

## НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСАДКИ ВИСЯЧЕЙ СВАИ В ГРУНТЕ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА

Рассмотрена новая расчетная модель работы висячей сваи в грунте основания фундамента, в которой возникновение сил трения-сцепления на поверхности сваи в контакте с грунтом и находящаяся в покое, обосновывается микроперемещениями (деформациями) поверхностных слоев материала сваи. На этом виде расчетной модели работы сваи в грунте предложена новая теория расчета и расчетная формула определения осадки висячих свай при различных значениях нагрузки на сваю и длине сваи.

Одиночная висячая свая, осадка сваи, грунт основания, расчетные формулы осадки, предельная осадка фундамента.

Висячие сваи по СП 24.13330.2011 «Свайные основания» в свайном грунтовом основании рассчитываются по первой группе предельных состояний (по прочности материала и по несущей способности грунта основания) и по второй группе предельных состояний (по осадке свай, перемещениям и по образованию трещин в железобетонных сваях). Расчеты свай различных по материалу и работе по обеим группам предельного состояния проводятся по известным в СП 24.13330.2011 методам. В этих методах для нахождения (вычисления) сил трения-сцепления  $f$  на поверхности сваи в местах контакта с грунтом исходят из условия обязательного срыва (движения) сваи в грунте основания. На этой основе разработаны методы расчетов всех висячих свай в основаниях фундаментов. Однако сваи в грунте основания фундамента не должны «срываться», и находятся в покое. Это условие будет принято за основу нового метода расчета висячих свай по осадке, о чем будет описано ниже. Расчетная схема работы висячей сваи в грунте основания фундамента по СП 24.13330.2011 представлена на рис. 1 в однослойном (однородном) грунте основания. На рис. 1 условно показаны силы бокового давления  $q$  грунта на поверхности сваи, без которых силы трения  $f$  на поверхности свай не возникают.

Из рис. 1 видно, что силы  $f(x)$  на поверхности сваи возрастают с глубиной, т.к. возрастает давление сил  $q(x)$  и распределяются они по всей длине сваи.

На нижнем конце сваи по СП 24.13330.2011 действует реакция от грунта основания  $A \cdot R$ , где  $R$  – расчетное сопротивление грунта основания,  $A$  – площадь поперечного сечения сваи. Значения  $f(x)$  и  $R$  приведены в СП 24.13330.2011 в таблицах 7.2. и 7.3, где они возрастают к нижнему концу на всей длине сваи  $H$ . Расчетная формула по несущей способности грунта основания для одиночной сваи без коэффициентов имеет вид  $F \leq AR + u \sum f_i h_i$ , где  $F$  – нагрузка на сваю, включая собственный вес сваи (приближенно),  $u$  – периметр поперечного сечения сваи,  $h_i$  – высота слоя грунта основания. На рис. 1 грунт однородный и свая высотой  $H$ . Расчет по осадке  $S$  сваи проводится по условию  $S \leq S_{np}$ , где

$S_{np}$  – предельное значение осадки сваи. Разбор и замечания по расчетам висячих свай по несущей способности материала сваи рассмотрен в работе [3]. Обсуждение и замечания по расчетам висячих свай по несущей способности грунта основания в новом представлении работы сваи в грунте можно найти в работах [4-5]. На рис. 2 представлена расчетная схема висячей сваи в грунте при неподвижном положении сваи под нагрузкой в основании фундамента, где возникновение сил трения-сцепления объясняется микроперемещениями (деформациями) поверхностных слоев материала сваи в грунте основания.

По рис. 2а нагрузка  $F_1$  полностью уравнивается силами трения – сцепления  $f(x)$  на поверхности сваи, а нижняя часть сваи длиной  $(H - h)$  не участвует в работе. С точки зрения экономики такая свая неэффективна, она не использует несущую способность грунта основания на всей длине. По рис. 2б нагрузка  $F_2$  уравнивается силами  $f(x)$  и реакцией от грунта на нижнем конце сваи в виде силы  $\sigma_{cp} A$ .

