

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ВИНТОВЫХ СВАЙ

Ф.А. Максимов

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

Представлена методика оценки крутящего момента при устройстве винтовых двухлопастных металлических свай. Для измерения крутящего момента, возникающего в реальных условиях при их ввинчивании, разработана конструкция тензодинамометра, выполненная из стальной трубы с размещенными на ней тензорезисторами, которые наклеивались на стальную трубу тензодинамометра под углом 45° к ее продольной оси и подключались к измерительной системе по схеме полного моста. Для регистрации электрических сигналов с тензорезисторов в процессе ввинчивания свай использовалась блок-схема измерения, включающая в себя тензодинамометр с наклеенными тензорезисторами, тензометрический усилитель 8АНЧ-26, аналого-цифровой преобразователь Е140, соединительные кабели, персональный компьютер. По предварительно построенной градуировочной зависимости $M_{кр} = f(\Delta U_{изм})$ определялась величина крутящего момента. Исследования крутящего момента $M_{кр}$ проводились в лабораторных условиях при ввинчивании моделей винтовых двухлопастных свай в глинистый грунт полутвердой и текучепластичной консистенции. Разработанная методика оценки крутящего момента $M_{кр}$ позволит в дальнейшем подготовить рекомендации по определению несущей способности винтовых двухлопастных свай по грунту. Установлено, что при погружении второй лопасти в грунт обеспечивается увеличение крутящего момента в глинистом грунте текучепластичной и полутвердой консистенции на 35–50 % соответственно.

Ключевые слова: крутящий момент, винтовые двухлопастные сваи, тензодинамометр, тензорезисторы, глинистый грунт, конструктивные решения, лабораторные исследования.

В настоящее время для быстровозводимых временных зданий наиболее перспективными являются фундаменты из металлических винтовых свай, за счет высокой производительности работ по их ввинчиванию, а также возможности их устройства в зимних условиях. Погружение свай в грунт осуществляется за счет винтовых лопастей при действии крутящего момента. При массовом устройстве винтовых свай широко применяются гидровращатели, которые устанавливаются на базовые машины различных типов: краны-манипуляторы, колесные и гусеничные экскаваторы, мини-экскаваторы, тракторы, мини-погрузчики и др. [1, 2]. При небольших объемах работ применяется способ ввинчивания винтовых свай «вручную»; в данном случае крутящий момент $M_{кр}$ создается за счет мускульной силы монтажников. Зачастую диаметр ствола таких свай не превышает 100–120 мм при их длине не более 3–4 м.

Величина крутящего момента $M_{кр}$ при ввинчивании сваи может быть использована для оценки ее несущей способности по грунту, так как между этими величинами существует корреляционная зависимость, отмеченная многими исследователями [3–8]. В отечественных строительных нормах отсутствуют рекомендации по оценке несущей способности свай по результатам измерения вели-

чины крутящего момента. Однако за рубежом такая практика широко используется. Наибольшую популярность оценки несущей способности винтовых свай приобрело соотношение, предложенное Hoytand Clemence [8]:

$$F_d = K_t \cdot M_{кр}, \quad (1)$$

где F_d – несущая способность сваи по грунту, кН; $M_{кр}$ – крутящий момент, измеренный на проектной отметке нижней лопасти при ввинчивании, кН·м; K_t – коэффициент пропорциональности, который зависит от диаметра ствола сваи.

Соотношение (1) было установлено на основе проведения многочисленных статических испытаний винтовых свай на опытных площадках, сложенных различными грунтами. Основным достоинством расчета несущей способности по величине крутящего момента является оперативность и высокая достоверность полученных результатов. Установив значение коэффициента для конструкции винтовой сваи K_t и выполнив измерение крутящего момента $M_{кр}$, по формуле (1) отыскивается величина ее несущей способности. Поэтому разработка методики оценки крутящего момента $M_{кр}$ при ввинчивании винтовой сваи является важной практической задачей.

