

И.И. Бекбасаров¹

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

ОБ УЧЕТЕ ФОРМЫ НИЖНЕГО КОНЦА СВАИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ЕЕ ЗАБИВКИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Аннотация. Для оценки влияния формы нижнего конца свай проведены лабораторные исследования с применением моделей свай без острия, с закругленной нижней частью, с пирамидальным острием, а также с клиновидным острием при различных углах заострения. Первая серия опытов предусматривала забивку моделей одинаковым количеством ударов, а вторая серия – забивку моделей на одинаковую глубину. Для оценки несущей способности моделей использован метод динамических испытаний. Установлено, что форма нижнего конца и угол заострения моделей оказывают влияние на их глубину погружения, энергоемкость забивки и несущую способность. На основе результатов испытаний получены зависимости, позволяющие учитывать влияние формы острия и угла заострения свай на их удельную энергоемкость забивки и несущую способность. Формулы рекомендуется использовать при выборе свай на стадии проектирования свайных фундаментов под здания и сооружения. В отечественной и зарубежной геотехнической практике учет влияния формы нижнего конца свай на их параметры не производится.

Ключевые слова: свая, модель, острие, грунт, лоток, удар, глубина погружения, удельная энергоемкость, несущая способность.

• • •

Түйіндеме. Қаданың төменгі ұшының пішінінің әсерін бағалау үшін ұшы жоқ, ұшы доғалданған, ұшы пирамида пішіндес, сондай-ақ ұшы сына төріздес ұшталу бұрыштары әртүрлі қадалар модельдері пайдаланыла отырып, зертханалық зерттеулер жасалған. Тәжірибе жұмыстарының алғашқы сериясында модельдерді бірдей соққылар санымен, ал екінші сериясында – бірдей тереңдікке қағу қарастырылды. Модельдердің жүк көтеру қабілетін бағалау үшін динамикалық сынау әдісі қолданылды. Модельдердің төменгі ұшының пішіні мен ұшталу бұрышының олардың қағылу тереңдігіне, қағудың энергия сыйымдылығына және жүк көтергіш қабілеттеріне әсері анықталды. Зерттеу жұмыс-

тарының нәтижелеріне сүйене отырып, қада модельдері ұшының пішіні мен ұшталу бұрышының меншікті энергия сыйымдылығы және жүк көтергіш қабілетіне өсерін ескеруге мүмкіндік беретін тәуелділіктер алынды. Формулаларды ғимараттар мен құрылымдардың қадалы іргетастарын жобалау барысында қадаларды таңдау үшін қолдануға кеңес беріледі. Отандық және шетелдік геотехника тәжірибесінде қадалар ұшы пішінінің олардың параметрлеріне өсері ескерілмейді.

Түйінді сөздер: қада, модель, ұшы, топырақ, науа, соққы, ену тереңдігі, меншікті энергия сыйымдылығы, жүк көтеру қабілеті.

• • •

Abstract. To assess the effect of the shape of the lower end of the piles, laboratory studies were carried out using models of piles without a point, with a rounded bottom, with a pyramidal point, and also with a wedge-shaped point at different taper angles. The first series of experiments provided for driving models with the same number of strokes, and the second series - driving the models to the same depth. To evaluate the bearing capacity of models, the method of dynamic tests is used. It is established that the shape of the lower end and the angle of sharpening of the models affect their depth of immersion, energy-punching and bearing capacity. On the basis of the test results, the dependences obtained allowing one to take into account the influence of the shape of the tip and the angle of sharpening of the piles on their specific energy capacity of piling and bearing capacity. Formulas are recommended to use when selecting piles at the design stage of pile foundations for buildings and structures. In domestic and foreign geotechnical practice, the influence of the shape of the lower end of the piles on their parameters is not taken into account.

Keywords: pile, model, tip, ground, tray, impact, depth of immersion, specific energy intensity, bearing capacity.

Введение. Влияние угла заострения и формы нижнего конца забивных свай на их поведение в грунтах интересовал специалистов-геотехников давно [1-3]. Так В.П. Буровым и Б.В. Гончаровым изучались вопросы влияния угла заострения сваи на усилие ее вдавливания в грунт, а также на формирование уплотненного ядра под острием сваи [1]. Опыты проводились в лабораторных и полевых условиях с применением свай малых размеров без острия и с острием при углах заострения от 15° до 90°. Установлено, что угол заострения сваи оказывает существенное влияние на форму и размеры уплотненной зоны, которая формируется под нижним концом сваи. Выявлено, что

в глинистых грунтах для свай без острия и свай с углом заострения 90° усилия их вдавливания в грунты примерно одинаковы. При уменьшении угла заострения свай от 90° до 60° усилия вдавливания уменьшаются на 5-10%. Дальнейшее уменьшение угла заострения до 30° сопровождается снижением усилий вдавливания на 15-20%. Причем характерно, что при больших скоростях вдавливания свай снижение усилий вдавливания проявляется в более резкой форме.

