DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.05

УДК 624.154.1

А.И. Полищук, Ф.А. МаксимовКубанский государственный аграрный университет,
Краснодар, Россия**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ВИНТОВЫХ
СВАЙ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ
ВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Представлены результаты экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях нагружения винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах, имеющих различные конструктивные решения. Сваи предназначены для устройства фундаментов быстровозводимых временных зданий. В лабораторных условиях оценивалось влияние конструктивного решения нижней части винтовой двухлопастной сваи (участок примыкания нижней лопасти к острию ствола сваи) на ее несущую способность в глинистом грунте. По результатам лабораторных испытаний установлено, что наибольшей несущей способностью обладают модели винтовых двухлопастных свай с нижней лопастью, расположенной на цилиндрической части ствола. Основная задача при испытаниях натурных свай в полевых условиях заключалась в определении рационального расстояния (шага) между лопастями. Было выявлено влияние расстояния между лопастями на несущую способность винтовой двухлопастной сваи в глинистых грунтах. Получено, что для свай длиной 1,8–2,0 м рациональный шаг между лопастями в глинистых грунтах (от полутвердой до текучепластичной консистенции) составляет 2,0–2,5 диаметра лопасти. В этом случае наблюдается наибольшая несущая способность винтовых двухлопастных свай по сравнению со сваями, имеющими другой шаг лопастей. При шаге более 2,5 диаметров лопастей в глинистых грунтах верхняя и нижняя лопасти начинают взаимодействовать с грунтом независимо друг от друга, что снижает эффективность их работы в глинистых грунтах. Снижение несущей способности винтовых свай с шагом менее 2,0 диаметров связано с уменьшением площади боковой поверхности «цилиндра» грунта на участке между лопастями.

Ключевые слова: винтовые сваи, нижняя лопасть, шаг (расстояние) между лопастями, глинистый грунт, конструктивные решения, несущая способность по грунту, быстровозводимые временные здания, характеристики грунта, натурные испытания, осадка винтовой сваи, статические испытания.

A.I. Polishchuk, F.A. Maksimov

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

**EFFECTIVE DESIGN SOLUTIONS FOR SCREW PILE
FOUNDATIONS OF PRE-FABRICATED TEMPORARY
BUILDINGS FOUNDED ON CLAY SOILS**

Steel screw piles are commonly used as foundation systems for temporary pre-fabricated buildings. Results of experimental laboratory and filed studies for a two-bladed helical piles in clayey soils are presented. A number of different design solutions have been considered. In the laboratory, we

evaluated the impact of various design solutions for the lower part of the two-bladed screw piles on the ultimate bearing capacity of the piles in clay soils. Our laboratory test results indicate that the two-bladed helical piles with the lower blade located on the cylindrical part of the pile shaft have the highest ultimate bearing capacity. The main objective of the full-scale pile tests in the field was to identify the most effective spacing between the two blades. The influence of the spacing between the blades on the ultimate bearing capacity of two-bladed screw piles in clay soils has been investigated in the field. Our field test results indicated that for the 1,8 m to 2,0 m long piles founded in stiff to soft clay soils, the most effective spacing between the blades is 2,0–2,5 blade diameters. The test piles with such blade spacing had the highest ultimate bearing capacity compared to the piles having a different blade spacing, mostly due to the interaction of the upper and lower blades via the soil "cylinder" confined between them. With a spacing of more than 2,5 blade diameters in the clay soils, the upper and lower blades act independently of each other, which reduces their effectiveness and the bearing capacity of the pile. Our test results also indicate that the bearing capacity of the screw piles with a blade spacing of less than 2,0 blade diameters is reduced due to a decrease in the area of the lateral surface of the soil "cylinder" confined between the upper and lower blades.

Keywords: screw piles, blade, helix, blade spacing, clay soil, modeling, design, ultimate bearing capacity, pre-fabricated temporary buildings, field testing, pile load test.