В Кубанском государственном аграрном университете (КубГАУ) совместно с Южно-Уральским государственным университетом (ЮУрГУ, г. Челябинск) ведутся исследования по совершенствованию конструктивных решений и методов расчета винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах. Исследования выполняются под руководством д-ра техн. наук, профессора А.И. Полищука. Автором настоящей работы была разработана методика оценки крутящего момента $M_{кр}$ при устройстве винтовых двухлопастных свай в глинистые грунты. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на моделях винтовых свай. Методика заключалась в следующем.

Для измерения крутящего момента $M_{кр}$, возникающего в реальных условиях при ввинчивании свай, разработана конструкция тензодинамометра, выполненная из стальной трубы с наружным диаметром 76 мм и толщиной стенки трубы 4 мм. Тензорезисторы наклеивались на наружную поверхность трубы под углом 45° к ее продольной оси. Для передачи крутящего момента от внешнего источника к винтовой свае через тензодинамометр в последнем выполнено по два отверстия в верхней и нижней частях стальной трубы. Для преобразования возникающих в процессе ввинчивания деформаций в электрический сигнал использовались тензорезисторы марки ПКБ-10-100ХА. С целью снижения уровня погрешности измерения, повышения чувствительности тензорезисторов, уменьшения влияния температурной погрешности и компенсации деформации изгиба, тензорезисторы подключались к измерительной системе по схеме полного моста. Общий вид тензодинамометра представлен на рис. 1.

Перед проведением испытаний была выполнена оценка чувствительности тензодинамометра, которая заключалась в расчете величины деформации ε_1 для случая изменения крутящего момента $M_{кр}$ в диапазоне от 10 до 1000 Н·м.

Деформация, измеряемая тензорезистором при кручении определялась по следующей зависимости [9]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \tau (1 + \mu), \quad \varepsilon_3 = -\frac{1}{E} \tau (1 + \mu), \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ – первая и третья главные деформации материала стальной трубы, измеряемые тензорезисторами, E – модуль упругости стальной трубы тензодинамометра, μ – коэффициент Пуассона стали, τ – максимальные касательные напряжения, действующие на поверхности стальной трубы тензодинамометра.

Величина касательных напряжений может быть определена по формуле:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}, \quad (3)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, действующий на сваю, Н·м; W_p – полярный момент сопротивления сечения стальной трубы тензодинамометра, m^3 .

Преобразуем формулу (2), используя зависимость между модулем сдвига G и модулем упругости E для изотропного материала, окончательно получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{16M_{кр}}{\pi D^3 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)} / 2G. \quad (4)$$

Значение деформации, вычисленное по формуле (4) для крайнего нижнего значения из заданного диапазона изменения крутящего момента ($M_{кр} = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$), диаметра трубы тензодинамометра $D=76 \text{ мм}$ и толщины стенки $t = 4 \text{ мм}$ составляет $\varepsilon_1 = 2,09 \text{ е.о.д.}$

Анализ приведенных результатов показывает, что при данном конструктивном решении тензодинамометра уровень регистрируемого сигнала достаточно высок. С учетом повышения чувствительности за счет схемы полного моста сигнал измерительной информации может быть увеличен в четыре раза.

Таким образом, принятая конструкция тензодинамометра для измерения крутящего момента

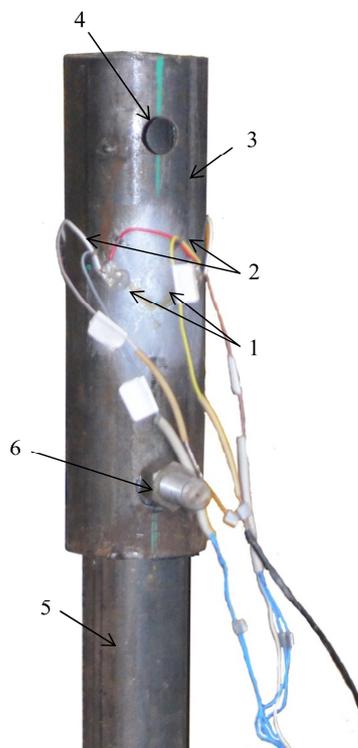


Рис. 1. Конструкция тензодинамометра: 1 – тензорезисторы, наклеенные под углом 45° к продольной оси; 2 – соединительные провода; 3 – стальная труба; 4 – отверстия, выполненные в стальной трубе для передачи крутящего момента; 5 – винтовая свая; 6 – отверстие для соединения тензодинамометра с винтовой свайей

Теория расчета строительных конструкций

обладает достаточно высокой чувствительностью и обеспечивает приемлемую точность измерений во всем диапазоне изменения крутящего момента. Разработанная конструкция тензодинамометра защищена патентом РФ на полезную модель [10].