Ф.К. Лапшиным установлено, что форма и размеры зон пластических деформаций в грунте под нижним концом моделей свай при их статическом нагружении зависят от наличия острия модели и угла его заострения [2]. Для количественного подтверждения этого вывода, в данном исследовании, была произведена дополнительная обработка экспериментальных данных автора. Так из таблицы 1 видно, что для моделей свай с разными углами заострения характерны разные формы и разные размеры зон деформирования грунта под их нижними концами. Неодинаковость этих параметров позволяет предполагать, что неодинаковой должна быть и несущая способность рассматриваемых моделей. Но, к сожалению, сведения, подтверждающие данное предположение, в рассматриваемой работе отсутствуют.

Таблица 1- Результаты обработки данных, представленных в работе [2]

Форма и параметры зоны деформации под нижним концом модели сваи	Модель без острия	Модель сваи с острием при угле заострения		
		90°	60°	30°
Форма	в виде усеченного эллипсоида, вытянутого в поперечном направлении	шарообразная	эллипсоидообразная, вытянутая в вертикальном направлении	каплевидная
Высота	1,0 d	1,17 d	1,8 d	2,67 d
Максимальная ширина	1,5 d	1,5 d	2,0 d	1,82 d
Расстояние от нижней границы зоны до нижнего конца модели	1,0 d	0,66 d	0,93 d	0,43 d

Примечание: d – размер поперечного сечения модели сваи.

Кроме того, Г.С. Колесником, И.Б. Рыжковым, В.М. Еникеевым и С.Н. Назаровым на четырех площадках г. Уфы была произведена забивка 29 свай с острием и 30 свай без острия, длиной от 6 до 20 м [3]. Результаты забивки оценивались по количеству ударов молотов, затраченных на погружение свай на одинаковую глубину. На основе результатов исследований сделан вывод о том, что в глинистых грунтах отсутствие острия не вызывает увеличения энергоемкости погружения свай. Хотя, из графиков погружения свай, представленных авторами, следует, что при глубине забивки более 14 м (на площадке №4), сваи без острия требуют большего количества ударов молота [3]. Аналогичная закономерность наблюдается и на площадке №3 при глубине забивки свай более 5 м [3]. Кроме того, следует отметить, что количество ударов молота, может выступать в качестве достоверного энергетического параметра забивки свай только при постоянной высоте сбрасывания ударной части молота. Учитывая, что часть свай погружалась дизель-молотами (высота подъема ударной части которых при работе непостоянна) к результатам рассматриваемых исследований нужно относиться с некоторой осторожностью. Эти сомнения усугубляются еще и естественной неоднородностью грунтов площадок, которая не могла не оказать своего отрицательного влияния на результаты забивки сравниваемых свай.

Изложенные результаты исследований показывают, что однозначного мнения по рассматриваемому вопросу среди ученых не существует. Поэтому при изучении, оценке и моделировании работы свай в современной постановке форма их нижнего конца в качестве влияющего фактора специалистами не рассматривается [4-6]. Сложившаяся ситуация, обусловлена тем, что до настоящего времени не были проведены специальные исследования по комплексному изучению влияния формы нижнего конца свай на их энергетические и силовые параметры в условиях исключающих воздействие побочных факторов и обеспечивающих высокую точность измеряемых параметров.

Исходя из представленных доводов, была сформулирована цель исследования, которая состояла в сравнительной оценке погружаемости, энергоемкость забивки и несущей способности свай с разной формой нижнего конца в одинаковых грунтовых условиях, при одинаковых параметрах забивки и единой методике испытаний. Достижение поставленной цели обеспечивалось путем использования метода моделирования свай, соответствующего, указанным критериям исследований.