В настоящее время строительство быстровозводимых временных зданий становится приоритетным направлением, так как благодаря особенностям применяемых конструкций они технологичны, легко и быстро монтируются (собираются). Такие здания характеризуется, как правило, низким удельным весом строительных конструкций, позволяющим значительно снизить нагрузки на фундаменты. Для быстровозводимых временных зданий перспективными являются фундаменты из металлических винтовых свай, которые имеют целый ряд преимуществ перед другими видами фундаментов. К числу преимуществ относятся значительная скорость погружения винтовых свай, сокращение объемов земляных работ, отсутствие динамических и вибрационных воздействий на основание и соседние здания при их ввинчивании, а также всесезонность производства работ.

В качестве свай чаще применяют металлические винтовые сваи с одной лопастью. Одним из путей решения задачи повышения эффективности винтовой сваи является введение в ее конструктивное решение второй лопасти. Такое решение позволяет достичь требуемой несущей способности винтовой сваи без резкого увеличения ее геометрических размеров по сравнению со свайей, имеющей одну лопасть [1]. Сваи могут изготавливаться полыми, со скошенным нижним концом, состоять из отдельных стандартных секций. Применяются также многолопастные сваи с постоянным шагом лопастей. Лопасти могут быть одного диаметра или постепенно уменьшаться к низу ствола свай, в последнем случае их чаще используют в качестве анкеров. Учитывая большое разнообразие конструктивных решений, отметим, что вопрос о повышении эффективности конструкций винтовых свай является актуальным.

В Кубанском государственном аграрном университете (г. Краснодар) совместно с Южно-Уральским государственным университетом (НИУ, г. Челябинск) были проведены экспериментальные исследования работы двухлопастных винтовых свай различной конструкции в полевых и лабораторных условиях. Эксперименты в лабораторных условиях проводились для трех видов (вариантов) конструктивных решений винтовых свай, которые могут применяться при строительстве зданий, сооружений [2–4] (рис. 1):

Рис. 1. Модели винтовых двухлопастных свай для лабораторных экспериментальных исследований: *а* – схемы конструктивных решений винтовых двухлопастных свай; *б* – общий вид фрагментов моделей винтовых свай; 1 – винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на конической части ствола (вариант 1); 2 – винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на цилиндрической части ствола без конуса – ствол сваи полый (вариант 2); 3 – винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на цилиндрической части ствола с конусом (вариант 3)

- винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на конической части ствола (вариант 1);
- винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на цилиндрической части ствола без конуса (вариант 2);
- винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на цилиндрической части ствола с конусом (вариант 3).

В лабораторных условиях оценивалось влияние конструктивного решения нижней части двухлопастной сваи (участок примыкания нижней лопасти к острию ствола сваи) на ее несущую способность в глинистом грунте. Все рассматриваемые сваи имели одинаковые геометрические параметры (диаметр ствола и лопастей, длина моделей свай, расстояние между лопастями). Винтовая лопасть свай представляла собой один полный виток постоянной ширины. Такая конструкция лопастей являлась более предпочтительной по сравнению с другими решениями, так как при массовом изготовлении существенно упрощается технология производства работ.

Модели двухлопастных винтовых свай были изготовлены из углеродистой стали С245 и имели следующие геометрические параметры: длина 700 мм, диаметр ствола и лопастей 57 мм и 150 мм соответственно. Расстояние между лопастями, равное двум диаметрам лопасти сваи, было принято 300 мм. Данное расстояние (300 мм) выполнено кратно шагу винтовой лопасти (60 мм), с тем чтобы последующая лопасть ввинчивалась по пути, пройденному нижней лопастью, тем самым не нарушая структуру грунта. Для всех свай шаг винтовой лопасти принят равным 60 мм. Углы при вершине конуса для варианта 1 и варианта 3 составляли 30° и 60° соответственно.

