

## Технология возведения фундаментов – «свая в трубе»

*К.т.н., доцент Г.Я. Булатов, инженер А.Ю. Костюкова*

Проблема рационального проектирования фундаментов является одной из актуальных в области фундаментостроения. Особенно остро эта проблема стоит при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях, в которых наиболее целесообразным является применение свайных фундаментов. Доля затрат на возведение подземной части зданий и сооружений в таких грунтовых условиях составляет до 20%.

Развитие фундаментостроения направлено по пути разработки новых, экономичных и надежных конструкций фундаментов и методов их устройства, обеспечивающих повышение несущей способности грунтов в основаниях, более полного использования несущей способности материала фундаментов.

В последние годы широко возводились причальные сооружения на металлических сваях-оболочках, так как они имеют много достоинств. Стальные сваи лучше выдерживают динамические нагрузки и воспринимают большие изгибающие моменты по сравнению с железобетонными сваями. Применение открытых снизу стальных трубчатых свай способствует сокращению объемов и сроков производства строительных работ, расходов рабочей силы и материала свай за счет более рациональной работы поперечного сечения ствола под расчетной нагрузкой.

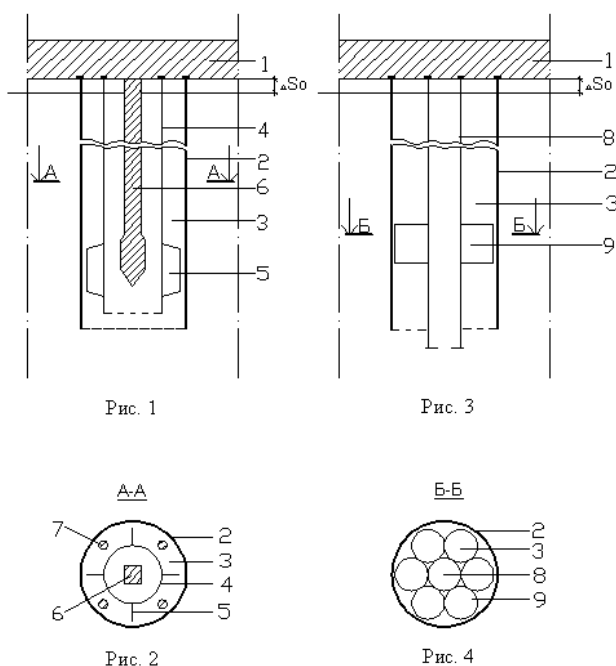
Основным недостатком металлических свай-оболочек является их коррозия. Железобетонные сваи экономичны, но их несущая способность невысока.

Технической задачей технологии было желание объединить преимущества того и другого вида свай. Один из вариантов такого объединения рассмотрен ниже.

В данной технологии погружают в грунт стальную трубчатую сваю с открытым нижним концом и возводят ростверк. После погружения трубчатой сваи в образовавшееся внутри её полости грунтовое ядро вводят продольные перегородки, а в грунтовые ячейки между перегородками и стенками сваи вводят дополнительные объемы материалов и подают дополнительную энергию, преимущественно в нижнюю часть ядра. Таким образом упрочняют грунтовое ядро, создают дополнительные радиальные сжимающие напряжения в грунте ядра, обеспечивают дополнительные трение и сцепление его со стенками сваи и превращают её в квазимонолитный фундамент глубокого заложения.

Сущность предложения поясняется чертежами. Устройство на рис. 1 и 2 содержит ростверк 1 на бетонной подготовке толщиной  $S_0$ , опирающийся на трубчатую сваю 2 и грунтовое ядро 3, в которое погружены дополнительные внутренние сваи: например, свая 4 с продольными лопастями 5 и монолитные сваи 6 и 7. На рис. 3, 4 дополнительная свая 8 снабжена утолщением в виде нескольких соединенных с ней патрубков 9, которые одновременно служат и направляющими.

В качестве дополнительных внутренних свай 4, 6, 7 и 8 могут быть применены сваи любого рода и конфигурации.



**Рис. 1 - 4. Технология возведения фундаментов – «свая в трубе»**

В качестве материалов могут быть использованы твердые (все типы свай и др. устройства), сыпучие (грунтовые, бетонные, порошковые и др.), жидкие (расширяющиеся цементные растворы и др. закрепляющие составы), газообразные (воздух, закрепляющие смеси), причем текучие материалы могут быть применены в оболочках.

