сцепление, c , МПа	0,018-0,019

Для выполнения исследований было разработано и изготовлено специальное экспериментальное оборудование (рисунок 2). Параметры, принципы и последовательность проведения работ с применением данного оборудования представлены в работе [14]. Сваи погружались в грунт путем их забивки при постоянной энергии каждого удара. Ударник массой 40 кг сбрасывался с высоты 0,5 м. Глубина погружения свай составила 141,2-145,6 см (максимальная разница составила 3,02%).



Рисунок 2 – Фрагменты забивки и испытания свай на полигоне

Испытания свай для оценки их несущей способности проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2012. «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» путем ступенчато-возрастающего нагружения свай вдавливающей статической нагрузкой с обеспечением требуемой условной стабилизации их осадок. Силовая нагрузка каждой сваи выполнялась до осадок не менее 40 мм. Несущая способность свай определялась в соответствии с требованиями МСП 5.01-101-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов».

Результаты исследований. Сведения о количестве ударов по сваям, энергетических затратах ударника на их забивку, а также глубина и объем погруженной части свай представлены в таблице 3. Ходограммы погружения свай приведены на рисунке 3.

Таблица 3 – Результаты забивки свай

Вид сваи	Полная энергия ударов, затраченная на забивку, E , Дж (количество ударов)	Глубина погружения, L , см	Объем погруженной части, V , см ³	Удельная энергоёмкость забивки, E_v , Дж/см ³
Свая 1 уширением	12164,4 (62)	145,0	7314,4	1,663
То же с 2 уширениями	13341,6 (68)	145,2	8240,94	1,619
То же с 3 уширениями	14518,8 (74)	145,4	9167,5	1,584
То же с 4 уширениями	15303,6 (78)	145,6	10094,04	1,516
Призматическая свая с размерами сечения 6,7×6,7 см	9221,4 (47)	141,2	6188,09	1,490
Призматическая свая с размерами сечения 10,0×10,0 см	15892,2 (81)	144,3	14703,9	1,081
Пирамидальная свая	12556,8 (64)	145,3	9251,54	1,357

Примечание – удельная энергоёмкость забивки представляет собой отношение суммы потенциальной энергии всех ударов по свае к объёму ее погруженной части.

Оценка энергоёмкости забивки свай производилась на основе следующих показателей:

- удельной энергоёмкости забивки E_v , принятой в виде отношения полной потенциальной энергии ударов ударника, затраченной на забивку сваи, к объёму ее погруженной части в грунт (таблица 3);

- коэффициента относительной энергоёмкости забивки $K_э$, принятого в виде отношения полной потенциальной энергии ударов ударника, затраченной на забивку опытной сваи к аналогичному энергетиче-

ческому параметру контрольной сваи (таблица 4).

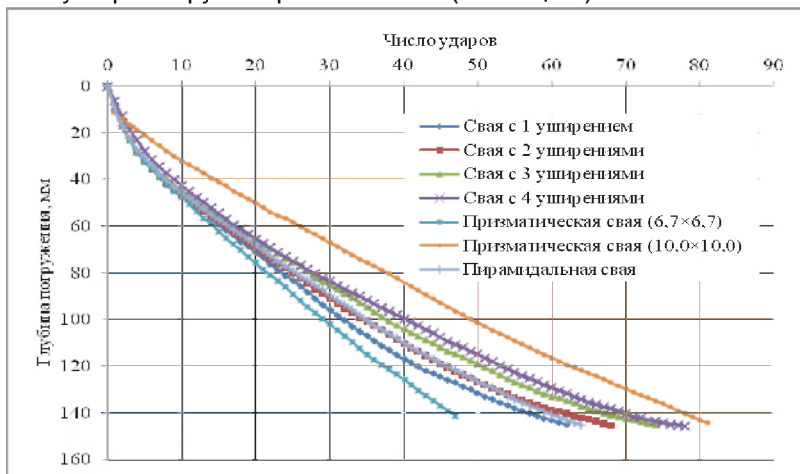


Рисунок 3 – Ходограммы погружения свай

Таблица 4 – Значения коэффициентов относительной энергоёмкости забивки свай K_z

Коэффициенты относительной энергоёмкости забивки свай	Значения коэффициентов для опытных свай с количеством уширений			
	1	2	3	4
K_{z1}	1,32	1,45	1,57	1,66
K_{z2}	0,77	0,84	0,91	0,96
K_{z3}	0,97	1,06	1,16	1,22

Примечание: K_{z1} , K_{z2} и K_{z3} – коэффициенты, относящиеся соответственно к свае призматической формы с размерами сечения 6,7×6,7 см, свае призматической формы с размерами сечения 10,0×10,0 см и свае пирамидальной формы.