Лабораторные экспериментальные исследования проводились на искусственно приготовленном глинистом грунте – глине текучепластичной и полутвердой консистенции. Глинистый грунт, отобранный из котлована, высушивали до воздушно-сухого состояния, затем его измельчали в шаровой мельнице до порошкообразного состояния. Исходя из задаваемой консистенции грунта рассчитывали соответствующие значения его влажности. Расчет количества воды, требуемой для получения необходимого состояния глинистого грунта, производился по методике ГОСТ 22733–2002. Физико-механические характеристики глинистого грунта приведены в таблице.

Физико-механические характеристики глинистого грунта

Грунт	Физико-механические характеристики глинистого грунта								
	ρ_s , г/см ³	W	ρ , г/см ³	e	W_L	W_P	I_L	ϕ , град	c , кПа
Глина полутвердая	2,76	0,24	1,88	0,820	0,41	0,20	0,19	16	22
Глина текучепластичная	2,76	0,36	1,87	1,01	0,41	0,20	0,76	5	11

Экспериментальные исследования проводились в металлическом лотке размером в плане 1000×700 мм и высотой 1100 мм. Лоток был оборудован анкерной системой, состоящей из металлической рамы, воспринимающей реактивное усилие в процессе проведения статических испытаний моделей свай. Между домкратом и балкой устанавливался образцовый динамометр ДОСМ 3-10У для регистрации сжимающего усилия (рис. 2).

Рис. 2. Схема проведения лабораторных экспериментальных исследований работы винтовых двухлопастных моделей свай в металлическом лотке: 1 – металлический лоток; 2 – реперная система; 3 – динамометр ДОСМ-3-10у; 4 – прогибомеры конструкции Н.Н. Максимова (тип 6-ПАО (ПМ) –0,1); 5 – модель винтовой сваи; 6 – глинистый грунт; 7 – металлическая упорная рама; 8 – домкрат гидравлический ДГТЗ, 3 тс

Для увеличения скорости консолидации глинистого грунта на дно лотка укладывали слой песка средней крупности толщиной 150 мм, поверх которого формировалось глинистое основание. Каждый

слой глины высотой 150–200 мм уплотнялся постоянным давлением, равным 0,015 МПа. Плотность грунта при послойном уплотнении контролировалась микропенетрометром марки МВ-2, который был отградуирован для полутвердой и текучепластичной консистенции. Расстояние между точками пенетрации было принято 15–20 см.

Модели винтовых двухлопастных свай ввинчивались на глубину 0,6 м вручную через динамометрическое устройство специальной конструкции (рис. 3), позволяющее регистрировать крутящий момент [5]. За частное значение предельного сопротивления винтовой двухлопастной сваи по грунту принимали нагрузку, предшествующую ее срыву, который характеризовался интенсивным ростом осадки, не затухающей во времени на последней ступени. По результатам испытаний были построены графики «осадка – нагрузка» для грунтов полутвердой и текучепластичной консистенции (рис. 4).

Рис. 3. Общий вид ввинчивания моделей винтовых двухлопастных свай в глинистый грунт нарушенной структуры (подготовка испытаний винтовых свай в лотке)

Из анализа графиков испытаний установлено, что наибольшей несущей способностью обладают модели винтовых двухлопастных свай с нижней лопастью, расположенной на цилиндрической части ствола (вариант 3). Такая закономерность наблюдается для глинистых грунтов как полутвердых, так и текучепластичных. При этом выявлено, что несущая способность модели винтовой двухлопастной сваи, изготовленной по варианту 3, примерно на 10–12 % больше по сравнению с моделью сваи, изготовленной по варианту 1 (см. рис. 1). Отмеченное увеличение несущей способности сваи по варианту 3 связано

с лучшими условиями уплотнения грунта в уровне нижней лопасти винтовой сваи при вершине конуса ствола, равном 60° . При угле конуса в 30° уплотненное ядро не образуется, вследствие чего происходит снижение несущей способности сваи, выполненной по варианту 1. Исследования зарубежных специалистов [6–8] свидетельствуют о том, что при вдавливании конуса с углом при вершине менее 30° уплотненное ядро практически не образуется, а разрушение основания происходит вследствие сдвига частиц грунта при продавливании.