Характеристика моделей свай, лабораторного оборудования и методика исследований. Исследования проводились с применением деревянных моделей призматических свай с размерами поперечного

сечения 30×30 мм и общей длиной 325 мм. В опытах использовались 6 моделей с 4-мя формами острия (таблица 2). Для расширения диапазона исследований, кроме моделей без острия и с пирамидальным острием в экспериментах использовались модели с нетрадиционной формой нижней части, а именно модели с клиновидным острием и модель с закругленным нижним концом (модель с полуэллипсоидной формой острия).

Таблица 2 - Модели свай и их параметры

Номер (наименование) модели сваи	Длина модели без острия / высота острия, мм	Общий объем модели, см ³	Масса модели, г
1 (модель с закругленным острием – острием полуэллипсоидной формы)	305/20	283,92	115,0
2 (модель с пирамидальным острием)	300/25	277,5	117,4
3 (модель без острия или с плоским нижним концом)	325/0	292,5	116,3
4 (модель с клиновидным острием и углом заострения 30°)	269/56	267,3	114,5
5 (модель с клиновидным острием и углом заострения 60°)	299/26	280,8	116,8
6 (модель с клиновидным острием и углом заострения 90°)	310/15	285,75	119,2

Исследования проводились в прямоугольном лотке с размерами в плане 55×153 см и глубиной 80 см. В качестве грунта использовался суглинок, уложенный в лоток послойно с уплотнением. До укладки суглинок был измельчен и пропущен через сито диаметром 1 мм. В процессе укладки суглинка осуществлялся контроль его плотности и влажности. Плотность грунта проверялась с применением микропенетрационного метода. Пенетрационные испытания проводились в соответствии с требованиями РДС [7] с применением усовершенствованного микропенетromетра [8]. Физические характеристики грунта представлены в таблица 3.

Таблица 3 - Физические характеристики грунта

Влажность на границе текучести W_L	Влажность на границе раскатывания W_p	Влажность, W , %	Плотность, ρ , т/м ³	Плотность грунта в сухом состоянии, т/м ³	Коэффициент пористости e
26,71	17,5	15,67-15,98	1,46-1,49	1,26-1,28	1,12-1,15

Забивка моделей производилась с применением навесного приспособления, обеспечивающего нанесение ударов по модели сваи цилиндрическим элементом, перемещаемым по направляющему стержню [8]. Ударник имел сквозное центральное отверстие, посредством которого осуществлялось перемещение ударника по поверхности направляющего стержня. Нижний конец направляющего стержня вставлялся в выемку в голове модели, что обеспечивало строгую соосность и вертикальность ударов при забивке модели. Масса ударного элемента составляла 2,5 кг.

Исследования включали в себя две серии испытаний. В первой серии испытаний модели погружались одинаковым количеством ударов, равным 20. Во второй серии модели забивались на одинаковую глубину (при разном количестве ударов). Высота сбрасывания ударника в обоих случаях принималась равной 15,0 см. В процессе забивки при каждом ударе измерялся остаточный отказ моделей при помощи индикатора часового типа с точностью до $\pm 0,01$ мм.

Несущая способность моделей определялась путем проведения их динамических испытаний на основе метода, внедренного в практику научных исследований [8]. Динамические испытания состояли в нанесении по модели 3-х ударов с постоянной высоты через 10 сут. после забивки. Средняя величина отказа модели (от залога в три удара) S_p использовалась для расчета силы динамического сопротивления грунта внедрению модели в грунт $F_{гр}$ по формуле (1), которая в последующем использовалась для определения несущей способности модели сваи F_c по формуле (2) [8]

$$F_{гр} = (1/k_p S_c) \times \{ QH - [Q(k_m + \mu_c \sin \alpha) \times (H + S_c)] - \quad (1)$$

$$- k_b \sqrt{0,5gH^3} - S_c(q_c - Q_{НС}) \},$$

$$F_c = tF_{гр} + f, \quad (2)$$

где: k_p - сила динамического сопротивления грунта внедрению модели сваи при ударе, Н; k_p - коэффициент, определяющий долю фактической работы ударника по преодолению сопротивления грунта от идеализированной работы, равной произведению $F_{гр} S_c$; S_c - остаточный отказ модели, м; Q - вес ударника, Н; H - высота сбрасывания ударника, м; k_m - коэффициент, определяющий долю конструктивного трения от веса ударника при скольжении ударника по направляющему стержню; μ_c - коэффициент трения скольжения; α - угол наклона направляющего стержня от вертикали в градусах; k_b - коэффициент, учитывающий влияние вязкости воздуха; q_c - вес

модели свай, Н; $Q_{НС}$ - вес направляющего стержня, Н; F_c - несущая способность модели, Н; t, f – коэффициенты, соответственно равные 0,8208 и 2,8096 Н.