Результаты исследований позволяют выделить следующие особенности процесса забивки опытных свай:

- в зависимости от количества уширений при одинаковой глубине погружения опытные сваи по сравнению с призматическими и пирамидальными сваями могут обладать как большими (в 1,06-1,66 раза), так и меньшими (на 3,13-23,46%) затратами энергии на забивку;

- затраты энергии на погружение 1 м³ свай с уширением ствола в 1,02-1,54 раза больше, чем для свай призматической и пирамидальной форм;

- с увеличением количества уширений в сваях энергетические затраты на их забивку на одинаковую глубину увеличиваются в 1,1-1,26 раза.

Результаты статических испытаний свай представлены на рисунке 4 и в таблице 5.

Таблица 5 – Несущая способность свай по результатам их статических испытаний

Вид сваи	Несущая способность, F_d , Н, при осадке		Удельная несущая способность, F_d^V , Н/см ³ , при осадке	
	20 мм	40 мм	20 мм	40 мм
Свая с 1 уширением	5915	7395	0,809	1,011
То же с 2 уширениями	6385	7860	0,775	0,954
То же с 3 уширениями	7215	8615	0,787	0,940
То же с 4 уширениями	8435	9760	0,836	0,967
Призматическая свая с размерами сечения 6,7×6,7 см	5410	6685	0,874	1,080
Призматическая свая с размерами сечения 10,0×10,0 см	6855	8055	0,466	0,548
Пирамидальная свая	8355	9390	0,903	1,015

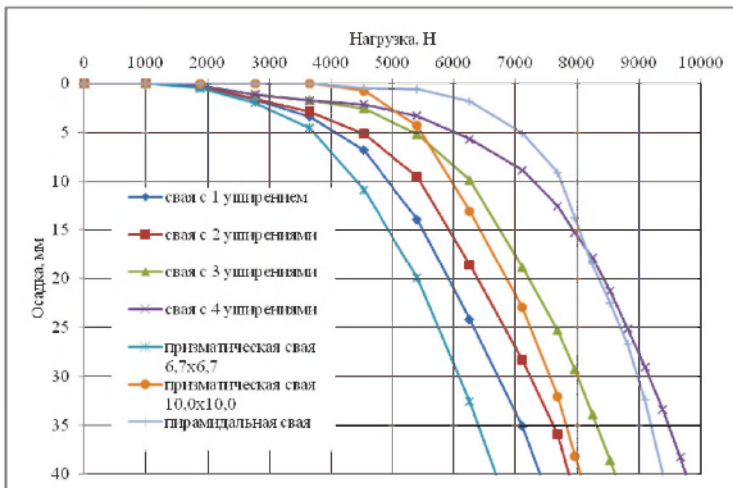


Рисунок 4 – Зависимость осадки свай от вдавливающей статической нагрузки

Оценка сопротивляемости свай действию вдавливающей нагрузки выполнялась на основе показателей:

- несущей способности F_d , устанавливаемой с учетом требований МСП 5.01-101-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» (таблица 5);

- удельной несущей способности F_d^V , принятой в виде отношения несущей способности сваи к объему ее погруженной части в грунт (таблица 5);

- коэффициенту относительной эффективности свай по несущей способности K_H , принятому в виде отношения несущей способности опытной сваи к аналогичному силовому параметру контрольной сваи (таблицы 6,7).

Таблица 6 – Значения коэффициентов относительной эффективности свай по несущей способности K_H при осадке 20 мм

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности свай	Значения коэффициентов для опытных свай с количеством уширений			
	1	2	3	4
K_{H1}	1,09	1,18	1,33	1,56
K_{H2}	0,86	0,93	1,05	1,23
K_{H3}	0,71	0,76	0,86	1,01

Примечание: K_{H1} , K_{H2} и K_{H3} – коэффициенты, относящиеся соответственно к свае призматической формы с размерами сечения 6,7×6,7 см, свае призматической формы с размерами сечения 10,0×10,0 см и свае пирамидальной формы.

Таблица 7 – Значения коэффициентов относительной эффективности свай по несущей способности K_H при осадке 40 мм

Коэффициенты относительной эффективности несущей способности свай	Значения коэффициентов для опытных свай с количеством уширений			
	1	2	3	4
K_{H1}	1,11	1,18	1,29	1,46
K_{H2}	0,92	0,98	1,07	1,21
K_{H3}	0,79	0,84	0,92	1,04

Результаты статических испытаний свай позволяют установить следующие особенности работы опытных свай (при одинаковых осадках):

- по сравнению со сваей призматической формы малого поперечного сечения (сечения 20×20 см с учетом масштаба моделирова-

ния) сваи с уширениями обладают большей несущей способностью (в 1,09-1,56 раза);

- по сравнению со сваей призматической формы обычного сечения (сечения 30×30 см с учетом масштаба моделирования) сваи с 1 и 2 уширениями обладают меньшей (на 2,42-13,71%), а сваи с 3 и 4 уширениями – большей (в 1,05-1,23 раза) несущей способностью;

- по сравнению с пирамидальной сваей (с размерами по верху 30×30 см и понизу – 20×20 см) сваи с 1,2 и 3 уширениями обладают меньшей (на 8,25-29,2%), а свая с 4 уширениями – большей (в 1,01-1,04 раза) несущей способностью;

- с увеличением количества уширений несущая способность опытных свай (при одинаковых значениях осадок) увеличивается в 1,06-1,43 раза.