Силы отрицательного трения-сцепления  $f_{omr}$  малы и их не учитывают в расчетах. Эти силы  $f_{omr}$  можно уменьшить, покрывая конец сваи, например битумом, что одновременно позволит уменьшить силу при погружении сваи в грунт основания. Более подробный анализ работы сваи по рис. 2 можно найти в работах [3,5]. Используем приведенные расчетные схемы работы сваи в грунте основания для расчета одиночной висячей сваи по ее осадке, т.е. по условию  $S \leq S_{np}$ , где  $S$  – совместная деформация сваи, свайного фундамента и сооружения. В дальнейшем будем рассматривать значение осадки сваи только за счет ее укорочения от сжатия и деформации грунта основания.  $S_{np}$  – предельное значение совместной деформации основания сваи, свайного фундамента и сооружения, определяемое нормами или проектным решением. В дальнейшем под  $S$  будем рассматривать деформацию и перемещение в грунте основания только самой сваи, а под  $S_u$  предельное ее значение  $S_{np}$  без учета осадки фундамента и сооружения.

По рис. 2а свая (по принятому условию) дает осадку  $S$  только за счет деформации (укорочения) верхней части сваи длиной  $h$ . Длина  $h$  участка сваи с силами трения-сцепления  $f(x)$  определяется по результатам измерения деформаций  $\varepsilon_i$  материала сваи при испытаниях пробной сваи, методом, описанным ниже. Для определения осадки сваи используется известный закон Гука, который для участка сваи длиной  $\Delta x$  для однослойного основания примет вид  $\Delta S = d(\Delta x) = f(x)u dx / EA$ , а для всей сваи длиной  $h$  имеем  $S = \Delta l = \frac{u}{EA} \int_0^h f(x) dx$ , где  $E$  – модуль упругости материала сваи,  $u$  – периметр поперечного сечения сваи,  $A$  – площадь поперечного сечения сваи. Для расчета значения осадки сваи  $S$  по рис. 2 а необходимо иметь аналитическое выражение функции  $f(x)$ . Для однослойного основания в [3-5] пред-

ложена функция  $f(x)$  вида  $f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi_0$ , где  $\varepsilon(x)$  – функция изменения деформации материала сваи по ее длине  $h$ , где действуют силы трения-сцепления;  $q(x)$  – нормальное давление грунта на поверхности сваи. По [7]  $q(x) = \gamma \xi_0 x$ , где  $\gamma$  – объемный вес грунта,  $\xi_0 = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}$ ,  $\mu_0$  – коэффициент относительной поперечной деформации грунта. По [7] для глин и суглинков  $\mu_0 = 0,10 \div 0,15$ ; для песков  $\mu_0 = 0,20 \div 0,25$ .  $\varphi_0$  – коэффициент, определяемый по результатам испытаний пробной сваи при любой по значению испытательной нагрузке  $F$ . В условиях равновесия сваи  $F = \xi_0 u \gamma \int_0^h x \varepsilon(x) dx$  откуда

$$\varphi_0 = F / \xi_0 u \gamma \int_0^h x \varepsilon(x) dx \quad (1)$$

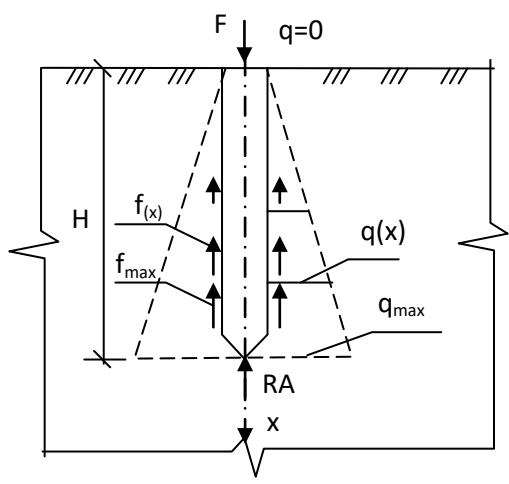


Рис. 1. Расчетная схема работы висячей сваи в грунте основания фундамента по СП 24.13330.2011

