

5. Методы полевых испытаний сваями: ГОСТ 5686-94. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 1995. – 36 с.

6. Кравцов, В.Н. Экспериментальное исследование несущей способности забивных свай в намыльном грунте / В.Н. Кравцов, Г.В. Уткина, В.Ф. Давылов // Основания и фундаменты: сборник научных трудов. – Минск: ИСИА Госстроя БССР, 1981. – С. 34-41.

7. Методы статистической обработки результатов испытаний: ГОСТ 20522-96. – М.: Минстрой РФ, 1996. – 14 с.

УДК 624.15:692.115+624.012.3

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТВОЛА БУРОНАБИВНОЙ СВАИ ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ БЕТОНА НА НАПРЯГАЮЩЕМ ЦЕМЕНТЕ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

Невейков А.Н., Пойта П.С., Шведовский П.В.

**Введение.** В современных условиях фундаментостроения наиболее перспективными являются буронабивные свайные фундаменты. Хотя такие сваи и имеют несколько меньшую несущую способность (на 1 м<sup>3</sup> бетона), чем забивные сваи, но высокие темпы их устройства и др. преимущества обеспечивают значимый экономический эффект [1, 2].

Как показывают результаты испытаний буронабивных свай в различных грунтовых условиях, их несущая способность в значительной степени определяется долей нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью. Следовательно, обеспечение плотного контакта сваи с грунтом по всей длине является определяющим для повышения несущей способности сваи.

Одним из способов обеспечения плотного контакта является применение бетонов на основе напрягающего цемента (НЦ), расширяющихся в процессе схватывания, что соответственно обеспечивает как благоприятные условия работы сваи, так и создает преднапряжение грунта не только по боковой поверхности, но и под пятой сваи.

Незначительный объем применения бетона на НЦ в фундаментостроении объясняется технологическими трудностями, связанными с получением такого бетона и несовершенными методами расчета. Вместе с тем, очевидно, что проблема проектирования свайных фундаментов из бетонов на НЦ не может быть сведена только лишь к подбору приемлемого состава бетона. Не менее существенное значение имеет напряженно-деформированное состояние как самой сваи, так и грунта, окружающего ее в процессе изготовления, твердения бетона и работы под нагрузкой.

**Взаимодействие боковой поверхности буронабивной сваи и грунта.** Наиболее распространенной нагрузкой, действующей на сваи, является вертикальная статическая нагрузка, которая передается и распределяется на окружающий сваю грунтовый массив через боковые грани и острие. Значение несущей способности ( $F_d$ ) определяется как сумма нагрузок, воспринимаемых пятой ( $F_{dv}$ ) и боковой поверхностью ( $F_{du}$ ):

$$F_d = F_{dv} + F_{du} \quad (1)$$

На работу буронабивной сваи под нагрузкой оказывает влияние большое количество факторов – начиная от способа устройства сваи и заканчивая величиной прикладываемой к свае нагрузки, величина которой в значительной степени определяется долей нагрузки, воспринимаемой боковой поверхностью.

При использовании литой бетонной смеси за счет проникновения цементного молока в грунт контактного слоя и его прилипания к стволу сваи, при действии вертикальной нагрузки осадка сваи проявляется через сдвиг грунта по грунту. Поэтому как показано во многих работах [3, 4, 5], сопротивление грунта по боковой поверхности ствола буронабивной сваи ( $f$ ) можно определять по закону трения Кулона, используя вместо характеристик поверхностного трения прочностные характеристики грунта, т.е.

$$f = P \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – удельное сцепление.

Радиальные горизонтальные напряжения на ствол сваи ( $P$ ) (рисунок 1) формируются под влиянием [3]:

- природного состояния грунта ( $P_{r1}$ );
- радиальных горизонтальных напряжений ( $P_{r1}$ ) возникающих при изготовлении сваи;
- усадки бетона;
- дополнительных радиальных напряжений при загрузке сваи вертикальной нагрузкой (от поперечного расширения ствола сваи ( $P_{r2}$ ) и дополнительного обжатия ствола ( $P_{r3}$ ), возникающего от передачи нагрузки силами трения по боковой поверхности).