В качестве энергии можно использовать тепловую и электрическую для обжига, плавления, замораживания и электрохимического закрепления грунтов ядра в полости трубчатой сваи, чем обеспечивают упрочнение и сцепление ядра со стенками сваи и исключают возможность проталкивания ядра вверх при осадке сваи под воздействием сжимающих нагрузок, передаваемых от ростверка.

Рассмотрим работу предлагаемого способа, используя рис. 1 и 2.

При погружении трубчатой сваи 2 в её полость входит грунт в виде ядра 3 цилиндрической формы, поскольку свая легко прорезает толщу грунта основания своими тонкими стенками. При этом несущая способность её по грунту будет малой. Для повышения эффективности трубчатой сваи 2 в грунтовое ядро 3 погружают вторую трубчатую сваю 4, усиленную лопастями 5, и тем самым упрочняют грунтовое ядро. Трение грунта в узких ячейках между трубами 2 и 4 тормозит его проталкивание вверх и повышает несущую способность устройства.

Дополнительно грунтовое ядро внутри трубы 4 закрепляют погружением дополнительной сваи второго порядка, например монолитной сваи 6 (рис. 1 и 2). Для закрепления ядра в ячейках между трубчатой сваем 2 и трубчатой сваем 4 с лопастями 5 в ячейки погружают дополнительные сваи третьего порядка, например, монолитные сваи 7. И в этом случае трубчатая свая 2 будет работать как монолитный фундамент глубокого заложения, поскольку весь грунт ядра будет заклинен в узком зазоре между трубами 2 и 4 и напряжен сжатием в радиальном направлении, при введении сваи 6 в грунтовое ядро трубы 4.

Устройство на рис. 3 и 4 работает следующим образом. Дополнительная свая 8 и её трубчатое утолщение в виде патрубков 9 выполняют роль перегородок и расчленяют грунтовое ядро 3 в поперечном сечении на отдельные ячейки, грунт в которых «самозапирается» за счет сил трения и сцепления со стенками патрубков 9 и тем препятствует его проталкиванию вверх. Для повышения эффекта «самозапирания» грунта патрубки могут быть выполнены изогнутыми по винтовой линии. В этом случае утолщение играет роль плиты, перекрывающей поперечное сечение грунтового ядра 3 и тем самым омоноличивающей его с трубчатой сваем 2.

Вариантом устройства перегородок может быть их выполнение в виде шпунтовых стенок.

### *Расчет площади сечения дополнительной сваи*

Дополнительная свая предназначена для получения дополнительной несущей способности по сравнению с обычной трубчатой сваем (если не произошло «самозапираение» ядра).

Расчет площади сечения дополнительной сваи проводился по методу линейно деформируемого слоя конечной толщины [1].

Как известно [10], относительная объемная деформация

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\Delta V}{V}. \quad (1)$$

В условиях невозможности бокового расширения грунта (одноосная деформация)

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z = \frac{(e_1 - e_2)}{1 + e_1} \text{ или } d\varepsilon_v = d\varepsilon_z = -\frac{de}{1 + e_1}, \quad (2)$$

где  $e_1$  и  $e_2$  – коэффициенты пористости до и после снятия нагрузки.

С другой стороны, коэффициент уплотнения (сжимаемости) для спрямленного участка компрессионной кривой

$$a = \frac{(e_1 - e_2)}{\sigma_z'' - \sigma_z'} \text{ или } a = \frac{\beta_0(1 + e_1)}{E} \text{ при } \beta_0 = \frac{(1 - \xi)(1 + 2\xi)}{1 + \xi} = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \text{ и } \mu = \frac{\xi}{1 + \xi}, \quad (3)$$

где  $\sigma_z$  – соответствующие пористостям напряжения в грунте по кривой компрессии;

$\beta_0$  – коэффициент влияния бокового давления (0,74 – супеси; 0,62 - суглинки; 0,4 – глины) [5];

$E$  - модуль деформации [5];

$\xi$  - коэффициент бокового давления грунта (для 0,35...0,75 – от рыхлого песчаного к плотному влажному глинистому) [5];

$\mu$  - коэффициент Пуассона (поперечного расширения грунта) (0,3...0,42 – от супеси к глине) [5].