Для регистрации электрических сигналов с тензорезисторов использовалась блок-схема измерения, включающая в себя тензодинамометр, тензометрический усилитель 8АНЧ-26, аналого-цифровой преобразователь Е140, соединительные кабели, персональный компьютер. Деформации тензодинамометра воспринимаются тензорезисторами и преобразуются в изменение напряжения в измерительной диагонали мостовой схемы. Уровень изменения напряжения в измерительной диагонали моста варьируется в пределах 0,01–10 мВ и поэтому требует усиления. Для этого используется специализированный тензометрический восьмиканальный усилитель на несущей частоте 8АНЧ-26. Усиленный аналоговый сигнал с усилителя поступает на вход АЦП, где оцифровывается и превращается в цифровой код. Результаты оцифровки данных записываются в память ПК и могут быть использованы для проведения обработки результатов и дальнейших исследований.

Максимальный уровень сигнала в измерительной диагонали мостовой схемы получается при наклеивке тензорезисторов под углом 45° к продольной оси трубы. При этом угол между осями установки составляет 90° . В том случае, когда возникает отклонение от оптимальных углов установки тензорезисторов, возникает систематическая погрешность, связанная со снижением уровня воспринимаемой деформации.

Для более достоверной оценки результатов экспериментальных исследований на моделях винтовых свай в лабораторных условиях, автором была проведена градуировка (тарировка) тензодинамометра. С этой целью была собрана измерительная схема, соответствующая условиям ввинчивания моделей винтовых свай в лабораторных условиях. Нижняя часть тензодинамометра закреплялась в слесарных тисках, через отверстия в верхней части тензодинамометра прикладывался крутящий момент, который создавался путем приложения к свае пары сил с плечом $L=1,0$ м. Крутящий момент прикладывался ступенчато, на каждой ступени снимались показания с тензодинамометра. По результатам испытаний строился градуировочный график $M_{кр} = f(\Delta U_{изм})$, который позволяет установить связь между показаниями тензодинамометра и величиной крутящего момента, приложенного к свае при ее ввинчивании (рис. 2).

Общий вид установки для измерения крутящего момента в процессе ввинчивания свай в лабораторных условиях приведен на рис. 3. Лабораторные экспериментальные исследования для оценки крутящего момента проводились для моделей двухлопастных свай на искусственно приго-

товленном глинистом грунте – глине текучепластичной и полутвердой консистенции. Методика приготовления глинистого грунта в лабораторных условиях описана в работе [11]. Физико-механические характеристики глинистого грунта приведены в таблице.

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 было принято 300 мм, равное двум диаметрам лопасти сваи. Данное расстояние (300 мм) выполнено

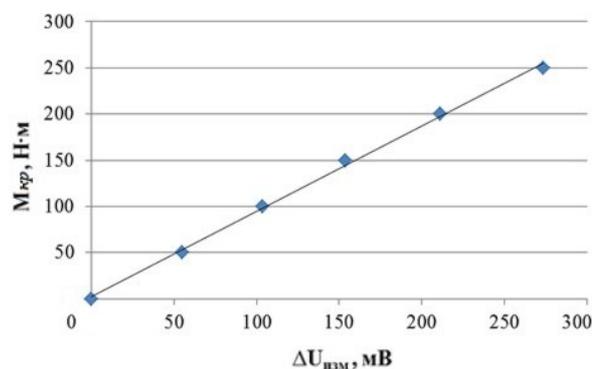


Рис. 2. График градуировки тензодинамометра $M_{кр} = f(\Delta U_{изм})$: $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м; $\Delta U_{изм}$ – изменение напряжения на выходе измерительного моста, мВ