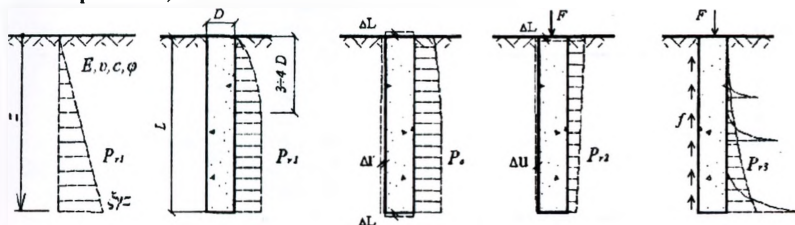


Рисунок 1 – Формирование радиальных напряжений на ствол сваи

Если использовать в качестве материала сваи бетон на НЦ, то необходим дополнительный учет давления от расширения бетона ( $P_c$ ) сваи в процессе твердения, так как при твердении напрягающего бетона происходит расширение тела сваи на величину, зависящую от энергоактивности напрягающего цемента. Величина свободного расширения достигает 1,5–2% [6] и зависит от соотношения компонентов в цементе, тонкости помола цемента, минералогического и химического состава клинкера, класса и состава бетона, водоцементного отношения, температурных условий и ограничивающих связей [7].

Принимая во внимание, что радиальные деформации бетона сваи и радиальные деформации стенок скважины будут равны, то радиальное давление на стенки скважины бетона на НЦ в упрощенном виде можно определить по формуле Ляме. Оценка величин этого давления и влияние ее на напряженно-деформированное состояние грунта, а также сравнительные модельные испытания сваи выдерживающей нагрузкой (рис. 2), представлены в наших работах [6, 8, 9].

**Напряженно-деформированное состояние ствола буронабивной сваи.** Бетон на НЦ в результате расширения под влиянием внешнего ограничения получает напряжения сжатия, арматура – растяжения, а железобетонная конструкция становится предварительно напряженной. В неармированном бетоне на напрягающем цементе при твердении в стесненных условиях возникают напряжения сжатия в результате распора при расширении, а перемещения в продольном

направлении приводит к мобилизации контактного сопротивления сдвигу по боковой поверхности сваи (рис. 3), определяемого по формуле (2) при  $P = P_{rl} + P_c$

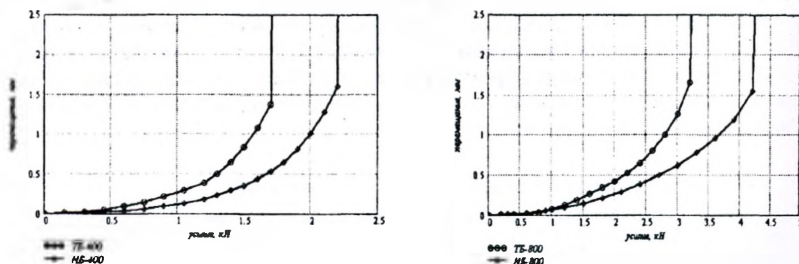


Рисунок 2 – Осредненные результаты серии испытаний моделей буронабивных свай Ø50мм длиной 400 и 800мм из тяжелого бетона (ТБ) и бетона на НЦ (НБ) [9]

Для бетонов с большой величиной свободного расширения при отсутствии достаточной величины внешнего ограничения может происходить образование микротрещин по контакту «заполнитель – активная матрица» и разуплотнение структуры (рис. 4), что требует оценки ограничивающего влияние грунта на ствол буронабивной сваи при отсутствии арматуры.

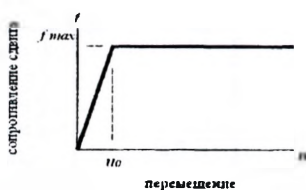


Рисунок 3 – Идеализированная диаграмма сдвига



Рисунок 4 – Разрушение модели сваи из бетона на НЦ

На основании работы [10] по изучению ограничивающего влияния со стороны основания на возникающие усадочные напряжения в бетонных дорожных покрытиях, нами был принят ряд допущений, применимых для расчета свай:

- бетон – абсолютно упругий материал;
- деформации расширения имеют постоянный закон распределения по всей длине сваи;
- грунт вдоль боковой поверхности сваи – однородный;
- сопротивление грунта по боковой поверхности сваи подчиняется закону Кулона.

В зависимости от типа сваи максимальные сжимающие напряжения (само-напряжение) в стволе могут располагаться на различных расстояниях от середины сваи (рис. 5). Для сваи трения развитие перемещений будет происходить в обе стороны от сечения с максимальным напряжением.

В соответствии с диаграммой, представленной на рисунке 3, сопротивление сдвигу по боковой поверхности сваи ( $f$ ), в зависимости от величины перемещения, можно выразить следующим образом:

$$\text{при } 0 \leq u < u_0, \quad f = \frac{f_{\max}}{u_0} \cdot u, \quad (3a)$$

$$\text{при } u \geq u_0, \quad f = f_{\max}, \quad (3б)$$

где  $u$  – перемещение сваи относительно грунта в произвольной точке.

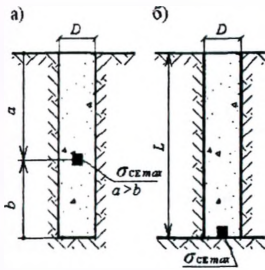


Рисунок 5 – Максимальное самонапряжение в свае: а – свая трения; б – свая-стойка

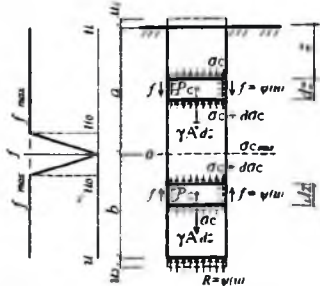


Рисунок 6 – Расчётная схема сваи

Поскольку для сваи в песчаных грунтах из бетона на НЦ с величиной свободного расширения 1–2% длина участка, на котором  $0 \leq u \leq u_0$ , на порядок меньше длины участка с  $u \geq u_0$ , то в дальнейшем рассматривалось только решение применительно к (36).

Исходя из вышеизложенных допущений и принятой расчетной схемы (рис. 6), после соответствующих преобразований уравнение равновесия относительно оси  $z$ , с учетом изменения направления сопротивления по боковой поверхности, принимает вид:

$$\frac{d\sigma_c}{dz} - \frac{\gamma r \pm 2f_{max}}{r} = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_c$  – напряжения в стволе сваи;  $\gamma$  – удельный вес бетона;  $r$  – радиус сваи.

Для участка  $z \in [0, a]$ , при  $\sigma(0) = 0$  имеем:

$$\sigma_c(z) = \frac{\gamma r + 2f_{max}}{r} z, \quad (5)$$

для участка  $z \in [a, L]$ , при  $\sigma(L) = R$ :

$$\sigma_c(z) = \frac{2f_{max}L + rR - 2f_{max}z - L\gamma + 2\gamma z}{r}. \quad (6)$$

Приравнивая (5) и (6) при  $z = a$ , определяем границу с максимальным напряжением  $\sigma_{cmax}$ :

$$a = \frac{2f_{max}L + rR - L\gamma}{4f_{max}}. \quad (7)$$

Перемещение  $u$  находится из условия

$$u(z) = u_c(z) + u_c(z), \quad (8)$$

где  $u_c(z)$  – перемещение, вызванное расширением бетона;

$u_c(z)$  – перемещение от приложения внешней нагрузки.

Дифференцируя дважды (8), с учетом того, что  $\frac{du_c}{dz} = \epsilon_0$ ,  $\frac{du_c}{dz} = \epsilon_c$  имеем:

$$\frac{d^2u}{dz^2} = 0 + \frac{d\sigma_c}{dz} \cdot \frac{1}{E_c}. \quad (9)$$

Общее дифференциальное уравнение, описывающее деформацию сваи от расширения и внешней нагрузки, получаем подстановкой (4) в (9)

$$\frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{\gamma r \pm 2f_{max}}{E_c r} = 0. \quad (10)$$

Для участка сваи  $z \in [0, a]$ , при  $u'(0) = -\varepsilon_0$  и  $u(a) = 0$  имеем:

$$u(z) = -\frac{(a-z)((a+z)(2f_{max} + \gamma r) - 2r\varepsilon_0 E_c)}{2rE_c} z, \quad (11)$$

для участка сваи  $z \in [a, L]$ , при  $u'(L) = -\frac{R}{E_c} + \varepsilon_0$  и  $u(a) = 0$ :

$$u(z) = -\frac{((a-z)(-2af_{max} + 4f_{max}L - 2f_{max}z + ar\gamma - 2Lr\gamma + 2\gamma rz + 2r\varepsilon_0 E_c - 2rR))}{2rE_c}. \quad (12)$$

где  $E_c$  – модуль упругости бетона;  $\varepsilon_0$  – относительная деформация свободного расширения бетона;  $R$  – расчетное сопротивление под нижним концом сваи.

Результаты расчета оценим на конкретном примере. Для расчетов принята буронабивная свая из бетона на НЦ и грунт с характеристиками:

свая –  $L = 6$  м;  $r = 0,2$  м;  $E_c = 30000$  МПа;  $\varepsilon_0 = 2\%$ ; грунт – песок мелкий средней плотности,  $\varphi = 36^\circ$ ;  $c = 4$  кПа;  $E = 30,0$  МПа;  $\rho = 1,78$  т/м<sup>3</sup>.

Сопротивление грунта по боковой поверхности  $f_{max} = 72$  кПа определено на основании решения уравнения Ляме и формулы (2). Сопротивление грунта под нижним концом сваи  $R = 1,6$  МПа принято постоянным.