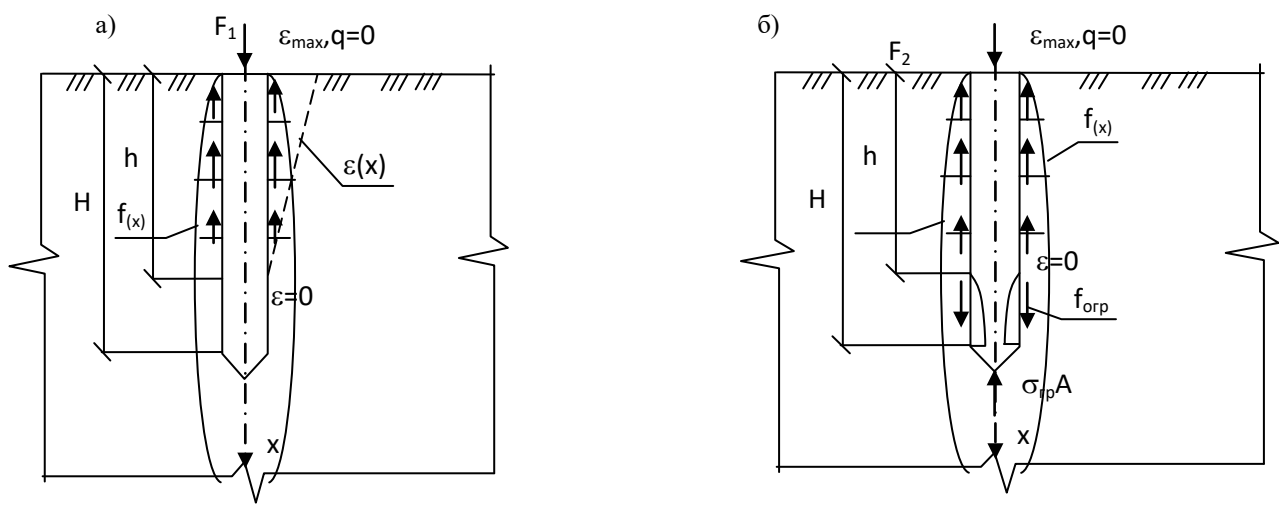


Рис. 2. Расчетные схемы работы висячей сваи в грунте основания:

а) при малой нагрузке  $F_1$  и большой длине сваи;

б) при большой нагрузке и малой длине сваи,  $f_{отр}$  – отрицательная сила трения

Функция  $\varepsilon(x)$  находится по результатам измерения деформаций  $\varepsilon_i$  не менее чем в трех сечениях пробной сваи с обработкой их по методу наименьших квадратов [1]. В верхнем конце сваи значение  $\varepsilon_{\max}$  можно найти по формуле  $\varepsilon_{\max} = F/EA$ , где  $E$  – модуль упругости материала сваи.

В первом приближении можно принять  $\varepsilon(x)$  в виде прямой (в запас надежности), проходящей через точки  $(0, \varepsilon_{\max})$  и  $(h, \varepsilon = 0)$ , как показано на рис. 2а. Будем иметь  $\varepsilon(x) = \varepsilon_{\max} \frac{h-x}{h}$ . По закону

Гука при  $x=0$  имеем  $\varepsilon_{\max} = \frac{F_1}{AE}$  и тогда функция

$\varepsilon(x)$  примет вид

$$\varepsilon(x) = \frac{F_1}{AE} \frac{h-x}{h}. \quad (2)$$

Значение  $h$  до сечения сваи при  $\varepsilon = 0$ , находят по результатам измерений деформаций материала сваи от нагрузки  $F_1$  по методике, описанной в [3-5].

В сечении сваи при  $x=0$  имеем  $\varepsilon_{\max} = \frac{F_1}{AE}$ . В сечении сваи на произвольном расстоянии  $x$  от начала координат (см. рис. 2а) значение деформации  $\varepsilon(x)$  представлено по формуле (2). Из рис. 2а видно, что  $F_1 = \int_0^h f(x) u dx$ . При  $f(x) = \varepsilon(x) q(x) \varphi_0$  или с учетом (2) и  $q(x) = \gamma \xi_0 x$  имеем

$F_1 = \int_0^h u \frac{F_1}{EA} \frac{h-x}{h} \gamma \xi_0 x \varphi_0$ . Отсюда после интегрирования и преобразования найдем

$$\varphi_0 = \frac{6EA}{u \gamma \xi_0 h^2}, \quad (3)$$

а  $f(x) = \frac{F_1}{EA} \frac{h-x}{h} \gamma \xi_0 x \varphi_0$  или

$$f(x) = \frac{6F_1 x(h-x)}{uh^3}. \quad (4)$$

Видно, что  $\varphi_0$  не зависит от нагрузки в явном виде, поэтому  $\varphi_0$  можно определить при любой нагрузке при испытаниях пробной сваи, а для контроля и статистики испытания проводят при нескольких нагруз-