Рис. 3. Процесс ввинчивания модели винтовой двухлопастной сваи в глинистый грунт

Физико-механические характеристики глинистого грунта

Грунт	Физико-механические характеристики глинистого грунта								
	$\rho_s, \text{ г/см}^3$	W	$\rho, \text{ г/см}^3$	e	W_L	W_P	I_L	$\phi, \text{ }^\circ$	$c, \text{ кПа}$
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

кратно шагу винтовой лопасти (60 мм), с тем чтобы последующая лопасть ввинчивалась по пути, пройденному нижней лопастью, тем самым, не нарушая структуру грунта. Модели винтовых свай ввинчивались на глубину 0,6 м вручную, при устройстве также контролировалась вертикальность их положения и фиксировалось время их ввинчивания $t, \text{ с}$. Конструкция модели винтовой сваи изображена на рис. 4.

По результатам лабораторных исследований построены графики $M_{кр} = f(t)$, по которым устанавливалось значение крутящего момента $M_{кр}$ в зависимости от времени установки t двухлопастных свай. На рис. 5 (1, 2) представлен график результатов ввинчивания сваи в глинистый грунт текучепластичной и полутвердой консистенции. Анализируя полученные результаты, можно отметить общую закономерность изменения величины крутящего момента $M_{кр}$ в процессе устройства винтовых двухлопастных свай в глинистом грунте. На начальном отрезке времени (до $t = 40 \text{ с}$) проис-

ходит увеличение крутящего момента, связанного с мобилизацией сил сопротивления грунта вокруг нижней лопасти. После погружения нижней лопасти величина момента остается постоянной на протяжении примерно 110 с ($t \approx 110 \text{ с}$). При погружении второй лопасти, начиная с момента времени $t \approx 160 \text{ с}$, происходит повторное увеличение крутящего момента $M_{кр}$ до достижения его максимального значения.

Основываясь на полученных результатах, можно отметить, что крутящий момент $M_{кр}$, необходимый для ввинчивания свай в полутвердые грунты, в среднем в три раза больше по сравнению с моментом, возникающем при устройстве свай в текучепластичный глинистый грунт ($M_{кр} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $65 \text{ Н}\cdot\text{м}$ соответственно). При погружении второй лопасти в грунт текучепластичной и полутвердой консистенции, происходит увеличение крутящего момента на 35 и 50 % соответственно.

Таким образом, разработанная методика оценки крутящего момента $M_{кр}$ позволит в даль-



Рис. 4. Модель винтовой двухлопастной сваи для лабораторных экспериментальных исследований

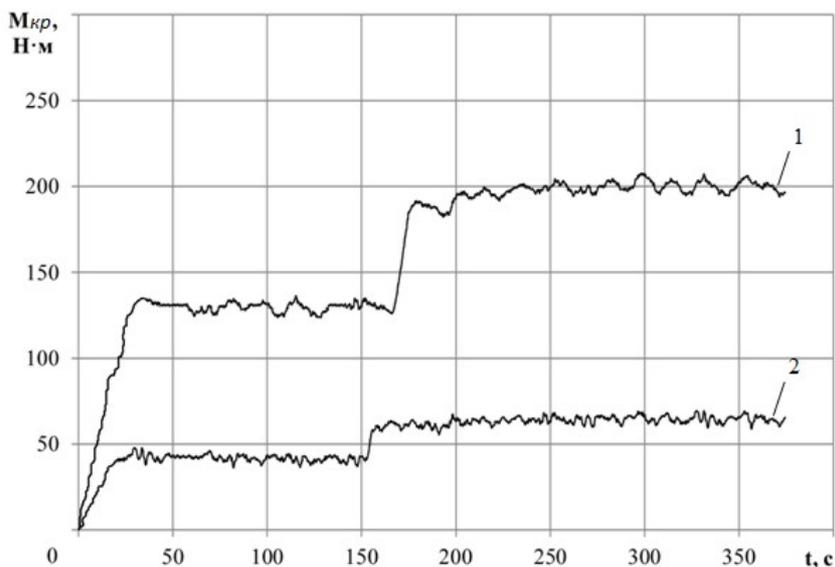


Рис. 5. График изменения величины крутящего момента $M_{кр}, \text{ Н}\cdot\text{м}$, от времени установки винтовой двухлопастной сваи в глинистый грунт $t, \text{ с}$: 1 – полутвердой; 2 – текучепластичной консистенции