Выводы. На основе результатов экспериментальных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

- с увеличением количества уширений повышаются энергетические затраты на погружение свай с уширением ствола, а также увеличивается их несущая способность (удельная несущая способность) при действии сжимающих нагрузок;

- в зависимости от количества уширений сваи с уширениями по сравнению с призматическими и пирамидальными сваями обладают как большей, так и меньшей несущей способностью (удельной несущей способностью).

Более высокие показатели работы свай с уширениями ствола, в отличие от сравниваемых (традиционных) свай, на наш взгляд, обусловлены более эффективным уплотнением и более сильным проявлением сил отпора грунта под наклонными гранями каждого уширения сваи при их внедрении в грунтовую толщу.

Список литературы

1 Сесюнин С.Г., Леви С.Р., Потапов А.Д. Выбор оптимальной конструкции железобетонной забивной сваи для пучинистого грунта // Вестник МГСУ. – 2009. – №3. – С.167-172.

2 Буслов А.С., Бакулина А.А. Влияние кольцевого уширения на несущую способность горизонтально нагруженной моносвайной опоры // Вестник МГСУ. – 2012. – №4. – С.63-68.

3 Бекбасаров И.И., Байтелиев Р.Т., Шилибеков С.К., Исаков Г.И. Новые перспективные ресурсосберегающие свайные конструкции // Вестник ПНИПУ «Строительство и архитектура». – 2014. – №4. – С.81-92.

4 Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Аманбай А. Погружаемость и энер-

гоемкость забивки свай и штампов. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT AcademicPublishing, 2014. – 199 с.

5 *Соколов Л.Я.* Рациональная форма односвайного фундамента под колонны промышленных зданий и сооружений // Известия КГАСУ. – 2014. – №1(27). – С.131-139.

6 *Купчикова Н.В.* Предложения по дополнению классификации конструкций готовых и набивных свай с уширениями вверху наклонными боковыми сваями // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский инженерно-строительный институт. – 2015. – № 1 (11). – С.25-35.

7 *Исаев В.И., Мальцев А.В., Карпов А.А.* Исследование возможности увеличения несущей способности короткой забивной сваи за счет устройства уширения в верхней части // Градостроительство и архитектура. – 2016. – №4(25). – С.30-35.

8 *Седин В.Л., Швец В.Б., Алексеев А.И., Захваткин М.П., Бикус К.М.* Опыт исследования работы свай различной формы в условиях слабых грунтов // До 80-річчя Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – №9. – С.35-40.

9 *Буслов А.С., Моховиков Е.С.* Несущая способность горизонтально нагруженной одиночной свайной опоры с лежнями // Вестник МГСУ. – 2015. – №9. – С.51-60.

10 *Купчикова Н.В.* Формообразование концевых уширений свай в поперечном сечении, и методика их деформационного расчета // Геотехника: Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 1 (48). – С.88-96.

11 *Бекбасаров И.И.* Об учете формы нижнего конца сваи при оценке энергоемкости ее забивки и несущей способности // Новости науки Казахстана. Научно-технический журнал – 2018. – №4 (138). – С.166-178.

12 *Бекбасаров И.И., Атенев Е.И.* О несущей способности забивных свай с плоскими уширениями ствола // Материалы МНП конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве», посвященной Году Узбекистана в Казахстане. – Алматы: КазГАСА, 2018. – С.123-128.

13 *Бекбасаров И.И., Атенев Е.И.* Сравнительная оценка несущей способности свай с разной продольной формой // Материалы XIII МНК молодых ученых «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане», том II. – Тараз: Тараз университет, 2019. – С.24-25.

14 *Бекбасаров И.И., Байтемиров М.Н., Атенев Е.И., Шаншабаев Н.А.* Об экспериментальном оборудовании для забивки и испытаний крупномасштабных моделей свай в полевых условиях // Механика и технологии. Научный журнал – 2019. – №4. – С.134-141.

Бекбасаров И.И., доктор технических наук, профессор, e-mail: bekbasarov.isabai@mail.ru

Никитенко М.И., доктор технических наук, профессор, e-mail: michnikit@gmail.com

Атенев Е.И., PhD докторант, e-mail: yer_at@mail.ru,