Рис. 4. Графики зависимости «нагрузка – осадка» в глинистом грунте текучепластичной (а) и полутвердой (б) консистенции, установленные по данным лабораторных испытаний: 1 – винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на конической части ствола (вариант 1); 2 – то же, с нижней лопастью на цилиндрической части ствола без конуса – ствол сваи полый (вариант 2); 3 – то же, с нижней лопастью на цилиндрической части ствола с конусом (вариант 3)

Наименьшее значение несущей способности во всех опытах отмечено у модели винтовой двухлопастной сваи с нижней лопастью на цилиндрической части ствола без конуса – ствол винтовой сваи полый (вариант 2). Несущая способность в глине полутвердой консистенции примерно на 15 % меньше по сравнению с моделью, изготовленной по варианту 3. Наибольшее снижение (до 20 %) отмечено в грунте текучепластичной консистенции по сравнению с моделью сваи, выполненной по варианту 3.

Проведенные исследования в лабораторных условиях позволили найти эффективное конструктивное решение нижней части винтовой двухлопастной сваи (вариант 3 – с нижней лопастью, расположенной на цилиндрической части ствола сваи с конусом). Результаты лабораторных исследований работы моделей винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах легли в основу постановки экспериментов в полевых условиях.

Основная задача при натурных испытаниях заключалась в определении рационального расстояния (шага) между лопастями и оценке его влияния на несущую способность винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах. Натурные испытания винтовых свай проводились на опытной площадке, сложенной глинистым грунтом – глиной преимущественно полутвердой консистенции, залегающей до глубины 4,1 м от уровня природного рельефа. При этом грунт характеризовался как водонасыщенный, так как коэффициент водонасыщения (степень влажности) S_r был больше 0,8 [9].

Вопрос о влиянии шага лопастей на характер работы винтовых многолопастных свай рассмотрен в работах [10–12]. По результатам проведенных лабораторных исследований работы винтовых свай – анкеров в слабых глинистых грунтах [10, 11] было предложено две схемы для описания поведения свай в зависимости от расстояния между лопастями. При значении параметра $L/D \leq 1,5$ (L , D – соответственно расстояние между лопастями и среднее значение их диаметра) грунт, заключенный между лопастями, начинает работать совместно со свайей – анкером, мобилизуя силы трения по боковой поверхности образованного таким образом «цилиндра» (*cylindrical shear surface*). При значении параметра $L/D > 2,0$ лопасти начинают работать независимо друг от друга. Несущая способность винтовой многолопастной сваи может быть определена как сумма несущей способности по грунту каждой лопасти в отдельности (*individual plate method*).

В результате проведенных статических испытаний натурных многолопастных винтовых свай, погруженных в грунт на глубину 5, 18 м, специалистами было установлено [12], что при вдавливающих нагрузках в не связных грунтах при снижении параметра L/D от 3 до 1,5 происходит повышение несущей способности многолопастных винтовых свай примерно на 24 %. В слабых глинистых грунтах, напротив, отмечено некоторое снижение несущей способности свай (до 17 %). Уменьшение несущей способности многолопастных свай можно

объяснить проявлением негативного влияния близкого расположения лопастей на прочность слабых глинистых грунтов.

Для проведения натурных испытаний были изготовлены винтовые двухлопастные сваи длиной 2,0 м, диаметром ствола 108 мм с различным расстоянием между лопастями: 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 диаметра лопасти (рис. 5). Все сваи погружались в грунт на одинаковую глубину, равную 1,8–1,9 м. За несущую способность свай принималось значение нагрузки, под действием которой винтовая двухлопастная свая получала осадку, равную 30 мм. Величина осадки определялась по формуле (7.19) СП 24.13330.2011 в зависимости от предельной средней осадки фундамента для зданий с каркасом. По результатам экспериментальных исследований был построен график, характеризующий зависимость расстояния между лопастями L и несущей способности свай F_d (рис. 6).