ках. Измерения  $h$  описаны в [3-5]. Найдем выражение усилия (нагрузки)  $F(x)$  на сваю с учетом (3), (4) и  $q(x) = \gamma \xi_0 x$  в произвольном сечении сваи

$$F(x) = F_1 - \int_0^x u f(x) dx \text{ или}$$

$$F(x) = F_1 - \int_0^x \frac{6F_1 x(h-x)}{uh^3} = F_1 \left[ 1 - \frac{6}{uh^3} \left( \frac{hx^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) \right]. \quad (5)$$

При  $x=0$   $F(0) = F_1$ . При  $x=h$   $F(h) = 0$ .

На произвольном участке сваи длиной  $dx$  найдем перемещение (деформации) сваи  $\Delta(dx) = \frac{F(x)}{EA} dx$ .

После подстановки выражения  $F(x)$  из (5) и интегрирования найдем удлинение (осадку) сваи при  $x=h$ , т.е.  $\Delta(h) = S$  на всей длине сваи  $h$ .

$$\Delta(h) = S = F_1 h / 2EA.$$

Пример. Пусть условно известны значения

$$x = h \text{ мН, } F_1 = 2 \text{ м, } h = 10 \text{ м,}$$

$$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па, } A = 0,3 \cdot 0,3 = 0,09 \text{ м}^2,$$

$$S = 2 \cdot 10^6 \cdot 10 / 2 \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 0,09 = 0,0037 \text{ м} = 3,7 \text{ мм.}$$

Осадки  $S$  свай по схеме рис. 2а малы и во многих случаях практики можно ими пренебречь, учитывая значение предельных деформаций, приведенных в СНиП 2.02.01-83 для различных зданий и сооружений.

Рассмотрим второй вариант расчета осадки сваи по расчетной схеме, представленной на рис. 2б, когда отрицательными силами трения-сцепления пренебрегают и нагрузка  $F_2 > F_1$ .

В этом варианте часть осадки  $S_1$  будет определяться по первой модели работы сваи (см. рис. 2а) по формуле  $\Delta_1 = S_1 = F_2 h / 2AE$ . Вторая часть осадки  $S_2$  будет вызвана силой  $F_2$ , действующей на абсолютно твердую сваю в упругом грунте. Значение осадки  $S_2$  будет определяться значением силы  $F_2$ , свойством окружающего сваю грунта и в меньшей степени видом материала сваи. На рис. 3 показана геомеханическая модель грунтового массива (ограниченных размеров) взаимодействующего с висячей абсолютно жесткой свай. В месте контакта сваи с грунтом от воздействия силы  $F_2$  возникают касательные напряжения  $\tau$ . Эти напряжения убывают к нижнему концу сваи, т.к. уменьшаются перемещения грунта вблизи сваи. В первом приближении для однородного грунта основания закон изменения  $\tau(x)$  можно по [2] принять прямолинейным.

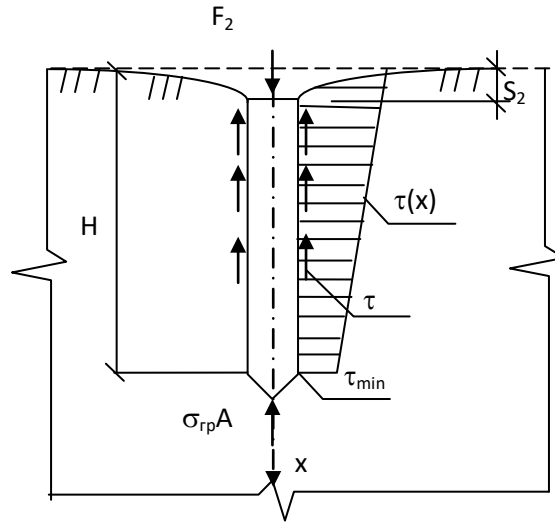


Рис. 3. Геометрическая модель взаимодействия свай с грунтом основания при  $\sigma_{np} \leq R$

По СП 24.13330.2011 осадка свай определяется по формуле

$$S_2 = \beta F_2 / G_1 H, \quad (6)$$

где  $\sigma_1$  – модуль сдвига грунта основания,  $\beta$  – коэффициент, значение которого определяется по формуле  $\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + \frac{1 - (\beta' / \alpha')}{\chi}$ .