Из (2) с учетом (3) имеем

$$\varepsilon_z = a \frac{(\sigma_z'' - \sigma_z')}{1 + e_1} \text{ или } \sigma_z'' = \sigma_z' + \frac{\varepsilon_z(1 + e_1)}{a}. \quad (4)$$

Эти уравнения позволяют решать многие практические задачи.

Из (1) имеем уменьшение объема грунта

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \varepsilon_z \text{ и } V_2 = V_1(1 - \varepsilon_z). \quad (5) \text{ и } (5a)$$

Для случая технологии «свая в трубе» уменьшение объема грунта однозначно описывается уменьшением площади сечения грунтового ядра (при погружении в него дополнительной сваи)

$$\Delta A = A_1 - A_2 = A_1 \varepsilon_z \text{ и } A_2 = A_1(1 - \varepsilon_z). \quad (6) \text{ и } (6a)$$

где  $\Delta A$  - площадь сечения дополнительной сваи (рис. 5)

$A_1$  и  $A_2$  – площади сечения грунта ядра соответственно до и после погружения дополнительной сваи в полость трубы.

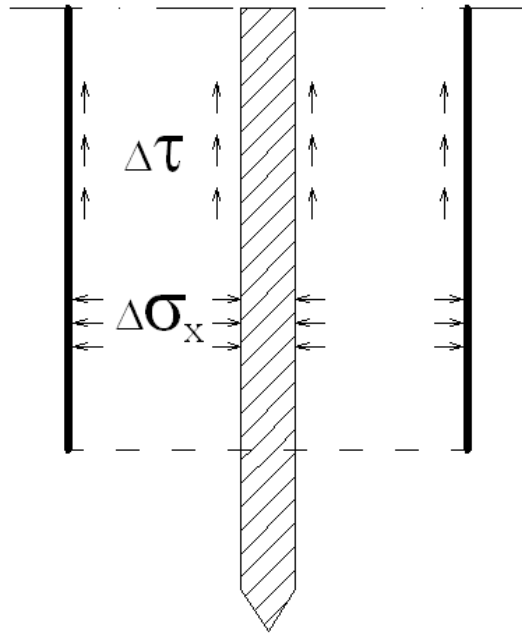


Рис. 5. Продольное сечение трубосваи

После применения подстановки

$$\varepsilon_z = 2\varepsilon_x \text{ и } \sigma_z = \sigma_x, \tag{7}$$

приведенные ниже зависимости позволяют получать приближенное значение сечения  $\Delta A$  дополнительной сваи при заданном значении нормального давления  $\sigma_x^*$  грунта ядра на стенку трубы, а также решать и обратную задачу.

$$\Delta A = 2A_1\varepsilon_x \text{ или } \varepsilon_x = \frac{0,5\Delta A}{A_1}. \tag{8}$$

$$\text{и } \varepsilon_x = \frac{0,5a(\sigma_x'' - \sigma_x')}{1 + e_1} \text{ или } \Delta\sigma_x = \sigma_x'' - \sigma_x' = \frac{2\varepsilon_x(1 + e_1)}{a}. \tag{9}$$

