

**Соболевский Дмитрий Юрьевич**, д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

**Уласик Тамара Михайловна**, канд. техн. наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

**Балыш Артем Валерьевич**, магистр техн. наук, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

## **ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМА «СТЕСНЕНИЯ» НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА НА КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОДИНОЧНОЙ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ**

© РУП «Институт БелНИИС», 2018  
Institute BelNIIS RUE, 2018

### **АННОТАЦИЯ**

*Выполненные исследования показывают, что для различных условий определения контактного трения на боковой поверхности фундаментов глубокого заложения, как правило, для одного и того же несвязного грунта получают различные значения, иногда отличающиеся на порядок. Основной причиной таких существенных расхождений является «стесненная» дилатансия. Явление «стесненной» дилатансии связано с мобилизацией контактного сопротивления грунта сдвигу и формирования слоя разрушения с начальной плотностью сложения зерен несвязного грунта. В узкой полосе, расположенной вдоль контактной поверхности, формируются дополнительные напряжения, связанные, в первую очередь, с переупаковкой зерен несвязного грунта. Влияние, которое оказывают на условия сдвига по боковой поверхности, например, сваи, сами несвязные грунты, выражается в мобилизации контактного трения, которое, в свою очередь, зависит от состояния массива несвязного грунта. Объемное «стеснение» несвязного грунта влияет на формирование контактного трения, и это было доказано нами в предыдущих исследованиях, когда для увеличения несущей способности сваи мы создавали дополнительные условия «стеснения» в виде погружаемой тонкостенной оболочки, которая располагалась*

*относительно моделируемой сваи соосно. Уточнение того, как распределяются контактные напряжения по боковой поверхности одиночной буронабивной сваи, было выполнено нами в настоящей работе с помощью моделирования, с использованием программы Plaxis 3D Foundation. Полученные результаты указывают на неравномерный характер распределения контактного трения по боковой поверхности одиночной буронабивной сваи и подтверждают, что при изменении условий объемного «стеснения» происходит увеличение значений контактного трения.*

**Ключевые слова:** «стесненная» дилатансия, напряжение, несвязный грунт, несущая способность, касательное напряжение.

**Для цитирования:** Соболевский, Д. Ю. Влияние объема «стеснения» несвязного грунта на контактное сопротивление по боковой поверхности одиночной буронабивной сваи / Д. Ю. Соболевский, Т. М. Уласик, А. В. Балыш // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 250–260. <https://doi.org/10.23746/2018-10-16>

**Dmitry Sobolevsky**, DSc in Engineering Science, Professor, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Tamara Ulasik**, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Artem Balysh**, Master in Engineering Science, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

## **THE SANDY GROUND VOLUME OF THE “CONSTRAINT” INFLUENCE ON THE CONTACT RESISTANCE AT THE SIDE SURFACE OF A SINGLE BORED PILE**

### **ABSTRACT**

*The performed research shows that for different conditions for determining contact friction on the side of the foundation, as a rule, for*

*the same non-cohesive soil of different values, sometimes differing by an order of magnitude. “Constrained” dilatancy is the main cause of such significant discrepancies. The phenomenon of “constrained” dilatancy is associated with the mobilization of the contact resistance of the soil to shear and the formation of a layer of destruction with the initial density of the addition of grains of coherent soil. In a narrow strip located along the contact surface, additional stresses are formed, these stresses, associated primarily with the repacking of grains of non-cohesive soil. The influence that the shear conditions have on the lateral surface, for example, piles, incoherent soils themselves, is expressed in the mobilization of contact friction, which, in turn, depends on the state of the incoherent array of non-cohesive soils. Volumetric “constraint” of the soil affects the formation of contact friction, and this has been proven by us in previous research. In these research, in order to increase the bearing capacity of the pile, we created additional conditions of “constraint” in the form of a submerged thin-walled shell. This shell is located relative to the simulated pile coaxially. We clarified how the contact stresses are distributed along the lateral surface of a single bored pile and was performed by us in the present work using modeling, using the Plaxis 3D Foundation program. The results obtained by us indicate the uneven distribution of contact friction along the lateral surface of a single bored pile. The same results confirm that when the conditions of bulk “constraint” change, the values of contact friction increase.*

**Keywords:** “constrained” dilatancy, stress, non-cohesive soil, bearing capacity, tangent stress.

**For citation:** Sobolevsky D., Ulasik T., Balysh A. The sandy ground volume of the “constraint” influence on the contact resistance at the side surface of a single bored pile. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 250–260. <https://doi.org/10.23746/2018-10-16> (in Russian)

## **ВВЕДЕНИЕ. КОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ В НЕСВЯЗНОМ ГРУНТЕ**

Контактное трение в несвязном грунте является важной характеристикой, влияющей на величину несущей способности

фундаментов глубокого заложения. В свою очередь, увеличение несущей способности, к примеру, свайных фундаментов, по-прежнему является актуальной задачей геотехники. В соответствии с [1] повышение несущей способности буронабивной сваи можно получить при увеличении длины сваи. В таком случае есть ли какие-то другие факторы, влияющие на увеличение несущей способности сваи, без увеличения ее длины? В Еврокоде 7 ТКП Е 1997-1-2009 [2] отмечается, что должно быть учтено «любое взаимодействие между конструкцией и грунтом». Проведенные нами исследования были направлены на моделирование работы одиночной буронабивной сваи при создании условий дополнительного «стеснения», в которых реализуется контактное трение на боковой поверхности сваи. Поставленные в исследовании задачи были ориентированы на моделирование случаев работы одиночной буронабивной сваи в условиях дополнительного «стеснения» и без него. Грунт для моделирования, в соответствии с Еврокодом 7 ТКП Е 1997-2-2009 [3], был выбран нескальный.

В соответствии с ТКП 45-5.01-256-2012 [4, табл. 6.2] значение расчетного сопротивления  $i$ -го слоя грунта на боковой поверхности для песка средней крупности составляет 45–68 кПа. Исследования Соболевского Д. Ю. [5], посвященные несущей способности несвязных дилатирующих грунтов, указывают на существенное различие (увеличение до 62–115 кПа) в значениях контактного трения для тех же песков средней крупности, вычисленных с учетом явления дилатансии. В частности, в монографии [5, с. 103] рассматриваются сваи в скважинах, пробуренных под защитой обсадных труб или без них, а также устроенные путем простого заполнения скважины бетоном с вибрированием и без него.

В монографии [5, с. 102] отмечено, что «...при испытании буровых свай с инъецируемым стволом и инъекционных анкеров фиксируются контактные трения...250–400 кПа, измеряемые при...значениях нормального давления» значительно меньших. Такое соотношение указывает, что если придерживаться условия прочности Кулона, угол внутреннего трения несвязного грунта  $\varphi$  намного превышает  $45^\circ$ .

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение;

$\sigma$  – нормальное напряжение;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Тогда следует учесть, что при «стесненной» дилатансии в формуле (1), в соответствии с проведенными исследованиями [5–7], появляется так называемая дилатантная составляющая сдвига  $\tau_d$  и формула (1) преобразуется в

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + \tau_d. \quad (2)$$

Объяснением такому явлению служит «стесненная» дилатансия [5, с. 17], так как при разрушении грунта в случае «стесненной» дилатансии на условия сдвига и прочность грунта неизменно влияют «факторы деформирования среды за пределами поверхности разрушения».

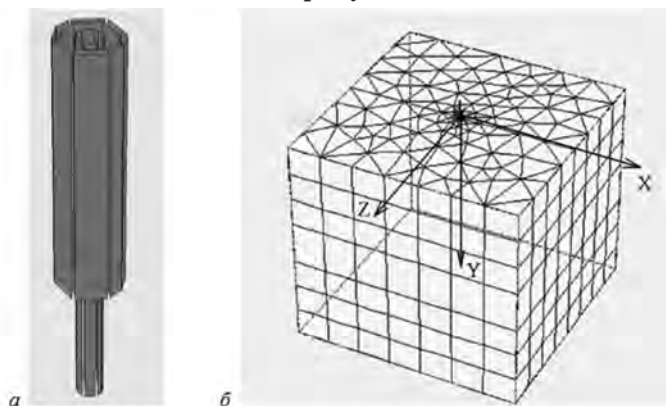
Дилатантные напряжения играют ключевую роль в формировании реальных значений контактного трения на боковой поверхности фундаментов глубокого заложения [6], так как несвязный грунт является той средой, которая способна влиять на этот процесс.

Таким образом, анализируя данные об имеющихся существенных расхождениях значений расчетного сопротивления на боковой поверхности свай для песка средней крупности, с целью определения и уточнения контактного трения нами были выполнено моделирование работы одиночной буронабивной сваи в несвязном грунте с помощью программы Plaxis 3D Foundation, которая предназначена для комплексных расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости геотехнических объектов методом конечных элементов в условиях пространственной задачи.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОДИНОЧНОЙ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ В УСЛОВИЯХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО «СТЕСНЕНИЯ» И БЕЗ НЕГО**

Для моделирования одиночной буронабивной сваи мы воспользовались программой Plaxis 3D Foundation, которая позволила построить пространственную модель сваи и оценить ее работу в однородном несвязном грунте под центрально приложенной нагрузкой. Сравнительный вариант моделирования представляет собой случай дополнительного «стеснения» работы одиночной буронабивной сваи посредством погруженной соосно свае

тонкостенной оболочки. Оболочка погружалась не на всю длину сваи. Свая моделировалась длиной 6 м, моделируемая оболочка имеет длину 4 м. Общий вид моделирования дополнительного «стеснения» сваи показан на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Модель одиночной буронабивной сваи длиной 6 м и закрывающей ее оболочки длиной 4 м в программе Plaxis 3D Foundation (а) и область моделирования (б)

В соответствии с выполненными ранее исследованиями [7] для заданных параметров области моделирования  $Z_{\min} = -8$  м,  $Z_{\max} = +8$  м;  $X_{\min} = -8$  м,  $X_{\max} = +8$  м,  $Y_{\max} = 15$  м были использованы следующие характеристики грунта:  $E_{\text{гр}} = 20$  МПа,  $\nu = 0,3$ ,  $\varphi = 34^\circ$ ,  $\psi = 4^\circ$ ,  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup> (для модели пластического разрушения Мора-Кулона).

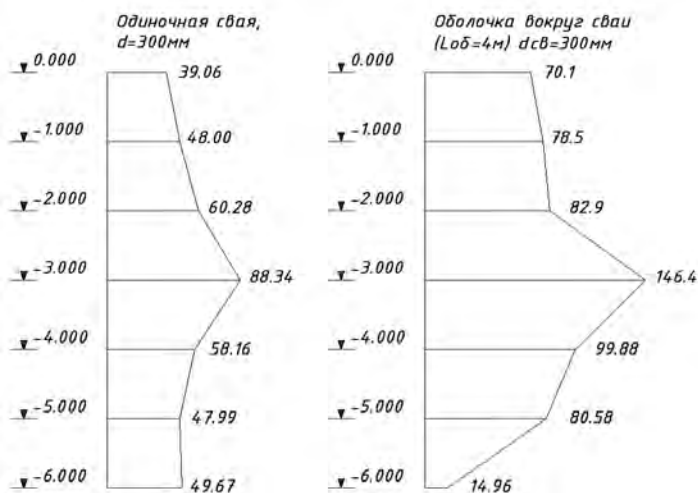
Свая моделировалась длиной  $l = 6$  м, диаметром  $d_{\text{св}} = 300$  мм,  $E = 40$  ГПа,  $\gamma = 24$  кН/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,2$  (рассматривался линейно деформируемый изотропный материал).

Оболочка, закрывающая сваю и создающая дополнительное «стеснение», то есть моделирующая «стеснение» горизонтальных перемещений грунта, имеет следующие параметры: диаметр оболочки в соотношении с диаметром сваи  $D = 3d_{\text{св}} = 900$  мм, толщина стенки оболочки  $t_{\text{ст}} = 10$  мм,  $E = 40$  ГПа,  $\nu = 0,2$ ,  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>.

Величина нагрузки, которая была центрально приложена к свае, составила 700 кН. Продольные усилия в стволе сваи на глубине 3 м составили 538 кН, для случая работы одиночной сваи, без дополнительного «стеснения», а контактное трение составляет

88,34 кПа, что соответствует максимальному значению на эпюре. На рисунке 2 показаны эпюры величины контактного трения при моделировании работы одиночной сваи и сваи, работающей в условиях дополнительного «стеснения» (свая и оболочка перемещаются одинаково).

Эпюры сил трения по боковой поверхности сваи при нагрузке на сваю 700кН



**Рисунок 2.** Эпюры сил трения по боковой поверхности сваи в условиях работы одиночной сваи и при наличии фактора дополнительного объемного «стеснения» – с соосно погруженной оболочкой

На рисунке 2 характерной точкой является контактное трение в 146,4 кПа, что соответствует наличию дополнительного «стеснения» на глубине расположения ствола сваи 3 м. Зафиксировано также большое значение контактного трения (99,88 кПа) на глубине 4 м, что соответствует глубине погружения тонкостенной оболочки. Затем контактное трение заметно падает. Очевидно, что дополнительные условия «стеснения» сваи могут существенно повлиять на контактное трение, в особенности на участке ствола сваи, который закрыт соосно погруженной оболочкой.

Продольные усилия в стволе сваи при условии дополнительного «стеснения» уменьшаются, и на глубине 4 м они составляют 330 кН, для одиночной сваи, на той же глубине – 469 кН.

Характерной особенностью дополнительного объемного «стеснения» является существенное увеличение сил трения по поверхности сваи на глубину, равную длине оболочки, на что указывают эпюры сил трения на рисунке 2.