Теория расчета строительных конструкций

нейшем подготовить рекомендации по определению несущей способности винтовых двухлопастных свай по грунту.

Выводы

1. На основе лабораторных экспериментальных исследований разработана методика оценки крутящего момента, возникающего при ввинчивании винтовых двухлопастных свай в глинистый грунт. Методика основана на использовании тензодинамометра специальной конструкции, патентная новизна которого защищена патентом РФ на полезную модель.

2. Результаты экспериментальных исследований работы двухлопастных винтовых свай в глинистом грунте и данные о крутящем моменте $M_{кр}$, возникающем при их ввинчивании, могут быть использованы для разработки рекомендаций для оценки несущей способности винтовых свай по грунту.

Литература

1. History repeats. Screw piles come of age – again / A.J. Lutenege, J. Kempker // *Structural Engineer*. – 2009. – № 1. – P. 26–29. – Режим доступа: www.foundationtechnologies.com/documents/HelicalPileArtical41420090001.pdf
2. Chance. Power-installed Foundations, Guy Anchors and Installing Equipment / *Bulletin 01-9707*. – Rev. 3/07. – P. 12–13. – Режим доступа: www.abchance.com/resources/technical/01-9707.pdf
3. Perko, H.A. Energy Method for Predicting the Installation Torque of Helical Foundations and Anchors / H.A. Perko // *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*. – ASCE, 2000. – P. 342–352.
4. Deardorff, D.A. Torque Correlation Factors for Round Shaft Helical Piles / D.A. Deardorff // *Deep Foundations Institute Symposium on Helical Pile Foundations*. – 2007. – 20 p.
5. Железков, В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства / В.Н. Железков. – СПб.: Прагма, 2004. – 125 с.
6. Пономаренко, Ю.Е. Особенности нормативной документации при проектировании фундаментов из винтовых анкеров и свай / Ю.Е. Пономаренко, Н.Б. Баранов // *ОФМГ*. – 2013. – № 1.
7. Сваи и свайные фундаменты: конструкции, проектирование и технологии / Р.А. Мангушев, А.Л. Готман, В.В. Знаменский, А.Б. Пономарев; под ред. Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2015. – 311 с.
8. Hoyt, R.M. Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil / R.M. Hoyt and S.P. Clemence // *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 1989. – Vol. 2. – P. 1019–1022.
9. Икрин, В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: Учебник для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В.А. Икрин. – М.: Изд. АСВ, 2004. – 424 с.
10. Пат. 151668 РФ, МПК G01L 1/22. Динамометр для измерения крутящих моментов при ввинчивании металлических свай / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов, С.Ю. Павлов, М.М. Скоморохов, Е.Е. Рихтер. – Оpubл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
11. Полищук, А.И. Обоснование конструктивного решения винтовых свай для фундаментов быстровозводимых временных зданий / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов // *Вестник ПНИПУ*. – 2015. – № 4. – С. 62–75.

Максимов Федор Александрович, аспирант кафедры «Основания и фундаменты», Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар), mfa86@mail.ru

Поступила в редакцию 29 ноября 2016 г.