В результате расчетов построены эпюры развития напряжений и перемещений вдоль ствола буронабивной сваи (рис. 7, 8).

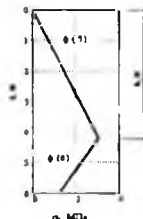


Рисунок 7 – Эпюра напряжений вдоль ствола буронабивной сваи

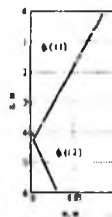


Рисунок 8 – Эпюра перемещений вдоль ствола буронабивной сваи

Анализ эпюр показывает, что полученные теоретические решения не в полной мере и не совсем достоверно отражают физическую картину работы сваи при расширении бетона на НЦ. Поэтому нами, сегодня проводятся экспериментальные исследования, которые позволят уточнить расчетные теоретические решения.

**Заключение.** Напряженно-деформированное состояние ствола буронабивной сваи из бетона на НЦ при возведении формируется как под влиянием природного состояния грунта, так и давления бетона при изготовлении и твердении. При этом перемещения ствола сваи в вертикальном направлении имеют значения близкие к свободным деформациям бетона при расширении, а напряжения в стволе сваи, выполненной без армирования, достигают значительных величин и имеют наибольшее значение в нижней части. Поэтому при проектировании, для исключения разрушения ствола сваи из бетона на НЦ, эффективно и целесообразно его использовать только в нижней половине сваи.

#### Список цитированных источников

1. Мангушев, Р.А. Современные свайные технологии: учебное пособие / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. – М.: Издательство АСВ, Спб. гос.архит.-строит. ун-т, 2007. – 160 с.
2. Ермашов, В.П. Буропрессвай: несущая способность и целесообразность применения в Беларуси / В.П. Ермашов, Н.В. Тимофей, В.И. Новик // Строительная наука и техника. – 2005. – № 2. – С. 56–63.
3. Лапшин, Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф.К. Лапшин. – Изд-во Саратовского университета, 1979. – 152 с.
4. Григорян, А.А. Экспериментальные исследования распределения напряжений в буронабивных сваях значительных размеров / А.А. Григорян, И.И. Хабибуллин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1980. – № 3. – С. 18–21.
5. Мамонов, В.М. Несущая способность буронабивных свай, изготовленных из бетонов различного состава / В.М. Мамонов, А.М. Дзагов, П.М. Ермошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 1. – С. 11–14.
6. Невейков, А.Н. Эффективность применения напрягающих бетонов для изготовления буронабивных свай / А.Н. Невейков, П.С. Пойта // Вестник БрГТУ. – 2009. – № 1 (55): Строительство и архитектура. – С. 27–30.
7. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкции при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест: изд. БПИ, 1998. – 246 с.
8. Пойта, П.С. Эффективные конструкции свайных фундаментов в инженерно-геологических условиях Республики Беларусь / П.С. Пойта, П.В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 24–25.
9. Пойта, П.С. Напряженно-деформированное состояние грунтового массива вокруг ствола буровой свай / П.С. Пойта, Т.П. Шалобьта, П.В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 26–28.
10. Zhang J., Li V. Influence of Supporting Base Characteristics on Shrinkage-Induced Stresses in Concrete Pavements. // Journal of Transportation Engineering. – 2001. – Vol. 127. – P. 55–61.

УДК 624.1+624.131

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ КВАДРАТНЫЕ СТОЛБЧАТЫЕ ФУНДАМЕНТЫ НА УПЛОТНЕННЫХ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ ПОДУШКАХ: СУЩНОСТЬ И НОМЕНКЛАТУРА

Лях Ю.В.

**Введение.** Подготовка под строительство грунтовых оснований, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, была и остается и сложной, и актуальной проблемой в области фундаментостроения. Применение в этих условиях свайных фундаментов лишь частично решает эту проблему. На сегодняшний день, по данным экспертных оценок ведущих ученых и специалистов, при возведении нулевого цикла зданий и сооружений происходит существенный (до 30%) перерасход материалов и энергоресурсов. Такое положение обуславливается стандартными приемами и правилами расчета при проектировании оснований, которые обычно занимают физико-механические характеристики грунтовых сред естественного сложения, что обусловлено вероятностным по своей природе характером объемного и временного распределения свойств грунтов в инженерно-геологическом массиве. Это, в свою очередь, приводит к введению в расчеты оснований различного рода коэффициентов условий работы, запаса и т.п., в результате чего зачастую чрезмерно увеличивается величина заглубления конструкций фундаментов в грунт или неоправданно растет площадь опирания поверхности фундамента на грунтовое основание.