$$\Delta\tau_z = \Delta\sigma_x \cdot \text{tg}\phi_0. \tag{10}$$

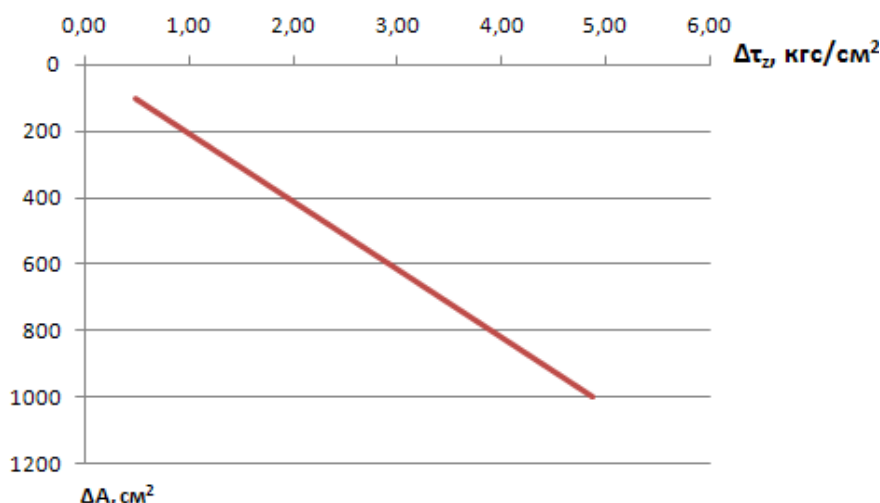
$$\Delta\tau_z = \Delta f, \tag{11}$$

где  $f$  – сопротивление на боковой поверхности сваи.

В таблице 1 сведены значения нормального давления  $\Delta\sigma_x$  грунта ядра на стенку трубы и по ним построен график зависимости (рис. 6).

Таблица 1. Значения нормального давления  $\Delta\sigma_x$  грунта ядра на стенку трубы в зависимости от площади сечения дополнительной сваи

№ п/п	$\beta_0$	$a$ , см <sup>2</sup> /кгс	$\Delta A$ , см <sup>2</sup>	$\varepsilon_x$	$\Delta\sigma_x$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\Delta\tau_z$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	0,77	0,010	100	0,004	1,50	0,49
2	0,77	0,010	200	0,009	3,00	0,97
3	0,77	0,010	300	0,013	4,50	1,46
4	0,77	0,010	500	0,022	7,50	2,44
5	0,77	0,010	1000	0,045	15,01	4,87



**Рис. 6. График зависимости значений давления  $\Delta \sigma_x$  в зависимости от площади сечения дополнительной сваи**

Отметим следующие преимущества предлагаемых технических решений:

— они сочетают в себе положительные свойства двух типов свай (стальные трубчатые и железобетонные монолитные) и уменьшают их отрицательные свойства за счёт того, что трубчатая свая будет работать как фундамент глубокого заложения с площадью опирания на грунт, равной площади сечения “брутто” трубчатой сваи. Несущая же способность такого фундамента по материалу будет складываться из несущей способности стали и железобетона;

— они позволяют создать фундамент с высокой несущей способностью с помощью обычных строительных средств;

— погружение внутренних дополнительных свай позволяет управлять степенью упрочнения грунтового ядра в процессе возведения трубчатых свай путем изменения числа дополнительных свай, их диаметра и глубины погружения;

— способ относится к щадящим окружающую среду технологиям, поскольку предусматривается лишь погружение тонкостенных (режущих) трубчатых свай. Погружение элементов сваи производится поэтапно, а влияние динамики погружения внутренних дополнительных свай при этом локализуется грунтовым ядром внутри трубчатой сваи. При этом внутренние сваи имеют и относительно меньшие параметры, и, соответственно, меньшую динамику их погружения.

### Список литературы

1. Бугров А.К. Механика грунтов: Учеб. Пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.
2. Гожа В. И., Наймарк О. С. Глубоководный причал комбинированной конструкции из стальных элементов. — СПб: «Судостроение», 2005 г.
3. Долинский А. А., Зайончковский В. И., Николаевский М. Ю., Рябинин А. В. Нетрадиционные конструкции фундаментов портовых складов, возведенных на слабых илистых грунтах прибрежно-морских отложений. / Сб. научн. тр. под ред. И. И. Сулейманова. К 120-летию ОАО «Ленморниипроект». — СПб.: «Судостроение», 2005 г., с. 324–330.
4. Иванов П.А. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1991. - 447 с.
5. Крамаренко А. В. Особенности работы свай кольцевого сечения в процессе их осевого статического нагружения. Сб. научн. тр. ОАО «Ленморниипроект». СПб., 2000 г., с 114–122.
6. СНиП 2.02.01-83\* «Основания зданий и сооружений».
7. СНиП 2.02.03.-85 «Свайные фундаменты».
8. СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов».
9. Справочник проектировщика промышленных и гражданских зданий и сооружений: расчётно-теоретический/Под редакцией А.А. Уманского. – М.: Госстройиздат, 1960. 1040 с.
10. ТСН 50-302-96 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге».