

МРНТИ 67.11.29

И.И. Бекбасаров<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
Е.И. Атепов<sup>2</sup>, Н.А. Шанишабаев<sup>3</sup>



<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, <sup>2</sup>PhD, <sup>3</sup>Докторант

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3250-7853> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-2907-6610>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-4930-0488>



<sup>1,2,3</sup>Таразский региональный университет им. М.Х. Дулати



Тараз, Казахстан



<sup>1</sup>[ii.bekbasarov@dulaty.kz](mailto:ii.bekbasarov@dulaty.kz)

<https://doi.org/10.55956/ZBJU3224>

## ОБ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ЗАБИВКИ ШТАМПА И СВАЙ РАЗНОЙ ДЛИНЫ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ЛЕНТОЧНОГО КОМБИНИРОВАННОГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА (ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛЯХ)

**Аннотация.** Изложены результаты лабораторных экспериментов по оценке энергоемкости забивки свай и штампа при устройстве ленточного комбинированного свайного фундамента (далее – ЛКСФ). Исследования выполнены с применением моделей свай и ленточного штампа. Установлено, что наличие отверстий в ленточном штампе, облегчает процесс выштамповывания траншеи в грунте и сопровождается некоторым выпором глинистого грунта в полость отверстий. Выявлено, что сваи большей длины при одинаковых затратах энергии на их забивку погружаются на меньшую глубину. Определено, что забивка свай через сквозные отверстия штампа, погруженного в грунт, является более энергоемким процессом, чем забивка свай вне штампа. Данный эффект более значительно проявляется при погружении свай малой длины. Установлено, что забивка штампа со сквозными отверстиями поверху свай, погруженных в грунт, сопровождается большими затратами энергии, чем, забивка штампа при отсутствии забитых свай. Причем эти затраты тем выше, чем больше длина свай. Получены корреляционные зависимости, которые рекомендуется использовать для относительного прогноза энергетических затрат молота, необходимых для забивки штампа и свай, при устройстве ЛКСФ. Выявлено, что наиболее эффективным по энергоемкости является процесс устройства ЛКСФ, при котором забивка штампа для выштамповывания траншеи, производится после погружения свай.

**Ключевые слова:** комбинированный фундамент, грунт, штамп, свая, траншея, котлован, забивка, выштамповывание, энергия, удар, энергоемкость.



Бекбасаров, И.И. Об энергоемкости забивки штампа и свай разной длины при устройстве ленточного комбинированного свайного фундамента (исследования на моделях) [Текст] / И.И. Бекбасаров, Е.И. Атепов, Н.А. Шанишабаев // Механика и технологии / Научный журнал. – 2024. – №2(84). – С.190-206. <https://doi.org/10.55956/ZBJU3224>

**Введение.** Одним из прогрессивных видов фундаментов зданий и сооружений, обладающих высокой несущей способностью, являются

комбинированные свайные фундаменты (далее – КСФ), впервые предложенные в начале 90-ых годов 20 века в Башкирии [1]. КСФ представляют собой фундаменты, состоящие из одной или нескольких свай и фундамента, устроенного в вытрамбованном или выштампованном котловане (ФВК или ФВШК). Несущая способность КСФ при действии вдавливающей вертикальной статической нагрузки может достигать до 3000-3500 кН и более. В настоящее время существуют следующие технологии устройства КСФ [2]:

– вытрамбовывается котлован падающей трамбовкой, со дна готового котлована осуществляется забивка свай, производится бетонирование фундамента с заделкой головы свай в нем;

– забивается полый железобетонный блок (стакан), закрытый снизу, из блока извлекается «пробка» (закрывающая его дно), со дна блока производится забивка свай, выполняется бетонная заделка свай в блоке;

– выштамповывается котлован путем забивки штампа, извлекается штамп, производится забивка свай со дна котлована, выполняется бетонирование фундамента с заделкой головы свай.

Специалистами выполнен ряд исследований, посвященных изучению особенностей устройства КСФ, их работы под нагрузкой и созданию методов расчета их несущей способности. Так Готманом А.Л. и Каранаевым М.З. [1] в глинистых грунтах устроены три КСФ, каждый из которых состоял из железобетонного стакана (выполняющего роль, как ростверка, так и подколонника) и четырех свай. Забивные стаканы, изготовлялись в виде усеченной пирамиды с толщиной стенок 10 см и высотой 2,0 м. Размеры стакана в плане составляли: в верхней части – 1,5×1,5 м; в нижней части – 1,2×1,2 м. В составе КСФ использовались железобетонные сваи длиной 9 м с размерами поперечного сечения 30×30 см. Выполнены статические испытания отдельно забивных стаканов, отдельно свай и отдельно КСФ. По результатам испытаний авторами установлено, что предельное сопротивление КСФ составило 2900-3500 кН. Причем установлено, что несущая способность КСФ больше, чем суммарная несущая способность стакана и четырех свай, на 8-17%, т.е. имеет место положительный эффект совместной работы забивного стакана и свай как цельного фундамента.

Балобановым А.В., Гончаровым Б.В. и Готманом А.Л. в работе [3] представлен метод динамического контроля несущей способности КСФ. В основу метода положено упрощенное уравнение энергетического баланса, принятое из допущения, что энергия молота при ударе по забивному стакану затрачивается только на его перемещение в грунте, а при ударе по свае – только на ее погружение. В состав формулы, предложенной для оценки несущей способности КСФ, включены эмпирические коэффициенты, установленные по результатам статических и динамических испытаний.

В работе [4] авторами представлены результаты численных исследований КСФ. Определены параметры, оказывающие потенциальное влияние на значения перемещений КСФ, при действии горизонтальной и моментной нагрузки. Получено уравнение регрессии, учитывающее влияние этих параметров. Результаты расчетов, полученные на основе этого уравнения, сопоставлены с результатами расчетов по программе «Арком-гор». Установлено, что уравнение регрессии позволяет с достаточной точностью прогнозировать горизонтальные перемещения КСФ с учетом параметров грунта и забивного стакана.

Урманшиной Н.Э. в продолжение исследований, указанных в работе [4], выполнены численные эксперименты по оценке влияния ряда факторов на величину горизонтальных перемещений КСФ [5]. Выявлено, что на перемещения КСФ (при действии горизонтальной нагрузки) значительное влияние оказывают значения коэффициента постели грунта, залегающего вокруг стакана фундамента и размеры его поперечного сечения. Определено, что увеличение коэффициента постели грунта вызывает повышение сопротивления КСФ до 60%, а увеличение поперечного размера стакана – до 35% [6].

КСФ, состоящие из фундамента в вытрамбованном котловане и одной центральной сваи, изучались Бартоломеем А.А. и Глушковым И.В. путем проведения экспериментальных и численных исследований [7,8]. Исследователями установлены закономерности изменения напряжений под подошвой и по боковой поверхности КСФ, а также разработан инженерный метод расчета их осадок. Метод позволяет определять осадку КСФ, в которой в качестве центральной сваи используется призматическая свая, коническая свая или полая свая с круглым поперечным сечением.

Самофеевым Н.С., Гареевой З.А. и Гареевым Т.Р. предложен КСФ из трех наклонных свай [9]. Верхняя часть фундамента, которая служит ростверком – подколонником, имеет цилиндрическую форму диаметром 1,5 м и высоту 2 м. Угол наклона свай в фундаменте принят  $12^\circ$ , что позволяет исключить взаимовлияние свай друг на друга. Длина свай составляет 8 м. КСФ разработаны в качестве альтернативного варианта для возведения каркасного здания производственно-бытового корпуса в условиях Крайнего севера. Техничко-экономическими расчетами установлено, что КСФ по сравнению с фундаментами мелкого заложения (ФМЗ) и обычным фундаментом в виде свайного поля (СП), более экономичны. Так сметная стоимость строительно-монтажных работ по устройству КСФ соответственно в 1,27 и 1,5 раза меньше, чем при возведении СП и ФМЗ, а удельные приведенные затраты – меньше соответственно в 1,48 и 2,36 раза. К тому же устройство КСФ сопровождается меньшим расходом бетона. Определено, что расход бетона на устройство КСФ соответственно в 1,53 и 2,2 раза меньше, чем на возведение СП и ФМЗ.

В работе [10] представлены результаты численных исследований по оценке влияния длины сваи и угла наклона стенок фундамента в выштампованном котловане (ФШК) на несущую способность односвайного КСФ при действии вертикальной статической нагрузки. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Plaxis 2D. ФШК принят конусообразной формы со следующими размерами: диаметром сверху – 0,6-1,58 м; диаметром внизу – 0,3-0,4 м; высотой – 0,5-0,9 м. Сваи приняты призматическими, длиной 3,6 и 9 м с размерами поперечного сечения 30×30 см и 40×40 см. Диаметр нижней части ФШК соответствовал размеру поперечного сечения сваи. Определено, что увеличение длины сваи в 2-3 раза приводит к повышению несущей способности КСФ в 1,25-1,73 раза. Увеличение же угла наклона стенок ФШК в 1,33-2,0 раза вызывает снижение несущей способности КСФ до 23-28%.

Из изложенного анализа следует, что результаты исследований, полученные специалистами, в основном, относятся к оценке несущей способности КСФ при действии вдавливающей нагрузки, их сопротивляемости горизонтальной и моментной нагрузке, а также к инженерному прогнозу их осадок.

К сожалению, в работах [1-10] не рассматриваются особенности забивки свай и забивного блока (трамбовки или штампа) при устройстве КСФ. Известно, что при вытрамбовывании (выштамповывании) котлована под фундамент, грунт в верхней части массива, существенно уплотняется и вокруг котлована формируется уплотненная зона определенных размеров. Высота уплотненной зоны грунта ниже дна котлована в зависимости от уклона стенок и угла заострения трамбовки (котлована) изменяется от  $0,75$  до  $1,7b_m$  (где:  $b_m$  – ширина котлована в среднем сечении) [11], а плотность грунта на уровне дна котлована в зависимости от режима вытрамбовывания может достигать  $1,78-1,99$  т/м<sup>3</sup> [12]. Исходя из этих данных, можно предположить, что при устройстве КСФ, указанных в работе [1], высота уплотненной зоны грунта (ниже подошвы забивного стакана) составляла ориентировочно  $2,0$  м. Следовательно, сваи прорезали данный уплотненный грунт, и вероятно это сопровождалось большими энергетическими затратами молота, опасностью разрушения свай и риском их недопогружения до требуемой глубины.

В целом логично предполагать, что, потенциально, забивка свай при устройстве КСФ, является более энергоемким, продолжительным и не бездефектным процессом по сравнению с обычной забивкой свай в природное напластование грунтов, в котором, грунт в верхней части массива, как правило, менее прочный, чем нижележащие грунты.

Как известно, КСФ являются либо кустовыми, либо односвайными. Поэтому они могут быть использованы, в основном, для возведения каркасных зданий. Применительно к бескаркасным, в том числе, и к зданиям с несущими кирпичными стенами Бекбасаровым И.И. и Исаковым Г.И. предложен ленточный КСФ (далее – ЛКСФ), состоящий из одного ряда свай и ленточного фундамента в выштампованной траншее, который служит ростверком [13].

В отличие от известных вариантов КСФ при устройстве ЛКСФ выштамповывание траншеи под ростверк производится после забивки свай. Такой подход обусловлен, тем, что выштамповывание траншеи после погружения свай позволяет уплотнять верхнюю часть грунтового массива, которая обычно (после забивки свай) разрыхлена и в ней, а именно, в контактной зоне со стволом свай образуются щели (примерно на глубину до  $1,0-1,5$  м), особенно в глинистых грунтах. При устройстве ЛКСФ, уплотненная зона под ростверком формируется после забивки свай, а не до их забивки, что исключает риск недопогружения и повреждения свай, а также способствует повышению сопротивляемости грунтов по боковой поверхности свай в их верхней части.

Как видно КСФ отличаются от предложенного ЛКСФ очередностью забивки свай и устройства фундамента (стакана) в вытрамбованном или выштампованном котловане. В связи с этим, актуальным для исследований является вопрос о том, что эффективнее: забивка свай до выштамповывания (вытрамбовывания) траншеи (котлована) под ростверк (стакан), или же забивка свай после подготовки траншеи (котлована). Исходя из этого, проведены соответствующие экспериментальные исследования с использованием моделей ЛКСФ в глинистом грунте.

Целью исследований являлось – количественная оценка влияния очередности забивки свай и штампа при устройстве ЛКСФ на их погружаемость и энергоемкость.

**Условия и методы исследования.** *Характеристика грунта, оборудования, моделей свай и штампа, методика исследований.* Эксперименты проводились в пространственном грунтовом лотке, снабженном навесным оборудованием для ударного погружения моделей свай и штампа, подробные сведения о которых представлены в работе [14]. Моделирование свай, штампа, грунта и процесса их забивки осуществлялось на основе методики, изложенной в работе [15].

Модели свай (далее – свай) изготавливались из деревянных элементов с масштабом геометрического моделирования 1:20. Использовались три модели свай длиной 150, 200 и 300 мм. Высота острия моделей свай принята равной 15 мм. Размеры поперечного сечения моделей свай составляли 20×20 мм. Ленточный штамп для выштамповывания траншеи изготавливался с двумя сквозными квадратными отверстиями для пропуска свай через его корпус. Штамп имел в поперечном сечении форму перевернутой усеченной пирамиды. Масштаб геометрического моделирования для штампа принят 1:10, исходя из условия соответствия размера сечения модели свай, аналогичному размеру модели ленточного свайного ростверка. Высота штампа составляла 60 мм, длина – 120 мм, а размеры поперечного сечения вверху – 60 мм, внизу – 35 мм. Уклон боковых граней штампа принят 1:5. Размеры сквозных отверстий в штампе равны 22×22 мм, а расстояние между ними в осях – 60 мм.

В качестве модели грунта использовался суглинок нарушенной структуры. Физические показатели грунта представлены в таблице 1. Грунт пропускался через сито с размерами отверстия 1 мм, затем он увлажнялся расчетным количеством воды, после чего производилась его укладка в лоток с уплотнением каждого слоя. Плотность грунта слоя устанавливалась с помощью микропенетрационных испытаний [16].

Таблица 1

## Физические показатели суглинка

Показатель	Значение
Влажность, %	16,7
Влажность на границе текучести, %	17,32
Влажность на границе раскатывания, %	26,45
Число пластичности	0,0913
Показатель текучести	- 0,068
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,47
Плотность в сухом состоянии, т/м <sup>3</sup>	1,26

Проводились три серии лабораторных опытов. Первая серия включала в себя забивку штампа с закрытыми и открытыми сквозными отверстиями. При этом отверстия закрывались пластиной, которая крепилась к подошве штампа шурупами.

Вторая серия опытов состояла в забивке свай длиной 150, 200 и 300 мм. Свай забивались попарно с расстояниями между ними в осях 600 мм.

Третья серия опытов состояла в забивке штампа с открытыми отверстиями и последовательную забивку двух свай одинаковой длины через отверстия в штампе.

Четвертая серия опытов предусматривала забивку двух свай одинаковой длины с последующей забивкой через них штампа с открытыми отверстиями для выштамповывания траншеи в верхней части грунта.

Забивка свай и штампа сопровождалась измерением глубины их погружения и подсчетом количества ударов, затрачиваемых на их забивку. Кроме того, измерялись деформации подъема сваи при забивке соседней сваи, и при погружении штампа, а также аналогичные деформации штампа при забивке свай. Фиксировались также дефекты (трещины, щели, разрушения и др.) в грунте вокруг свай и штампа при забивке.

Фрагменты погружения штампа и свай представлены на рисунке 1.

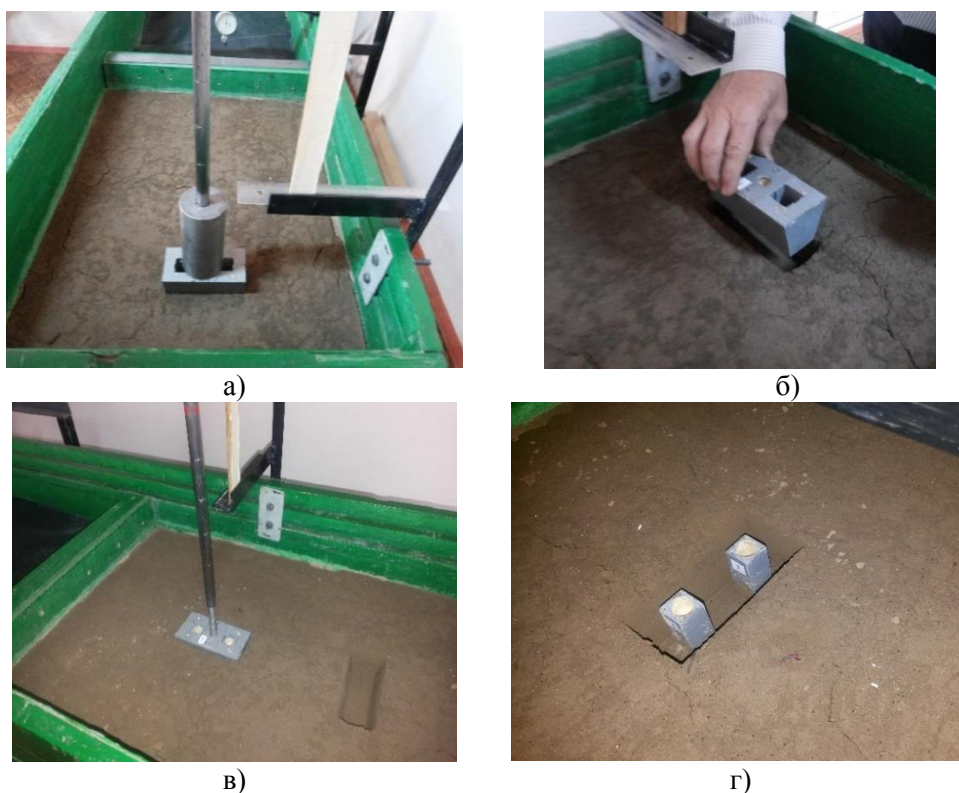


Рис. 1. Фрагменты погружения штампа (а), его извлечения (б), забивки штампа после забивки свай (в) и погружения свай после выштамповывания траншеи (г)

Забивка штампа с открытыми и закрытыми сквозными отверстиями производилась ударами ударника массой 2,5 кг. Высота сбрасывания ударника в процессе погружения штампа изменялась по ступенчато-возрастающей схеме (табл. 2). Минимальная высота сбрасывания ударника составляла 144 мм, а максимальная – 343 мм. Выбор данной схемы ударного нагружения штампа обусловлен его эффективностью, в отличие от традиционной схемы сбрасывания ударника с постоянной высоты [17]. Забивка свай выполнялась ударами ударника массой 1,0 кг, сбрасываемой с высоты 140 мм. Погружаемость штампа и свай оценивалась удельной энергоемкостью, которая устанавливалась в виде отношения полной потенциальной энергии ударника, затраченной на погружение элемента (штампа или сваи), к объему погруженной в грунт части элемента.

**Результаты исследования и обсуждение научных результатов.**  
Результаты забивки свай и штампа представлены в таблицах 2-5 и рисунках 2-5.

Таблица 2

Энергетические параметры ударника и глубина погружения штампа

Количество ударов $n$	Высота сбрасывания ударника $H$ , мм	Энергия ударов $E_{ush}$ , Дж	Глубина погружения штампа $h_{sh}$ , мм,				
			с закрытыми отверстиями	с открытыми отверстиями до забивки свай	с открытыми отверстиями после забивки свай длиной, см		
					15	20	30
3	144	10,59	11	21	8	7	5
6		21,18	18	30	13	11	9
9		31,77	24	35	19	16	13
13	194	50,80	30	41	26	22	18
15		60,32	33	44	29	25	20
18	243	78,20	37	48	33	29	23
21		96,08	41	51	37	33	26
24		113,96	45	54	41	36	29
27	293	135,52	49	57	45	39	32
30		157,08	53	59	48	42	35
34		185,82	58	-	52	46	38
38		219,47	-	-	56	49	41
42	343	253,12	-	-	59	52	44
44		269,94	-	-	-	53	46
46		286,76	-	-	-	55	48
50		320,41	-	-	-	58	51
54		354,06	-	-	-	-	54
58		387,71	-	-	-	-	57
62		421,36	-	-	-	-	59

Таблица 3

Итоговые результаты забивки штампа

Штамп	Общее количество ударов $n_o$	Полная энергия ударов $E'_{ush}$ , Дж	Полная глубина погружения $h_{psh}$ (средний остаточный отказ $S_{sh}$ ), мм	Удельная энергоёмкость забивки $E_{vsh}$ , Дж/см <sup>3</sup>
Штамп с закрытыми отверстиями	34	185,82	58 (1,71)	0,562
Штамп с открытыми отверстиями до забивки свай	30	157,08	59 (1,97)	0,467
Штамп с открытыми отверстиями после забивки свай	42	253,12	59 (1,40)	0,753
	50	320,41	58 (1,16)	0,969
	62	421,36	59 (0,95)	1,253

Примечание: в последних трех строках сверху вниз приведены данные, соответственно относящиеся к штампу, забитому после погружения свай длиной 15, 20 и 30 см.

Таблица 4

Энергетические параметры ударника и глубина погружения свай

Количество ударов $n$	Глубина погружения свай $h_c$ , мм, длиной			Энергия ударов $E_{uc}$ , Дж
	15 см	20 см	30 см	
8	100/50	65/35	45/25	11,07
16	149/75	105/59	79/49	22,13
28	- /105	140/90	115/75	38,73
40	- /130	170/116	140/99	55,33
52	- /152	198/140	165/122	71,93
60	-	- /158	185/138	82,99
70	-	- /180	205/160	96,82
79	-	- /199	225/179	109,24
91	-	-	250/203	125,87
102	-	-	270/224	141,08
110	-	-	285/239	152,15
120	-	-	300/259	165,98
129			- /279	178,43
140			- /299	193,65
120	-	-	- /259	165,98
129	-	-	- /279	178,43
140	-	-	- /299	193,65

Примечание: перед чертой указаны данные до забивки штампа, а за чертой – после забивки штампа.

Таблица 5

Итоговые результаты забивки свай

Сваи	Общее количество ударов $n_o$	Полная энергия ударов $E'_{uc}$ , Дж	Полная глубина погружения $h_{pc}$ , мм	Средний остаточный отказ $S_c$ , мм	Удельная энергоемкость забивки $E_{vc}$ , Дж/см <sup>3</sup>
Свая длиной 15 см	16/52	22,13/71,93	149/152	9,3/2,9	0,371/1,183
Свая длиной 20 см	52/79	71,93/109,24	198/199	3,8/2,5	0,908/1,372
Свая длиной 30 см	110/140	165,98/193,65	300/299	2,7/2,1	1,383/1,619

Примечание: перед чертой указаны данные до забивки штампа, а за чертой – после забивки штампа

Из результатов первой серии опытов (табл. 2,3, рис. 2,3) видно, что забивка штампа с закрытыми отверстиями (как штампа со сплошной подошвой) является более энергоемким процессом, чем забивка штампа с открытыми отверстиями. Так, при практически одинаковой глубине погружения, количество ударов, полная энергия ударов ударника, и удельная энергоемкость забивки штампа с закрытыми отверстиями соответственно в 1,13, 1,18 и 1,2 раза больше, чем для штампа с открытыми отверстиями. Учитывая, что в опытах принят одинаковый режим приложения ударной нагрузки на штампы, полученные данные можно объяснить меньшей сопротивляемостью грунта при внедрении штампа с открытыми отверстиями.



Это вызвано, тем, что под подошвой штампа, в зоне отверстий, при ударах ударника, часть грунта выдавливалась в полость отверстий в разуплотненном виде. Поэтому сопротивляемость грунта в зоне отверстий штампа ослабевает. Замерами установлено, что высота выпора грунта в полость отверстий составляла 3,0-3,5 мм.

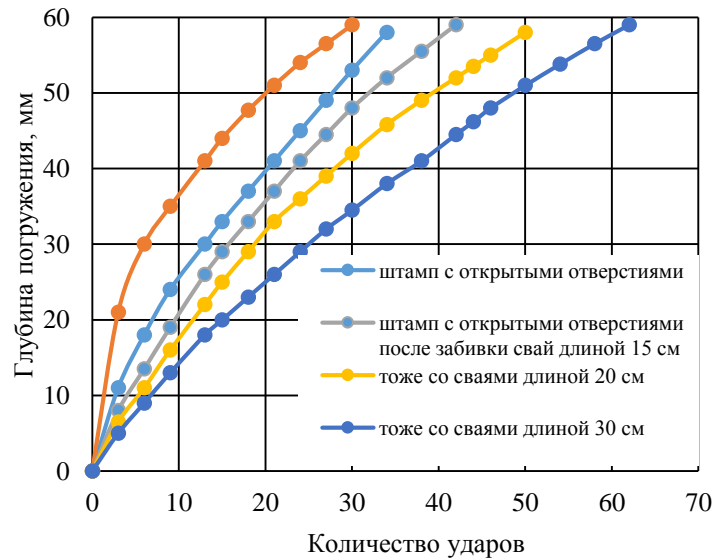


Рис. 2. Изменение глубины погружения штампа по мере увеличения количества ударов

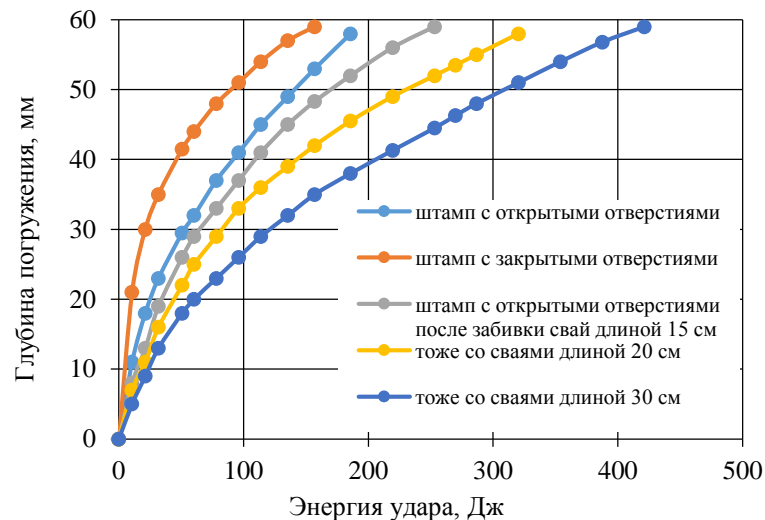


Рис. 3. Изменение глубины погружения штампа по мере увеличения энергии ударов

Во второй серии опытов (табл. 4,5 рис. 4) забивка свай большей длины при одинаковых энергетических затратах ударника сопровождалась уменьшением глубины погружения. Выявлено, что увеличение длины свай в 1,3 и 2 раза ведет к уменьшению глубины забивки свай на 29,5 и 47,0%. При забивке двух свай одинаковой длины через 60 см подъем ранее забитой сваи не наблюдался.

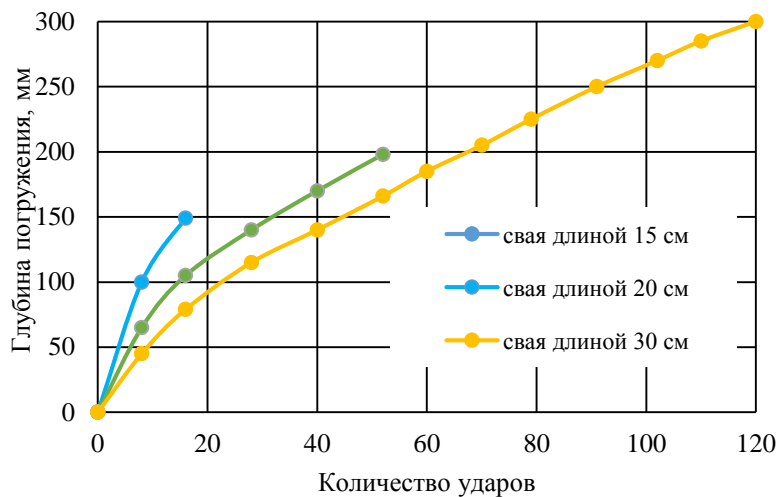


Рис. 4. Изменение глубины погружения свай (до забивки штампа) по мере увеличения количества ударов

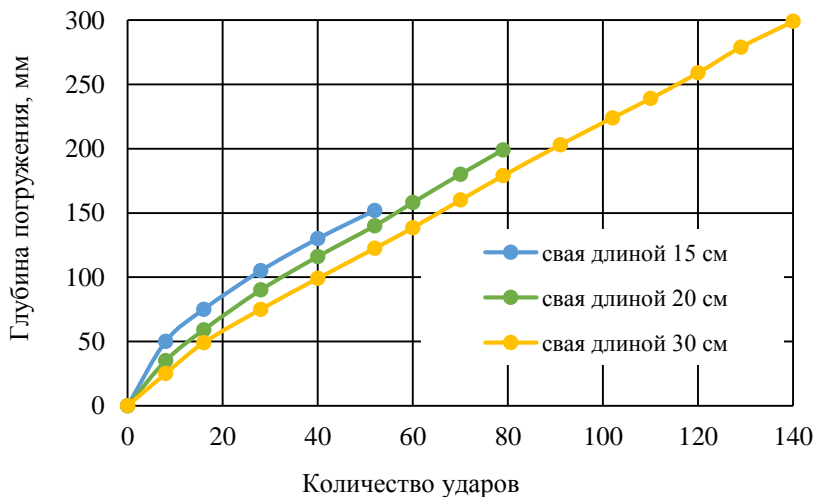


Рис. 5. Изменение глубины погружения свай (после забивки штампа) по мере увеличения количества ударов

Результаты опытов третьей серии (табл. 4,5 рис. 5) показывают, что забивка свай через отверстия штампа, погруженного в грунт, сопровождается большими энергетическими затратами ударника, чем забивка свай вне штампа (вторая серия опытов). Так затраты энергии ударов для свай длиной 15, 20 и 30 см, забитых через отверстия штампа, оказались большими соответственно в 3,25, 1,52 и 1,17 раза. Как видно указанная разница в энергетических затратах ударника тем выше, чем меньше длина свай. Это свидетельствует о том, что при меньшей длине сваи на ее погружаемость большое влияние оказывает уплотненная зона грунта, которая формируется под подошвой траншеи при забивке штампа. Вероятно, при меньшей длине сваи доля сил трения грунта по ее боковой поверхности в пределах высоты уплотненной зоны выше, чем доля сил трения грунта ниже данной зоны уплотнения.

В опытах третьей серии кроме того установлено, что при забивке свай через отверстия в штампе, происходит подъем штампа, за счет некоторого выпора грунта. Высота подъема штампа при забивке свай составляла 2,5-3,0 мм. Имел место также подъем сваи, ранее забитой в отверстие штампа, при погружении соседней сваи. Высота подъема соседних свай составила 1,5-2,0 мм. Кроме того, забивка свай сопровождалась разрыхлением поверхности грунта вокруг забитого штампа с появлением щелей по его периметру. Ширина щелей составляла 0,5-1,0 мм.

Результаты четвертой серии опытов (табл. 3 и рис. 2,3) свидетельствуют о том, что длина забитых свай, следовательно, и их глубина погружения оказывают влияние на энергетические параметры забивки штампа. Забивка штампа после погружения свай является более энергозатратным процессом, чем погружение штампа до забивки свай. Причем энергетические параметры ударника при погружении штампа тем выше, чем больше длина свай. Так, количество ударов, затраченное для погружения штампа после забивки свай длиной 15, 20 и 30 см соответственно в 1,4, 1,76 и 2,07 раза выше, чем для погружения штампа с открытыми отверстиями (без забивки свай). Превышения полной энергии ударника и удельной энергоемкости штампа после забивки свай над аналогичными параметрами штампа до забивки свай соответственно составили: 1,61, 2,04 и 2,68; 1,61, 2,07 и 2,68.

Сравнение результатов исследований показывает, что суммарные энергетические затраты ударника на погружение штампа и свай в опытах третьей и четвертой серии неодинаковы (табл. 6). Наиболее энергоемким является процесс, в котором, в начале забиваются сваи, а потом через них в грунт погружается штамп с отверстиями. Причем, данное явление, явно справедливо для случая, когда используются сваи длиной 20 и 30 см. Так суммарные затраты энергии на погружение штампа и свай, длиной 20 и 30 см, в четвертой серии опытов, соответственно в 1,24 и 1,38 раза выше, чем в третьей серии опытов. А, суммарные затраты энергии в рассматриваемых сериях испытаний, при длине свай 15 см, отличаются друг от друга незначительно (разница 1,21%).

Таблица 6

## Суммарные затраты энергии на забивку штампа и свай

Серия опытов	Суммарные энергетические затраты, Дж, на забивку штампа и двух свай длиной, см (доля затрат энергии на погружение штампа, %)		
	15	20	30
Третья серия (забивка свай после забивки штампа)	300,94 (52,20)	375,56 (41,83)	544,38 (28,85)
Четвертая серия (забивка штампа после забивки свай)	297,38 (85,17)	464,27 (69,01)	753,32 (55,93)

Доля затрат энергии, приходящей на забивку штампа, в четвертой серии опытов существенно выше, чем в третьей серии (на 56-85%), что свидетельствует о более значительной сопротивляемости грунта, при забивке штампа после забивки свай. Причиной этому, во-первых, служит наличие в грунте, погруженных свай, и, во-вторых – уплотнение грунта вокруг свай при их забивке.

Анализ результатов опытов, представленные в таблице 3, позволяет установить корреляционную зависимость между коэффициентом  $K_{vsh} = (E_{vsh}^p / E_{vsh}^d)$  и  $L_m$  (где:  $E_{vsh}^p$  – удельная энергоёмкость забивки штампа после погружения свай, кДж/м<sup>3</sup>;  $E_{vsh}^d$  – тоже до погружения свай, кДж/м<sup>3</sup>;  $L_m$  – длина модели сваи, м). Данная зависимость описывается следующей линейной функцией (рис. 6):

$$K_{vsh} = gL_m + z, \quad (1)$$

где:  $g, z$  – коэффициенты соответственно равные: 6,985 м<sup>-1</sup>; 0,606.

Величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных по формуле (1):  $R^2 = 0,988$ .

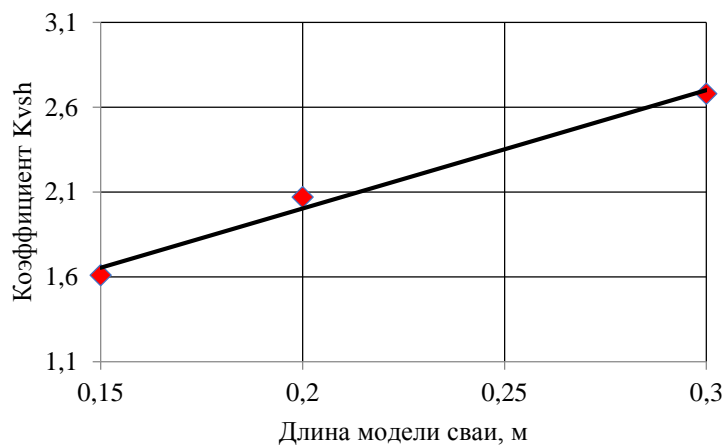


Рис. 6. Изменение коэффициента  $K_{vsh}$  по мере увеличения длины модели свай

Результаты опытов, приведенные в таблице 4, могут быть представлены в виде зависимости коэффициента  $K_{vc} = (E_{vc}^p / E_{vc}^d)$  от  $L_m$  (где:  $E_{vc}^p$  – удельная энергоёмкость забивки свай, после забивки штампа, кДж/м<sup>3</sup>;  $E_{vc}^d$  – тоже до забивки штампа, кДж/м<sup>3</sup>) которая описывается следующей степенной функцией (рис. 7):

$$K_{vc} = fL_m^{-r}, \quad (2)$$

где:  $f, r$  – коэффициенты соответственно равные: 0,199 м<sup>-1</sup>, 1,39.

Величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных по формуле (2):  $R^2 = 0,866$ .

Выражая длину модели сваи  $L_m$  через геометрический масштаб моделирования  $N$  в виде  $L_m = NL_c$  (где:  $L_c$  – длина сваи, м), формулы (1) и (2) можно представить в виде:

$$E_{sh}^p = E_{sh}^d(gNL_c + z), \quad (3)$$

$$E_c^p = E_c^d f(NL_c)^{-r}, \quad (4)$$

Формулу (3) можно использовать для приближенного и относительного прогноза энергетических затрат молота, необходимого для забивки штампа при устройстве ЛКСФ, когда сваи погружаются в грунт до выштамповывания траншеи, а формулу (4) – тоже, но при устройстве ЛКСФ, когда сваи забиваются в выштампованную траншею.

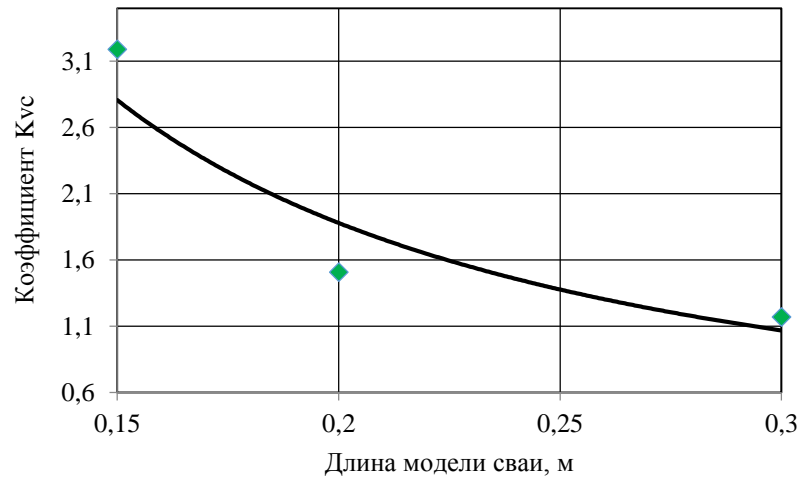


Рис. 7. Изменение коэффициента  $K_{vc}$  по мере увеличения длины модели свай

**Заключение.** Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) Наличие отверстий в ленточном штампе, облегчает процесс выштамповывания траншеи в грунте и сопровождается некоторым выпором глинистого грунта в полость отверстий;

2) Сваи большей длины при одинаковых затратах энергии на их забивку погружаются на меньшую глубину;

3) Забивка свай через сквозные отверстия штампа, погруженного в грунт, является более энергоемким процессом, чем забивка свай вне штампа. Данный эффект более значимо проявляется при погружении свай малой длины;

4) Забивка штампа со сквозными отверстиями поверху свай, погруженных в грунт, сопровождается большими затратами энергии, чем, забивка штампа при отсутствии забитых свай. Причем эти затраты тем выше, чем больше длина свай;

5) Корреляционные зависимости (3) и (4) рекомендуется использовать для относительного прогноза энергетических затрат молота, необходимых для забивки штампа и свай, при устройстве ЛКСФ.

В заключении следует отметить, что наиболее энергозатратным является процесс устройства ЛКСФ, при котором забивка штампа для выштамповывания траншеи, производится после погружения свай.

#### Список литературы

1. Готман А.Л., Каранаев М.З. Исследование комбинированных свайных фундаментов на вертикальную нагрузку // Проблемы свайного фундаментостроения / Труды III международной конференции. – Пермь: Издательство ППИ, 1992. – Часть 1. – С.23-26.
2. Глушков И.В. Прогноз осадок комбинированных свайных фундаментов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по

- специальности 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» - Пермь, 2007. – 22 с.
3. Балобанов А.В., Гончаров Б.В., Готман А.Л. О динамическом контроле комбинированных свайных фундаментов / Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – Пермь: РИО ПГТУ, 2000. – С.145-147.
  4. Готман А.Л., Урманшина Н.Э. О численных исследованиях работы комбинированных свайных фундаментов на горизонтальную и моментную нагрузки / Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – Пермь: РИО ПГТУ, 2000. – С.168-171.
  5. Урманшина Н.Э. О результатах численных исследований комбинированных свайных фундаментов на горизонтальную нагрузку и момент / Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – Пермь: РИО ПГТУ, 2000. – С.252-255.
  6. Урманшина Н.Э., Мухаметзянов З.Р. Об исследовании значимости отдельных элементов комбинированного свайного фундамента // Вестник АО НИЦ «Строительство». – М., 2022. – №34 (3). – С.134-143. [http://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-134-143/](http://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-134-143/).
  7. Глушков И.В. Комбинированные свайные фундаменты повышенной несущей способности / Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь: РИО ПГТУ, 2004. – Том 1. – С.42-45.
  8. Бартоломей А.А., Глушков И.В. Модельные исследования комбинированных фундаментов / Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь: РИО ПГТУ, 2004. – Том 1. – С.168-175.
  9. Самофеев Н.С., Гареева З.А., Гареев Т.Р. Оценка возможности реализации комбинированных свайных фундаментов в проекте строительства производственного объекта в условиях города Ноябрьска Ямало-Ненецкого автономного округа // Наукоедение / Интернет-журнал. – 2016. – Том 8. – №6. <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN616.pdf>.
  10. Хабибуллин С.Ю., Хабибуллина Н.Н. Численные исследования оптимальных размеров комбинированных свайных фундаментов // Современные наукоемкие технологии / Научный журнал. – М.: Академия Естествознания, 2018. – №9. – С.120-125.
  11. Бекбасаров И.И. Определение диаметра уплотненной зоны грунта, формирующейся вокруг вытрамбовываемого котлована неглубокого заложения / Труды университета. – Караганда: Издательство КарГТУ, 2004. – С.85-88.
  12. Бекбасаров И.И. О рациональных режимах приложения ударной нагрузки при вытрамбовывании котлованов // Исследования сейсмостойких сооружений и конструкций / Труды КазНИИССА. – Алматы: ТОО «Издательство ЛЕМ», 2007. – Выпуск №22(32). – С.198-2002.
  13. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И. Способ устройства ленточного свайного фундамента. Описание изобретения к инновационному патенту РК № (19) KZ (13) A4 (11) 27764. – Астана: Комитет по правам интеллектуальной собственности МЮ РК, 2013. – бюл. №12. – 3 с.
  14. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Аманбай А. Оценка влияния свай и штампов на их погружаемость и несущую способность фундаментных конструкций. – Тараз, 2014. – Издательство «Тараз университеті», 2014. – 146 с.
  15. Бекбасаров И.И. Исследование процесса забивки свай и штампов на моделях. – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2021. – 194 с.
  16. Бекбасаров И.И. Основы рационального вытрамбовывания котлованов под фундаменты. – М.: Электронно-библиотечная система Znanium.com, 2021. <http://znanium.com/catalog/1243773>.

17. Бекбасаров И.И., Байтемиров М.Н., Монтаева Х.А., Исаков Г.И. Влияние режима приложения ударной нагрузки на показатели уплотняемости суглинка // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении / Материалы международной научно-технической конференции. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2015. – С.185-191.

*Материал поступил в редакцию 24.04.24.*

**И.И. Бекбасаров<sup>1</sup>, Е.И. Атенов<sup>1</sup>, Н.А. Шаншабаев<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз қ., Қазақстан*

**ТАСПАЛЫ АРАЛАС ҚАДАЛЫ ІРГЕТАС ОРНАТУ КЕЗІНДЕ ШТАМП ПЕН ҰЗЫНДЫҚТАРЫ  
ӘРТҮРЛІ ҚАДАЛАРДЫ ҚАҒУДЫҢ ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДЫЛЫҒЫ ТУРАЛЫ  
(МОДЕЛЬДІК ЗЕРТТЕУЛЕР)**

**Аңдатпа.** Таспалы аралас қадалар іргетасын (бұдан әрі – ТАҚІ) орнату кезінде қадалар мен штамптарды қағудың энергия сыйымдылығын бағалау бойынша зертханалық эксперименттердің нәтижелері баяндалды. Зерттеулер қадалар мен таспалы штамп модельдерін қолдана отырып орындалды. Таспалы штампта саңылаулардың болуы себебінен топырақта траншеяны штамптау үрдісінің жеңілдейтіні және саңылау қуысына сазды топырақтың ығысып шығатыны анықталды. Бірдей энергия шығындарымен сипатталатын қағу кезінде ұзын қадалар аз тереңдікке батыратылатыны анықталды. Батырылған қаданы штамп саңылаулары арқылы қағу қаданы штампсыз қағуға қарағанда энергия шығынын көп қажет ететіндігі анықталды. Бұл әсер ұзындығы қысқа қадаларды батыру кезінде айтарлықтай байқалады. Қағылған қаданың үстінен саңылауы бар штамптарды қағу үрдісі қадасы жоқ штамптарды қағумен салыстырғанда энергия шығыны көп болатыны анықталды. Қаданың ұзындығы артқан сайын, бұл әсер де артатыны көрінеді. ТАҚІ орнату кезінде штамп пен қадаларды қағу үшін қажет энергия шығынын салыстырмалы түрде болжам жасау үшін пайдалануға ұсынылатын корреляциялық тәуелділіктер алынды. ТАҚІ орнатудың энергия сыйымдылығы бойынша ең тиімді тәсілі қада қағылғаннан кейін штамп қағу екені дәлелденді.

**Тірек сөздер:** аралас іргетас, топырақ, штамп, қада, траншея, қазаншұңқыр, қағу, штамптау, энергия, соққы, энергия сыйымдылығы.

**I.I. Bekbasarov<sup>1</sup>, Y.I. Atenov<sup>1</sup>, N.A. Shanshabayev<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>M.Kh.Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan*

**ON THE ENERGY INTENSITY OF HAMMERING A STAMP AND PILES OF DIFFERENT  
LENGTHS WHEN INSTALLING A COMBINED BELT PILE FOUNDATION  
(RESEARCH ON MODELS)**

**Abstract.** The results of laboratory experiments on the assessment of the energy intensity of pile driving and stamping during the installation of a belt combined pile foundation (hereinafter referred to as BCPF) are presented. The research was carried out using models of piles and a tape stamp. It was found that the presence of holes in the tape stamp facilitates the process of stamping a trench in the ground and is accompanied by some discharge of clay soil into the cavity of the holes. It has been revealed that piles of longer length, with the same energy consumption for their driving, sink to a lower depth. It is determined that driving piles through holes of a stamp immersed in the ground is a more energy-intensive process than driving piles outside the stamp. This effect is more

significantly manifested when sinking piles of small length. It has been found that hammering a stamp with through holes on top of piles immersed in the ground is accompanied by greater energy consumption than hammering a stamp in the absence of driving piles. Moreover, these costs are higher the longer the length of the piles. Correlations have been obtained, which are recommended to be used for the relative prediction of the energy consumption of the hammer required for hammering the stamp and piles when installing the BCPF. It has been revealed that the most energy-efficient process is the BCPF installing, in which the stamp for stamping the trench is hammered after the piles are immersed.

**Keywords:** combined foundation, soil, stamp, pile, trench, excavation, driving, stamping, energy, impact, energy intensity.

#### References

1. Gotman A.L., Karanaev M.Z. Issledovaniye kombinirovannykh svaynykh fundamentov na vertikal'nyuyu nagruzku [Study of combined pile foundations for vertical load] // Problemy svaynogo fundamentostroyeniya [Problems of pile foundation construction] / Proceedings of the III international conference. – Perm: PPI Publishing House, 1992. Part 1. P.23-26, [in Russian].
2. Glushkov I.V. Prognoz osadok kombinirovannykh svaynykh fundamentov [Forecast of settlement of combined pile foundations]. Abstract of the dissertation for the scientific degree of Ph.D. in specialty 05.23.02 "Bases and foundations, underground structures" - Perm, 2007. – 22 p., [in Russian].
3. Balobanov A.V., Goncharov B.V., Gotman A.L. O dinamicheskom kontrole kombinirovannykh svaynykh fundamentov [On dynamic control of combined pile foundations] / Trudy mezhdunarodnogo seminaro po mekhanike gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnym sooruzheniyam [Proceedings of the international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport structures]. – Perm: RIO PSTU, 2000. P.145-147, [in Russian].
4. Gotman A.L., Urmashina N.E. O chislennykh issledovaniyakh raboty kombinirovannykh svaynykh fundamentov na gorizonta'nyuyu i momentnyuyu nagruzku [On numerical studies of the operation of combined pile foundations under horizontal and moment loads] / Trudy mezhdunarodnogo seminaro po mekhanike gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnym sooruzheniyam [Proceedings of the international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport structures]. – Perm: RIO PSTU, 2000. P.168-171, [in Russian].
5. Urmashina N.E. O rezul'tatakh chislennykh issledovaniy kombinirovannykh svaynykh fundamentov na gorizonta'nyuyu nagruzku i moment [On the results of numerical studies of combined pile foundations for horizontal load and moment] / Trudy mezhdunarodnogo seminaro po mekhanike gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnym sooruzheniyam [Proceedings of the international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport structures]. – Perm: RIO PSTU, 2000. P.252-255, [in Russian].
6. Urmashina N.E., Mukhametzyanov Z.R. Ob issledovanii znachimosti otdel'nykh elementov kombinirovannogo svaynogo fundamenta [On the study of the significance of individual elements of a combined pile foundation] / Bulletin of JSC Scientific Research Center "Construction". – Moscow, 2022. No. 34 (3). P.134-143. [http://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-134-143/](http://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-134-143/), [in Russian].
7. Glushkov I.V. Kombinirovannyye svaynyye fundamenty povyshennoy nesushchey sposobnosti [Combined pile foundations with increased bearing capacity] / Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnomu stroitel'stvu [Proceedings of the international scientific and practical conference on problems of soil mechanics, foundation engineering and transport construction]. – Perm: RIO PSTU, 2004. Vol. 1. P.42-45, [in Russian].



8. Bartolomey A.A., Glushkov I.V. Model'nyye issledovaniya kombinirovannykh fundamentov [Model studies of combined foundations] / Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroyeniya i transportnomu stroitel'stvu [Proceedings of the international scientific and practical conference on problems of soil mechanics, foundation engineering and transport construction]. – Perm: RIO PSTU, 2004. Vol. 1. P.168-175, [in Russian].
9. Samofeev N.S., Gareeva Z.A., Gareev T.R. Otsenka vozmozhnosti realizatsii kombinirovannykh svaynykh fundamentov v projekte stroitel'stva proizvodstvennogo ob'yekta v usloviyakh goroda Noyabr'ska Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Assessment of the possibility of implementing combined pile foundations in a project for the construction of a production facility in the conditions of the city of Noyabrsk, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug] // Naukovedeniye [Science] / Internet journal, 2016. Vol. 8. No. 6. <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN616.pdf>, [in Russian].
10. Khabibullin S.Yu., Khabibullina N.N. Chislennyye issledovaniya optimal'nykh razmerov kombinirovannykh svaynykh fundamentov [Numerical studies of the optimal dimensions of combined pile foundations] // Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii [Modern high-tech technologies] / Scientific journal. – Moscow: Academy of Natural Sciences, 2018. No. 9. P.120-125, [in Russian].
11. Bekbasarov I.I. Opredeleniye diametra uplotnennoy zony grunta, formiruyushchey v okrug vytrambovyvayemogo kotlovana neglubokogo zalozheniya [Determination of the diameter of the compacted soil zone formed around a compacted shallow pit] / Proceedings of the University. – Karaganda: Publishing House KSTU, 2004. P.85-88, [in Russian].
12. Bekbasarov I.I. O ratsional'nykh rezhimakh prilozheniya udarnoy nagruzki pri vytrambovyvanii kotlovanov [On rational modes of application of shock loads when ramming pits] // Issledovaniya seysmostoykikh sooruzheniy i konstruksiy [Research of seismic-resistant structures and structures] / Proceedings of KazNISSA. – Almaty: LEM Publishing House LLP, 2007. Issue No. 22(32). P.198-2002, [in Russian].
13. Bekbasarov I.I., Isakov G.I. Sposob ustroystva lentochnogo svaynogo fundamenta [Method of constructing a strip pile foundation]. Description of the invention to the innovative patent of the Republic of Kazakhstan No. (19) KZ (13) A4 (11) 27764. - Astana: Committee on Intellectual Property Rights of the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan, 2013. - Bulletin. No. 12. – 3 p., [in Russian].
14. Bekbasarov I.I., Isakov G.I., Amanbai A. Otsenka vliyaniya svay i shtampov na ikh pogruzhayemost' i nesushchuyu sposobnost' fundamentnykh konstruksiy [Assessment of the influence of piles and stamps on their immersion and bearing capacity of foundation structures]. – Taraz, 2014. – Publishing house “Taraz University”, 2014. – 146 p., [in Russian].
15. Bekbasarov I.I. Issledovaniye protsessa zabivki svay i shtampov na modelyakh [Study of the process of driving piles and stamps on models]. – Moscow: LLC “Scientific Publishing Center INFRA-M”, 2021. – 194 p., [in Russian].
16. Bekbasarov I.I. Osnovy ratsional'nogo vytrambovyvaniya kotlovanov pod fundamenty [Basics of rational compaction of foundation pits]. – M.: Electronic library system Znanium.com, 2021. <http://znanium.com/catalog/1243773>, [in Russian].
17. Bekbasarov I.I., Baitemirov M.N., Montaeva Kh.A., Isakov G.I. Vliyaniye rezhima prilozheniya udarnoy nagruzki na pokazateli uplotnyayemosti suglinka [Influence of the mode of application of shock load on the compactability of loam] // Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroyenii [Soil mechanics in geotechnics and foundation engineering] / Proceedings of the international scientific and technical conference. – Novocherkassk: SURGPU (NPI), 2015. P.185-191, [in Russian].