Сравнительные результаты по определению контактного трения приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Расхождения в значениях контактного трения по боковой поверхности сваи в песке средней крупности**

Отметка по длине сваи, м	Среднее значение расчетного сопротивления <i>i</i> -го слоя грунта, кПа	Превышение силы трения по боковой поверхности для одиночной сваи с дополнительным «стеснением», кПа
0	0	70,1
-1,0	45	33,5
-2,0	55	27,9
-3,0	60	86,4
-4,0	63	36,88
-5,0	68	12,58
-6,0	72	–

Очевидно, что вышеуказанное явление «стеснения» условий работы в несвязном грунте ведет к повышению несущей способности одиночной буронабивной сваи.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные нами исследования показывают, что условие дополнительного «стеснения» может существенно повлиять на величину силы трения по боковой поверхности одиночной сваи. Подобное явление служит примером создания условий для дополнительной мобилизации контактного трения для фундаментов глубокого заложения, устраиваемых в несвязном грунте. Описанные и изученные особенности проявления дилатансии в несвязном грунте [5–10] доказывают, что «стесненная» дилатансия является фактором повышения несущей способности свайных фундаментов.

Различные технологии возведения фундаментов глубокого заложения с точки зрения проявления «стесненной» дилатансии [5]



для несвязных грунтов так или иначе способствуют мобилизации контактного трения, и определяющими характеристиками при этом остаются крупность несвязного грунта, начальная плотность сложения грунтового массива, минеральный состав зерен, равно как и прочностные характеристики [5, 8–10].

Неравномерное распределение сил трения по боковой поверхности сваи, моделируемой с соосно расположенной оболочкой, отличается от предположения, что силы трения в несвязном грунте с глубиной увеличиваются практически пропорционально.

С практической точки зрения объемное «стеснение» в несвязном грунте в пределах свайного поля друг для друга создают сами сваи. Актуальной задачей дальнейших исследований является нахождение оптимального расположения свай для создания наиболее эффективного объемного «стеснения», максимальной мобилизации контактного трения на боковой поверхности свай, и, как следствие, повышение несущей способности свайных фундаментов.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Проектирование и устройство буронабивных свай : П 13-01 СНБ 5.01.01-99. – Введ. 01.01.02.
2. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила : ТКП EN 1997-1-2009. – Введ.10.12.09.
3. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 2. Исследования и испытания грунта : ТКП EN 1997-2-2009. – Введ.10.12.09.
4. Основания и фундаменты зданий и сооружений Сваи забивные. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-256-2012. – Введ. 01.07.12.
5. Соболевский, Д. Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
6. Уласик, Т. М. Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов / Т. М. Уласик // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 30–33.

7. Уласик, Т. М. Моделирование работы одиночной буронабивной сваи в условиях дополнительного «стеснения» / Т. М. Уласик, А. В. Балыш // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 43–48.
8. Соболевский, Д. Ю. Сопротивление сдвигу несвязного грунта по боковой поверхности инъекционных анкеров и свай / Д. Ю. Соболевский, О. В. Попов // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала: межвуз. сб. научн. тр. – Пермь, 1987. – С. 78–85.
9. Popov, O. The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils / O. Popov // Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin. – Bratislava, 1997. P. 113–114.
10. Sobolevsky, D. Yu. Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations / D. Yu. Sobolevsky // A. A. Balkema publ. – Rotterdam, 1995. 243 p.

*Статья поступила: 05.12.2018*

## REFERENCES

1. *Design and construction of bored piles* : П 13-01 СНБ 5.01.01-99 [P 13-01 SNB 5.01.01-99]. – Activ. 01.01.02. (rus)
2. *Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1. General rules* : ТКП EN 1997-1-2009 [TKP EN 1997-1-2009]. – Activ. 10.12.09. (rus)
3. *Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2. Ground investigation and testing* : ТКП EN 1997-2-2009 [TKP EN 1997-2-2009]. – Activ. 10.12.09. (rus)
4. *Driven piles. The rules of the designing and device* : ТКП 45-5.01-256-2012 [TKP 45-5.01-256-2012]. – Activ. 01.07.12. (rus)
5. Sobolevsky D. Y. Prochnost I nesushchay sposobnost dilatiruyshchego grunta [Strength and load bearing capacity of the dilating soil]. Minsk: «Navuka I tekhnika», 1994. 232 p. (rus)
6. Ulasik T. M. *Herald of Polotsk state university*. 2015. No. 16. Pp. 30–33. (rus)

7. Ulasik T. M., Balysh A. V. *Herald of Polotsk state university*. 2017. No. 8. Pp. 43–48. (rus)
8. Sobolevsky D. Y. Soprotivlenie sdvigu nesvyasnogo grunta po bokovoy poverkhnosti inektsionnykh ankerov I svay [Resistance to shear of non-cohesive soil along the lateral surface of injection anchors and piles]. *Bases and foundations in the geological conditions of the Urals*. Perm:1987. Pp. 78-85 (rus)
9. Popov, O. The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils / O. Popov // *Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin.* – Bratislava, 1997. P. 113–114.
10. Sobolevsky, D. Yu. *Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations* / D. Yu. Sobolevsky // A. A. Balkema publ. – Rotterdam, 1995. 243 p.

*Received: 05.12.2018*