Рис. 5. Конструкции винтовых двухлопастных свай с различным шагом между лопастями: а – 1,5D; б – 2,0D; в – 2,5D; г – 3,0D, где D – диаметр лопасти

Из графика на рис. 6 видно, что при расстоянии между лопастями 2,0–2,5 диаметра обеспечивается наибольшая несущая способность винтовых двухлопастных свай. Если расстояние между лопастями будет больше 2,0–2,5 диаметра, то это может привести к нерациональному увеличению длины свай. Напротив, при меньшем расстоянии между лопастями конструктивное решение свай будет неэффективным, так как возможно возникновение «взаимовлияния» лопастей.

Рис. 6. Несущая способность винтовой двухлопастной сваи в зависимости от расстояния между лопастями (L , D – соответственно расстояние между лопастями и среднее значение их диаметра): 1 – $F_d = 55$ кН; 2 – $F_d = 64$ кН; 3 – $F_d = 63$ кН; 4 – $F_d = 57$ кН

Как видно из рис. 7, схемы взаимодействия винтовых двухлопастных свай с грунтом различные, что подтверждается ранее проведенными исследованиями [10, 11]. Для свай с шагом $3,0D$ (D – диаметр лопасти) грунт в форме «цилиндра» формируется в основном на участке расположения нижней лопасти (рис. 7, а). Для свай с шагом 2,0–2,5 диаметра грунт в форме «цилиндра» формируется практически во всем пространстве между лопастями (рис. 7, б). Уменьшение несущей способности винтовой двухлопастной сваи при шаге более 2,5 диаметра лопастей связано с тем, что при приложении нагрузки к свае верхняя и нижняя лопасти начинают работать независимо друг от друга.

Рис. 7. Образование «грунтового цилиндра» на участке между лопастями винтовой двухлопастной сваи: *а* – для свай с шагом $3D$; *б* – для свай с шагом $2,5 D$; D – диаметр лопасти

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено влияние шага (расстояния) между лопастями на несущую способность винтовой двухлопастной сваи. Выявлено, что для свай длиной не более 2,0 м и диаметре ствола 0,108 м рациональный шаг между лопастями в глинистых грунтах составляет 2,0–2,5 диаметра лопасти. По результатам проведенных исследований получен патент РФ на полезную модель [13].

Библиографический список

1. Максимов Ф.А., Болгов И.В., Полищук А.И. Винтовые двухлопастные сваи и перспективы их использования для фундаментов временных зданий // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых (2–4 декабря 2014 г.). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – С. 232–234.

2. A.B. Chance Company. – URL: <http://www.abchance.com/resources/cad-drawings/>.
3. Almita Piling. – URL: <http://www.almita.com/>.
4. Железков В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства. – СПб.: Прагма, 2004. – 125 с.
5. Патент № 151668 РФ МПК G01L 1/22. Динамометр для измерения крутящих моментов при закрутке металлических свай / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов, С.Ю. Павлов, М.М. Скоморохов, Е.Е. Рихтер; опубл. 10.04.2015; Бюл. № 10.
6. Vesic A. Principles of pile foundation design // Soil Mechanics Series. – 1975. – № 38.
7. Muromachi T. Experimental study on application of static cone penetrometer to subsurface investigation of weak cohesive soils // ESOPT. – 1974. – Vol. 2.2. P. 285–291.
8. Baligh MM, Scott R.F. Analysis of wedge penetration in clay // Geotechnique. – 1976. – Vol. XXVI, № 1. – P. 185–208.
9. Швеиц В.В. Элювиальные грунты как основания сооружений. – М.: Стройиздат, 1964. – 193 с.
10. Narasimha Rao S., Prasad Y.V.S.N., Veeresh C. (1993). Behaviour of Embedded Model Screw Anchors in Soft Clays // Geotechnique. – 1993. – Vol. 43. – P. 605–614.
11. Narasimha Rao S., Prasad Y.V.S.N., Shetty M.D. The Behaviour of Model Screw Piles in Cohesive Soils // Journal of Soil and Foundations. – Vol. 31. – P. 35–50.
12. Zhang D.J.Y. Predicting Capacity of Helical Screw Piles in Alberta Soils // Master's thesis / University of Alberta. – Edmonton, 1999.
13. Патент 139824 РФ, МПК E 02 D 5/56. Винтовая свая / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов, С.Ю. Павлов, М.М. Скоморохов; опубл. 27.04.2014; Бюл. № 12.

