

DOI: 10.12737/24

*Рыбникова И.А., ст. препод.
Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
(Новороссийский филиал)
Рыбников А. М., канд. техн. наук, доц., ст. научн. сотр.
Государственный морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова (г. Новороссийск)*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БУРОНАБИВНЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ

a.ribnikov@novoroskhp.ru

Один из способов повышения несущей способности буронабивных свай – придание им конусности по типу забивных свай, сужающихся к острию. Особенность работы таких свай (клиновидных) состоит в том, что под нагрузкой они работают «в распор», подобно объёмному клину и передают часть нагрузки за счёт нормальной составляющей по наклонной боковой поверхности. Результаты экспериментов на моделях буронабивных конических свай в грунтовом лотке показали, что с увеличением угла конусности несущая способность моделей конических свай существенно возрастает, хотя площадь острия (торца) у них одинаковая, а площади боковых поверхностей различаются незначительно. Это явление можно объяснить отпором грунта по стволу при вдавливающей нагрузке, то есть так называемым расклинивающим эффектом. Выявлено, что доля острия в общей несущей способности сваи составляет 12,8...25 %, из чего можно сделать следующий вывод. Применение буронабивных конических свай будет наиболее эффективным, при залегании с поверхности прочных грунтов, а заглубление острия в плотные грунты не является обязательным.

Ключевые слова: буронабивная свая, конусность сваи, модель сваи, грунтовый лоток, статические испытания, несущая способность, эффективность.

Введение. В России имеется значительный опыт применения буронабивных свай в различных грунтах и практически для любых зданий и сооружений. Принципиальная особенность буронабивных свай состоит в том, что они изготавливаются из товарного (жидкого) бетона непосредственно на строительной площадке в пробуренных скважинах. Разрабатываемый грунт (шлам) из скважин извлекается на поверхность непрерывно или периодически, при этом структура окружающего скважину грунта основания считается ненарушенной.

Буронабивные сваи по сравнению с забивными сваями обладают рядом преимуществ: при их устройстве используется более дешёвый товарный бетон, не требуются опалубочные работы, уменьшается расход арматуры (используется в основном короткий арматурный каркас в голове с выпусками для связи с ростверком), исключается необходимость в срубке голов свай. Кроме того, применение буронабивных свай освобождает производственные мощности заводов железобетонных изделий для изготовления других конструкций.

Для буронабивных свай существенную роль играет относительная длина, то есть отношение длины сваи l к её диаметру d . Обычно короткими (неглубокого заложения) считают сваи с отношением $l/d \leq 20$, длинными при $l/d > 20$ [1]. По диаметру ствола буронабивные сваи можно разделить на сваи малого диаметра $d < 0,4$ м, среднего $0,4 < d < 0,8$ м и большого диаметра d

$> 0,8$ м. Для стволов буронабивных свай в зависимости от их длины рекомендуются следующие диаметры [2]: d не менее 0,4 м при $l \leq 8$ м; d не менее 0,5 м при $8 < l \leq 15$ м; d не менее 0,6 м при $l > 15$ м. Условное разделение свай по длине объясняется различным сопротивлением их боковой поверхности и нижнего торца (острия) ствола при нагрузке.

Экспериментально установлено, что у коротких буронабивных свай усилия на торец передаются при первых ступенях вертикальной нагрузки [3]. Боковая поверхность сваи в начальный период загрузки воспринимает большую часть нагрузки и почти одновременно по всей длине ствола. По мере роста осадки сваи нагрузка на торец значительно возрастает, а сопротивление по боковой поверхности, в зависимости от сжимаемости грунта, исчерпывается при осадке на 6...8 мм. При дальнейшем увеличении нагрузки усилие, воспринимаемое боковой поверхностью, остаётся постоянным, а каждая из последующих ступеней нагрузки воспринимается только торцом. То есть несущая способность по боковой поверхности при определённой осадке исчерпывается и остаётся постоянной величиной.

Натурные эксперименты ряда исследователей выявили следующее: несущая способность коротких буронабивных свай находится практически в линейной зависимости от длины, диаметра и площади поперечного сечения ствола сваи. Это связано с тем, что исчерпание несущей

способности по боковой поверхности таких свай происходит в результате перехода в предельное состояние грунта непосредственно по боковой поверхности сваи или некоторого примыкающего к ней массива. Доля торца в восприятии общей нагрузки составляет не менее 50 %. С увеличением длины сваи соответственно возрастают силы трения по боковой поверхности.

У длинных буронабивных свай торец воспринимает нагрузку не сразу после приложения первых её ступеней, так как участки ствола вступают в работу постепенно [4]. За счёт упругого сжатия материала ствола, в первую очередь мобилизуются силы трения по боковой поверхности верхних участков. С увеличением нагрузки мобилизуются силы трения также нижележащих участков ствола, а незначительная часть нагрузки передаётся на торец сваи.

Граница предельного сопротивления сил трения с ростом нагрузки опускается вниз, и на всех участках, где она уже достигнута, сопротивление остаётся постоянным. В итоге сопротивление грунта по боковой поверхности длинных буронабивных свай увеличивается по мере возрастания вертикальной нагрузки, но только до определённого предела, после чего прирост его не наблюдается. Соотношение между площадью опирания торца длинных свай и площадью боковой поверхностью ствола невелико. Поэтому несущая способность таких свай определяется в основном силами бокового трения по стволу.

Приведенные результаты исследований показывают, что отношение сопротивления грунта под торцом к трению по боковой поверхности буронабивных свай по мере возрастания нагрузки зависит от относительной длины сваи. Как у длинных, так и у коротких свай несущая способность находится практически в линейной зависимости от длины и диаметра ствола. Силы трения по боковой поверхности реализуются полностью при определённой нагрузке и остаются постоянными до исчерпания несущей способности сваи. Отсюда можно сделать вывод, что несущую способность буронабивных свай можно повысить путём конструктивного изменения формы цилиндрического ствола, изготавливаемого в пробуренной скважине.

Методология. Анализ возможностей увеличения несущей способности буронабивных свай выявил следующие способы:

- зачистка шлама (осыпавшегося и разбуренного грунта) в забое (торце) скважины;
- упрочнение грунта под торцом сваи (механическим уплотнением или химическим закреплением);

- устройство уширений в основании и/или по стволу сваи;

- развитие боковой поверхности шероховатостью или винтовыми выступами.

Одним из путей повышения несущей способности буронабивных свай является придание скважине конической формы по типу забивных свай, сужающихся к острию (пирамидальные, трапецеидальные, ромбовидные, биклинные, плоско – и объёмнопрофилированные) или по типу конусных набивных свай в выштампованном ложе. Результатами натурных экспериментов разных исследователей доказана эффективность применения свай клиновидной формы почти во всех грунтовых условиях. Их несущая способность значительно выше чем обычных призматических свай того же объёма. Особенность работы свай, сужающихся к острию (клиновидных) состоит в том, что под нагрузкой они работают «в распор», подобно объёмному клину, и передают часть нагрузки за счёт нормальной составляющей по наклонной поверхности.

Известно, что прочность материала ствола цилиндрических буронабивных свай используется лишь на 25–45 %. В тоже время забивные и набивные сваи, сужающиеся к острию, отличаются высокой удельной несущей способностью. На основе этого и была предложена конструкция буронабивной конической сваи, сочетающая в себе основные преимущества забивных клиновидных и буронабивных свай. В нормативном документе [5] такая конструкция сваи не приведена.

Для применения любой новой конструкции необходимо получение положительных результатов экспериментальных исследований и создание надёжной методики её расчёта. В связи с этим в данной работе рассматривались следующие вопросы:

- выбор оптимальной конструкции буронабивной конической сваи и установление зависимости их несущей способности от угла конусности;

- исследование несущей способности буронабивных конических свай на моделях при действии вдавливающей нагрузки.

Размеры буронабивных конических свай приняты из опыта применения фундаментов из коротких буронабивных цилиндрических свай. Такие сваи обычно имеют диаметр 0,4...0,6 м, поэтому диаметр голов конических свай принят таким же: 0,4; 0,5; 0,6 м. Для удобства укладки бетонной смеси и последующего её уплотнения в суженной части скважины минимальный диаметр нижнего торца принят одинакового размера для всех трёх свай – 0,2 м. При заданных углах конусности свай, то есть углах между обра-

зующей сваю и её осью, равными $1^{\circ}20'$, 2° , $2^{\circ}40'$, длина ствола всех свай составила 4,5 м.

Основная часть. Экспериментальные исследования проводились на моделях одиночных свай в 1/10 натурной величины в грунтовом лотке. Для сравнительных данных исследовались также модели буронабивных цилиндрических свай также 1/10 натурной величины диаметром 40 мм и 60 мм, длиной 45 см. Были приняты

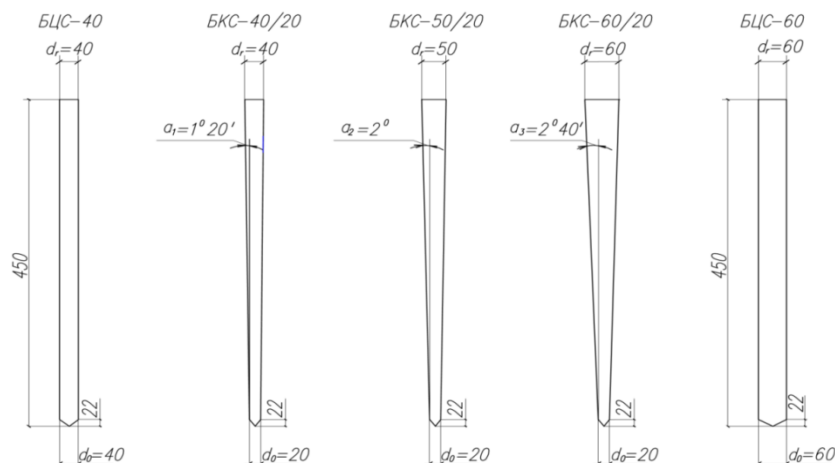


Рис. 1. Типоразмеры опытных моделей буронабивных свай

В качестве материала для моделей свай была принята древесина твёрдых пород – бук. Свай вытачивались механическим способом на станке, что позволило наиболее точно выдержать заданные размеры. Для придания шероховатости, которая образуется при устройстве буронабивных свай в натуральных условиях, поверхность всех моделей свай покрывалась слоем эпоксидного клея ЭД-5 и обсыпалась песком. Модели вытачивались с цилиндрическими фиксаторами высотой 10 см в верхней части – для установки на головы специальных оголовков диаметром 10 см под гидродомкрат.

Для раздельного замера сопротивления острия и боковой поверхности свай из стали были выточены модели конических свай-штампов (БКСШ) также трёх приведенных типоразмеров. По оси моделей-штампов были просверлены сквозные отверстия, в которые вставлялись стержени с наконечником (остриём). Таким образом их конструкция во время испытаний позволяла отделять остриё от ствола. С помощью специальных оголовков первоначально загружалось остриё свай-штампов, затем нагрузка с острия полностью снималась и отдельно определялось сопротивление ствола по боковой поверхности. Общая несущая способность свай-штампа складывалась как сумма из сопротивления по боковой поверхности ствола и под его остриём.

Исследования проводились на лабораторном экспериментальном стенде, состоящим из

следующие обозначения: буронабивные цилиндрические сваи БЦС-40, БЦС-60 и буронабивные конические сваи БКС-40/20, БКС-50/20, БКС-60/20 (рис.1). Цифры обозначают диаметр головы сваи d_r и через дробь – диаметр острия d_o в мм. Длина всех опытных свай равна 45 см. Отношение l/d_{cp} у всех принятых свай находится в пределах 8-15, то есть сваи относятся к коротким, где $d_{cp} = (d_r + d_o) : 2$.

грунтового лотка – металлического короба размером в плане $2,0 \times 1,4$ м высотой 1,6 м, реперной системы и гидрооборудования. Над лотком устанавливались две упорные стальные балки коробчатого сечения, которые с помощью подвижных креплений перемещались по тягам для обеспечения необходимой высоты их расположения над моделями. Тяги жёстко крепились к днищу лотка. Реперная система была выполнена из стального уголка. Для удобства работы в помещении лоток был заглублен на 60 см в обетонированный приямок.

Для моделирования работы буронабивных свай в грунте лотка специально изготовленными модельными буровыми ставами (шнеками) выбуривались скважины, в которые вставлялись модели. В качестве искусственного грунтового основания, однородного по глубине, использовался крупный песок. Лоток загружался на высоту 150 см, при этом расстояние между днищем и остриём моделей составляло 105 см. Песок укладывался слоями по 10 см, тщательно выравнивался и уплотнялся ручной трамбовкой по всей поверхности за три проходки. Перед укладкой он предварительно увлажнялся.

Особое внимание было уделено подбору плотности и влажности основания, так как при бурении стенки скважин не должны были осыпаться. Их оптимальное значение было подобрано опытным путём. В связи с тем, что в процессе экспериментов нарушалась структура и изменялась влажность песка, после каждой се-

рии опытов грунт из лотка извлекался и производилась новая его укладка по приведенной технологии. Для предохранения поверхности песка от быстрого высыхания, лоток в перерывах между испытаниями покрывался полиэтиленовой плёнкой. Эти мероприятия позволили провести все эксперименты практически в одинаковых условиях и получить наиболее достоверные результаты.

Методика лабораторных испытаний, требования к применяемому оборудованию и измерительным приборам соответствовали применительно к ГОСТ 5686-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». Усилия на модели создавались татированными грузами или гидравлическим домкратом грузоподъемностью до 50 кН, работающем от ручной насосной станции. Реактивные силы через упорную балку и тяги, воспринимались днищем загруженного лотка. Между домкратом и упорной балкой устанавливался шарнир для соосной передачи нагрузки. Масса домкрата учитывалась как первая ступень нагрузки. Измерения производились прогибомерами систем Аистова и Максимова. Осадка моделей определялась как средняя арифметическая величина показаний приборов.

Постановочные эксперименты показали, что модели свай сразу после приложения нагрузки резко оседают из-за наличия в забое скважины разрыхленного грунта. Поэтому при

рабочих испытаниях модели подвергались незначительному обжатию одинаковыми вертикальными нагрузками. Затем нагрузки полностью снимались, и только после этого модели считались подготовленными к экспериментам.

По результатам экспериментов строились графики зависимости «нагрузка – осадка», по которым определялась несущая способность моделей свай. Кривые зависимости имеют пологий вид без характерных точек перелома. Очень трудно в этом случае выбрать критерий, по которому можно было бы назначить несущую способность моделей. Поэтому предельная нагрузка была назначена условно – при перемещении свай на 10 мм. Это вызвано и тем, что объективнее и удобнее сравнивать работу свай при их осадке на одинаковую величину.

Анализ графиков позволил сравнить зависимости, а также технико-экономически обосновать расход материала свай по коэффициенту эффективности использования материала свай K_3 , равному отношению удельных несущих способностей исследуемых свай к удельной несущей способности эталонной, за которую была принята цилиндрическая свая диаметром 40 мм – БЦС-40. Дополнительно вычислялся коэффициент применения свай K_n , определяемый как отношение несущих способностей исследуемых свай к несущей способности эталонной сваи. Результаты экспериментов сведены в табл. 1 и 2

Таблица 1

Результаты статических испытаний моделей свай в масштабе 1/10 вертикальной вдавливающей нагрузкой

Марка модели свай	Угол конусности свай, α	Объем свай V , $дм^3$	Несущая способность свай Φ , кН	Φ/V , кН/дм ³	$K_n = \Phi/\Phi_{БЦС-40}$	$K_3 = \Phi/V: (\Phi/V)_{БЦС-40}$
БЦС-40	-	0,547	1,97	3,60	1	1
БКС-40/20	1°20'	0,316	1,37	4,34	0,70	1,21
БКС-50/20	2°	0,439	2,05	4,67	1,04	1,30
БКС-60/20	2°40'	0,585	2,68	4,58	1,36	1,27
БЦС-60	-	1,230	4,19	3,41	2,13	0,95

Таблица 2

Результаты статических испытаний моделей свай-штампов в масштабе 1/10 вертикальной вдавливающей нагрузкой

Марка модели свай-штампа	Площадь острья, $см^2$	Площадь ствола, $см^2$	Сопrotивление острья свай $\Phi_{остр}$, кН	Сопrotивление ствола свай $\Phi_{ств}$, кН	Общее сопротивление свай $\Phi_{общ}$, кН	$\Phi_{остр}/\Phi_{общ}$, %
БКСШ-40/20	3,14	403	0,338	1,01	1,35	25,0
БКСШ-50/20	3,14	471	0,338	1,64	1,98	17,0
БКСШ-60/20	3,14	538	0,388	2,30	2,64	12,8

Выводы. Результаты экспериментов показали, что с увеличением угла конусности несущая способность моделей конических свай возрастает, хотя площадь острья (торца) у них одинаковая, а площади боковых поверхностей раз-

личаются незначительно. Это явление можно объяснить отпором грунта по стволу при вдавливающей нагрузке, то есть так называемым расклинивающим эффектом.

При разных нагрузках модель сваи БЦС-60 имеет значительно меньшие осадки из-за развитого поперечного сечения и большой площади поверхности ствола. Поэтому эта модель имеет самый высокий коэффициент $K_n = 2,13$. Однако по объёму она в 2...4 раза превышает другие модели свай, и коэффициент эффективности использования материала у неё самый низкий $K_3 = 0,95$. Из построенного графика пересечения зависимости коэффициентов K_n и K_3 от угла конусности свай был определен оптимальный угол $\alpha = 2^\circ 31'$ для конусных свай данного типоразмера. С учётом этого из исследованных моделей конических свай предпочтение следует отдать модели БКС-60/20 с $\alpha = 2^\circ 40'$, $K_n = 1,36$ и $K_3 = 1,27$.

Доля острия в общей несущей способности составляет 12,8...25 %, из чего можно сделать следующий вывод. Применение буронабивных конических свай будет наиболее эффективным, при залегании с поверхности прочных грунтов, а заглубление острия в плотные грунты не является обязательным.

Полученные данные дают основание для продолжения проведения исследований на моделях свайных фундаментов из буронабивных конических свай и таких сваях натурной величины в полевых условиях. Накопленные данные позволят предложить методику расчёта несущей способности такой конструкции свай.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нахмуrow А.Н. Экспериментальное обоснование буронабивных свай по предельным состояниям: Автореф. дис. канд. техн. наук. Одесса, 1974. 28 с.
2. Таланов Г. П., Лычев Л.П., Осадчий В.Т. О проектировании фундаментов из буронабивных свай // Вопросы проектирования и устройства фундаментов из набивных свай: сб. материалов конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / Саратов: Изд-во СГУ, 1973. С. 7–12.
3. Жуков Н. В., Сажин В. С., Бейрит А. Г. Исследование работы коротких буронабивных свай в глинистых грунтах // Вопросы проектирования и устройства фундаментов из набивных свай: сб. материалов конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / Саратов: Изд-во СГУ, 1973. С. 13–26.
4. Работников А. И. К вопросу о теории работы буронабивных свай высокой несущей способности // Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях / Л.: Изд-во НТО Желдортранспорт, 1974. С 35–39.
5. Свод правил СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.

Rybnikova I.A., Rybnikov A.M.

DEVELOPMENT OF DESIGNS OF BORED CONIC PILES

One of methods of increase in the bearing capability of bored piles – giving of conicity to them on type the zabivnykh of the piles which are narrowed to an edge. Feature of work of such piles (wedge-shaped) consists that under loading they work "in a raspor", like a volume wedge and transfer a part of loading at the expense of a normal component on an inclined side surface. Results of experiments on models the buronabivnykh of conic piles in a soil tray showed that with increase in a corner of conicity the bearing capability of models of conic piles significantly increases though the area of an edge (end face) at them identical, and the areas of side surfaces differ slightly. This phenomenon can be explained with repulse of soil on a trunk in case of the pressing loading, that is the so-called wedging effect. It is revealed that the edge share in the general bearing capability of a pile constitutes 12,8 ... 25% from what it is possible to draw the following conclusion. Application the buronabivnykh of conic piles will be the most effective, in case of a bedding from the surface of strong soil, and deepening of an edge in dense soil isn't obligatory.

Key words: *the bored pile, conicity of a pile, the pile model, a soil tray, static testing bearing a capability, efficiency*

Рыбникова Ирина Александровна, старший преподаватель, кафедры гуманитарных и естественнонаучных дисциплин.

Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Адрес: Россия, 353915, Краснодарский край, г. Новороссийск, ул. Мысхакское шоссе, д. 75.

E-mail: a.ribnikov@novoroskhp.ru

Рыбников Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник.

Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, кафедра «Подъёмно-транспортные машины и комплексы».

Адрес: Россия, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, д. 93. E-mail:

a.ribnikov@novoroskhp.ru