Результаты исследований. Результаты первой серии испытаний приведены в таблице 4 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 4 - Результаты первой серии испытаний моделей свай

Номер модели	Глубина забивки, мм	Остаточный от-каз модели при последнем ударе S_c' , мм	Удельная энергоёмкость забивки E_v' , Дж/см ³	Сила сопротивления $F_{гр}'$, Н	Несущая способ-ность F_c' , Н
1	258,3	8,3	0,329	420,2	347,7
2	250,6	8,9	0,350	391,6	317,2
3	229,5	9,9	0,356	351,9	291,6
4	266,7	7,3	0,342	478,3	395,4
5	248,9	9,3	0,347	374,7	310,4
6	241,7	9,6	0,349	362,9	300,7

Примечание – Удельная энергоёмкость забивки E_v' представляет собой отношение суммы потенциальной энергии всех ударов по модели к объёму ее погруженной части.

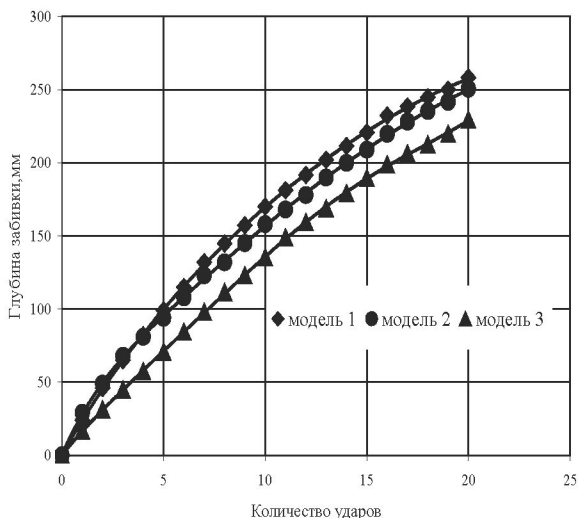


Рисунок 1 - Изменение глубины забивки моделей 1-3 при ударах ударника (первая серия испытаний)

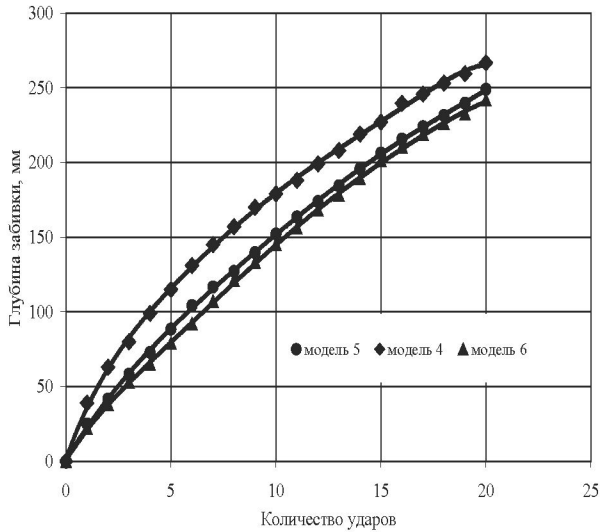


Рисунок 2 - Изменение глубины забивки моделей 4-6 при ударах ударника (первая серия испытаний)

Из результатов испытаний видно, что при одинаковом количестве ударов ударника модели погружены на разную глубину (от 229,5 мм до 266,7 мм, разница составляет 37,2 мм или 16,2%). Наибольшая глубина забивки имеет место для модели 4 с клиновидным острием и углом заострения 30°. Для данной модели свойственны также наименьший отказ (в конце забивки) и соответственно - наибольшая несущая способность. Второе место по погружаемости (по глубине забивки) и несущей способности занимает модель 1 с закругленным острием. Модель 2 с пирамидальным (традиционным) острием по рассматриваемым параметрам находится на третьем месте.

Наименьшая глубина погружения, наибольший отказ и соответственно наименьшая несущая способность характерна для модели 3 с плоским нижним концом. Для моделей 4, 5 и 6 с клиновидным острием прослеживается влияние угла заострения. Так с увеличением угла заострения от 30° до 90° наблюдается уменьшение глубины забивки (на 6,7-9,4%), увеличение отказа (на 27,4-31,5%) и уменьшение несущей

способности моделей (на 21,5-24,0%). Форма нижнего конца моделей и угол заострения моделей с клиновидным острием оказывают влияние и на удельную энергоёмкость забивки. Наибольшей удельной энергоёмкостью обладает модель 3 с плоским нижним концом, а наименьшей – модель 1 с закругленным острием (разница между ними составляет 7,6%).

Результаты второй серии испытаний, представлены в таблице 5 и на рисунках 3 и 4.

Таблица 5 - Результаты второй серии испытаний моделей свай

Номер модели	Глубина забивки, мм	Количество ударов	Остаточный отказ модели при последнем ударе S_c , мм	Удельная энергоёмкость забивки E_v , Дж/см ³	Сила сопротивления $F_{тр}$, Н	Несущая способность F_c , Н
1	202,1	13	10,4	0,276	334,79	277,6
2	200,1	14	10,0	0,312	348,31	288,7
3	198,9	16	9,3	0,329	374,76	310,4
4	199,2	12	12,0	0,287	289,75	240,6
5	198,1	14	11,4	0,310	305,16	253,3
6	201,1	15	11,0	0,317	316,34	262,5

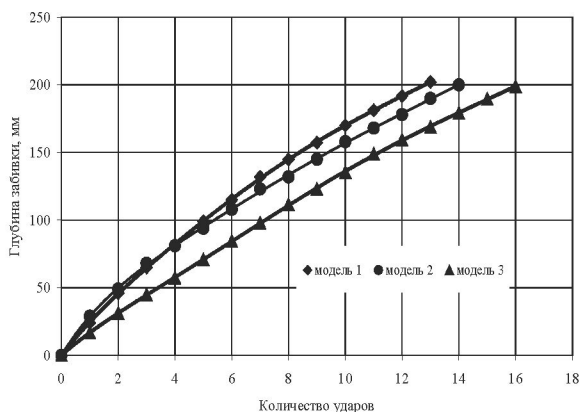


Рисунок 3 - Изменение глубины забивки моделей 1-3 при ударах ударника (вторая серия испытаний)

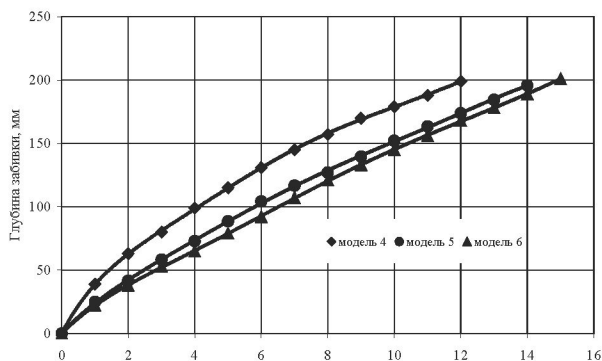


Рисунок 4 - Изменение глубины забивки моделей 4-6 при ударах ударника (вторая серия испытаний)

Модели забиты практически на одинаковую глубину (от 198,1 мм до 202,1 мм, разница составляет 4 мм или 2%) разным количеством ударов ударника (от 12 до 16 ударов, разница составляет 4 удара или 33,3%). Как и в испытаниях второй серии, наибольшая удельная энергоёмкость характерна процессу забивки модели 3 с плоской подошвой, а наименьшая – модели 1 с закругленным острием (разница между ними составляет 16,1%). Удельная энергоёмкость забивки модели 2 с пирамидальным острием на 5,2 % ниже удельной энергоёмкости модели 3. Для моделей 5 и 6 по сравнению с моделью 4 имеет место увеличение рассматриваемого параметра на 8,0 и 10,5% за счет увеличения угла заострения соответственно на 30° и 60°.

Наименьший отказ в конце забивки и соответственно наибольшая несущая способность принадлежит модели 3 с плоским концом. Несущая способность модели 2 с пирамидальным острием на 7,0% ниже несущей способности модели 3. На третьем месте по несущей способности находится модель 1 с закругленной нижней частью (на 3,8% меньше чем у модели 2). Наименьшая несущая способность характерна для модели 4 с клиновидным острием и углом заострения 30°. Для моделей 5 и 6 по сравнению с моделью 4 наблюдается повышение несущей способности на 5,3 и 9,1% за счет увеличения угла заострения соответственно на 30° и 60°.

Как правило, при проектировании свайных фундаментов, сваи в пределах площадки или ее части заглубляются на одинаковую

глубину. Поэтому большой практический интерес для специалистов представляют результаты второй серии испытаний. Учитывая данное обстоятельство для учета влияния формы нижнего конца свай на энергоемкость их забивки и несущую способность, на стадии проектирования свайных фундаментов рекомендуется использовать следующие зависимости, полученные на основе обработки результатов указанной серии испытаний

$$E_v = k_v E_{vb}, \quad (3)$$

$$F_c = k_f F_{cb}, \quad (4)$$

где: k_v и k_f - коэффициенты, учитывающие влияние формы нижнего конца сваи и равные соответственно: 1,05 и 1,08 - для свай с плоской подошвой (без острия); 0,88 и 0,96 - для свай с закругленным (полуэллипсоидным) нижним концом; 0,92 и 0,83 - для свай с клиновидным острием при угле заострения 30°; 0,99 и 0,88 - для свай с клиновидным острием при угле заострения 60°; 1,02 и 0,91 - для свай с клиновидным острием при угле заострения 90°; E_{vb} - удельная энергоемкость забивки сваи с пирамидальным острием; F_{cb} - несущая способность сваи с пирамидальным острием.

Обсуждение результатов исследований. Результаты проведенных исследований не подтверждают результаты забивки свай, представленные в работе [3], но положительно сочетаются с результатами опытов, изложенных в работе [1]. Касаясь, результатов опытов, приведенных в работе [2], следует отметить, что они не сопоставимы с результатами наших испытаний. Это обусловлено, тем, что в данном исследовании не изучались особенности формирования зон деформации грунтов вокруг моделей свай. В целом, результаты выполненных работ отличаются от существующих данных, полнотой решения вопроса о влиянии разных форм нижнего конца свай на их энергетические и силовые параметры. Полученные зависимости (3) и (4) позволяют объективно учитывать данный влияющий фактор на практике.

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

1. Форма нижнего конца сваи и угол ее заострения оказывают влияние на погружаемость сваи, удельную энергоемкость ее забивки и несущую способность;
2. Наиболее предпочтительными по несущей способности являются сваи без острия (с плоским нижним концом). Но, они требу-

ют больших энергетических затрат молотов для забивки, чем сваи с иной формой нижнего конца;

3. Сваи с традиционным пирамидальным острием по несущей способности уступают сваям без острия, и они по сравнению с ними менее энергоемки при забивке;

4. По удельной энергоемкости забивки наиболее эффективны сваи с закругленной нижней частью. Кроме того, такие сваи по сравнению со сваями с клиновидным острием обладают большей несущей способностью;

5. Из свай с клиновидным острием по удельной энергоемкости предпочтительны сваи с углом заострения нижней части 30° , а по несущей способности – сваи с углом заострения нижней части 90° .

В заключении следует отметить, что полученные результаты исследований характеризуются новизной и обладают практической ценностью, которая состоит в возможности использования проектными организациями зависимостей (3) и (4) при выборе свай на стадии проектирования свайных фундаментов под здания и сооружения.

Список литературы

1 Буров В.П. О влиянии угла заострения на усилие погружения свай // Труды НИИпромстроя «Во-просы фундаментостроения». – Уфа, 1976. – Выпуск 18. – С.111-114.

2 Лапшин Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1979. – 152 с.

3 Колесник Г.С., Рыжков Б.И., Еникеев В.М., Назаров С.Н. Энергоемкость свай без острия и с острием // Кн.: Ресурсосберегающие технологии возведения фундаментов из свай заводской готовности. – Москва: Стройиздат, 1990. – 111 с.

4 Вешняков В.А., Невзоров А.Л. Моделирование погружения свай с помощью программы «Plaxis dynamics» // Сборник статей международной научно-технической конференции «Геотехника Белоруссии: наука и практика». – Минск: БНТУ, 2008. – 316-321.

5 Дыба В.П., Скиба Е.Г. Аналитический расчет несущей способности свай // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Современные геотехнологии в строительстве и их научное сопровождение». – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2014. – часть 1. – С.341-345.

6 Метс М., Мусатова Е., Раудсепп Р., Паллав В. Формирование

несущей способности грунтов // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Современные геотехнологии в строительстве и их научное сопровождение», СПб-ГАСУ, 2014. – Ч. 1. – С.356-362.

7 Оперативный контроль за плотностью грунтов в условиях строительной площадки при их уплотнении. Руководящий документ в строительстве: РДС РК 5.01-09-2003. - Алматы: Проектная академия «KAZGOR», 2003. – 11 с.

8 *Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Аманбай А.* Погружаемость и энергоёмкость забивки свай и штампов. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 199 с.

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