References

1. Maksimov F.A., Bolgov I.V., Polishchuk A.I. Vintovye dvukhlopastnye svai i perspektivy ikh ispol'zovaniia dlia fundamentov vremennykh zdanii [A two-bladed Helical piles and prospects of their use for foundations of temporary buildings]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa"*. Krasnodar: KubGAU, 2014, pp. 232-234.

2. A.B. Chance Company, available at: <http://www.abchance.com/resources/cad-drawings/>.
3. Almita Piling, available at: <http://www.almita.com/>.
4. Zhelezkov V.N. Vintovye svai v energeticheskoi i drugikh otrasliakh stroitel'stva [Screw piles in energy and other sectors]. Saint-Petersburg: Pragma, 2004. 125 p.
5. Polishchuk A.I., Maksimov F.A., Pavlov S.Iu., Skomorokhov M.M., Rikhter E.E. Dinamometr dlia izmereniia krutiashchikh momentov pri zakrutke metallicheskih svai [Dynamometer to measure the torque moment for steel piles]. *Patent № 151668 Rossiiskaia Federatsiia MPK G01L 1/22*.
6. Vesic A. Principles of pile foundation design. *Soil Mechanics Series*, 1975, no. 38.
7. Muromachi T. Experimental study on application of static cone penetrometer to subsurface investigation of weak cohesive soils. *ESOPT*, 1974. vol. 2.2, pp. 285-291.
8. Baligh M.M., Scott R.F. Analysis of wedge penetration in clay. *Geotechnique*, 1976, vol. XXVI, no. 1, pp. 185-208.
9. Shvets V.B. Eliuvial'nye grunty kak osnovaniia sooruzhenii [Eluvial soils as bases of constructions]. Moscow: Stroiizdat, 1964. 193 p.
10. Narasimha Rao S., Prasad Y.V.S.N., Veeresh C. Behaviour of Embedded Model Screw Anchors in Soft Clays. *Geotechnique*, 1993, vol. 43, pp. 605-614.
11. Narasimha Rao S., Prasad Y.V.S.N., Shetty M.D. The Behaviour of Model Screw Piles in Cohesive Soils. *Journal of Soil and Foundations*, 1991, vol., 31, pp. 35-50.
12. Zhang, D.J.Y. Predicting Capacity of Helical Screw Piles in Alberta Soils. Master's thesis, Edmonton: University of Alberta, 1999.
13. Polishchuk A.I., Maksimov F.A., Pavlov S.Iu., Skomorokhov M.M. Vintovaia svaia [Screw pile]. *Patent 139824 Rossiiskaia Federatsiia, MPK E 02 D 5/56*.

Получено 17.09.2015

Об авторах

Полищук Анатолий Иванович (Краснодар, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета; e-mail: ofpai@mail.ru).

Максимов Федор Александрович (Краснодар, Россия) – аспирант кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета; e-mail: mfa86@mail.ru).

About the authors

Anatolii I. Polishchyk (Krasnodar, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Bases and Foundations, Kuban State Agrarian University (e-mail: ofpai@mail.ru).

Fedor A. Maksimov (Krasnodar, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Bases and Foundations, Kuban State Agrarian University, (e-mail: mfa86@mail.ru).