DOI: 10.14529/build170102

THE TORQUE ESTIMATION METHOD DURING HELICAL PILES INSTALLATION

F.A. Maksimov, asv93@inbox.ru

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

The article presents a torque estimation method during two-bladed helical piles installation. A strain dynamometer was developed to measure the moment generated in real conditions during installation. This structure is made of steel pipe with installed strain gauge transducers (hereinafter referred to as strain gages) set at an angle of 45° to the longitudinal axis of strain dynamometer and connected to the measurement system. The measurement block scheme was used for electrical signals

registration from the strain gauges, including dynamometers with glued strain gauges, a strain gauge amplifier 8АНЧ-26, an analog-to-digital converter E140, jumper cables, and a personal computer. Dynamometer deformation is perceived by the transducers and converted to a voltage change in the measuring diagonal of the bridge circuit. The torque value is defined by calibration dependency $M = f(\Delta U)$. The studies on torque evaluation were performed in laboratory conditions during installation of two-bladed screw piles in clay soil of soft and stiff consistency. The developed methodology for estimating the torque enables us to come up with recommendations for determining the load bearing capacity of two-bladed helical piles. It's found out that adding a second blade into the pile shaft provides increased torque in clay soil of soft and stiff consistency by 35–50 %, respectively.

Keywords: torque, two-bladed screw piles, strain dynamometers, strain gauge transducers, clay soil, constructive solutions, laboratory studies.

References

1. Lutenegeger A.J., Kempker J. [History Repeats. Screw Piles Come of Age – Again]. [Structural Engineer]. 2009, no. 1, pp. 26–29. Available at: www.foundationtechnologies.com/documents/HelicalPileArtical41420090001.pdf
2. [Chance. Power-installed Foundations, Guy Anchors and Installing Equipment]. Bulletin 01-9707, Rev. 3/07, pp. 12–13. Available at: www.abchance.com/resources/technical/01-9707.pdf
3. Perko H.A. [Energy Method for Predicting the Installation Torque of Helical Foundations and Anchors]. [New Technological and Design Developments in Deep Foundations]. ASCE, 2000, pp. 342–352.
4. Dearthoff D.A. [Torque Correlation Factors for Round Shaft Helical Piles]. [Deep Foundations Institute Symposium on Helical Pile Foundations]. Nov. 2007, 20 p.
5. Zhelezkov V.N. *Vintovye svai v energeticheskoy i drugikh otraslyakh stroitel'stva* [Screw Piles in the Energy and Other Sectors of the Construction]. St. Petersburg, Pragma Publ., 2004. 125 p.
6. Ponomarenko Yu.E., Baranov N.B. [Features of the Standard Documentation for the Design of Foundations of the Screw Anchors and Piles]. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov* [Base, Foundation and Soil Mechanics]. Moscow, «Economics, Construction, Transport» Publ., 2013, no. 1, pp. 28–31. (in Russ.).
7. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskiy V.V., Ponomarev A.B. *Svai i svaynye fundamente: konstruksii, proektirovanie i tekhnologii* [Piles and Pile Foundations: Construction, Design and Technology]. Moscow, ASV Publ., 2015. 311 p.
8. Hoyt R.M., Clemence, S.P. [Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil]. [Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering], 1989, vol. 2, pp. 1019–1022.
9. Ikrin V.A. *Soprotivlenie materialov s elementami teorii uprugosti i plastichnosti* [Strength of Materials with Elements of the Theory of Elasticity and Plasticity]. Moscow, ASV Publ., 2004. 424 p.
10. Polishchuk A.I., Maksimov F.A., Pavlov S.Yu., Skomorokhov M.M., Rikhter E.E. *Dinamometr dlya izmereniya krutyashchikh momentov pri vvinchivanii metallicheskih svay* [Dynamometer for Measuring Torque When Screwing Metal Piles]. Patent RF, no. 151668 RF MPK G01L 1/22, 2015.
11. Polishchuk A.I., Maksimov F.A. [Justification of Constructive Solutions of Screw Piles for Foundations Prefabricated Temporary Buildings]. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*, 2015, no. 4. pp. 62–75. (in Russ.).

Received 29 November 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Максимов, Ф.А. Методика оценки крутящего момента при устройстве винтовых свай / Ф.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 14–19. DOI: 10.14529/build170102

FOR CITATION

Maksimov F.A. The Torque Estimation Method During Helical Piles Installation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 1, pp. 14–19. (in Russ.). DOI: 10.14529/build170102