По СП 24.13330.2011  $\beta' = 0,17 \ln(k_v G_1 H / G_2 d)$ , что соответствует абсолютно жесткой свай ( $EA = \infty$ );  $\alpha' = 0,17 \ln(k_v H / d)$ ;  $\chi = EA / G_1 H^2$ ;

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \chi^{3/4}}; k_v, k_{v1} \text{ определяются из}$$

$k_v = 2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2$  соответственно при  $\nu = (\nu_1 + \nu_2) / 2$  и  $\nu = \nu_1$ .

Полная осадка свай будет определяться с использованием гипотезы независимости действия сил по формуле:

$$S = S_1 + S_2 \text{ или } S = \frac{F_2 h}{2AE} + \beta \frac{F_2}{G_1 H},$$

где  $h$  – определяется по результатам испытаний пробной свай  $H \geq h$  (влиянием участка свай с отрицательными силами трения пренебрегаем).

Приведенное большое число эмпирических зависимостей для (6) без теоретического обоснования снижает достоверность в результате расчетов осадки  $S_2$ .

Задача расчета осадки свай глубокого заложения как жесткого тела по модели рис. 3 решена в работе [2]. Приводим ее результат в виде формулы осадки свай в обозначениях, принятых в [2].

$$S_2 = \sigma_0 C_1 + \frac{1}{E_{св}} \left( \frac{\tau_0 e^2}{a} + \frac{e^2}{3a} \left( \frac{\tau_1 - \tau_0}{\tau_1} \right) + \sigma_0 e \right), \quad (7)$$

где  $\tau_0$  – касательные напряжения по боковой поверхности свай на уровне ее основания,  $\tau_2$  – то же самое на уровне оголовка свай;  $\sigma_0$  – напряжение в свае на уровне ее основания;  $\sigma_2$  – то же самое на уровне оголовка свай;  $E_{св}$  – модуль упругости материала свай;  $a$  – радиус поперечного сечения свай.

$$C_1 = \frac{\pi a (1 - \nu_{сп}) k_e \omega}{4 \sigma_{сп}} - \text{коэффициент, учитываю-}$$

щий глубину приложения нагрузки на штампа;  $\sigma_{сп}$  – модуль сдвига грунта;  $k_e \leq 1$ ;  $\omega$  – коэффициент формы для круглого штампа.

Однако в работе отсутствует описание методов для нахождения (измерения) значений параметров в формуле (7), что не позволяет сопоставить результаты определения значений осадок одиночных свай по различным подходам к работе свай в грунте оснований.

Выводы:

1. Рассмотрены два варианта работы свай в грунте и методы расчетов их осадки при новом представлении о расчетных схемах работы свай в грунте основания фундаментов.

2. Показано малое значение осадки свай при отсутствии реакции на нижнем конце свай от грунта основания, т.е. при малой нагрузке на сваю или большой ее длине.

3. Работа направлена на уточнение существующих методов расчетов осадок свай и внедрение ее в нормативную документацию для расчетов свай по деформациям.

## Литература

1. Джонсон, Н. Статистика и планирования эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – Москва: Мир, 1980. – 610 с.
2. Тер-Мартirosян. З. Г. Теоретические основы расчета фундаментов глубоко заложения свай и баррет / З. Г. Тер-Мартirosян, В. В. Сидоров, П. В. Струнин // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 190–206.
3. Уткин, В. С. Определение длины свай по критерию несущей способности грунта / В. С. Уткин // Транспортное дело в России. – 2017. – № 3 (130). – С. 106.
4. Уткин, В. С. Работа свай в грунте основания фундамента и определение длины свай / В. С. Уткин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 4. – С. 23–26.
5. Уткин, В. С. Расчет надежности свай железобетонных свай в грунте основания / В. С. Уткин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – № 1. – С. 31–36.
6. Федоровский, В. Г. Расчет осадки свай в однородных и многослойных основаниях: автореферат дис. ... канд. техн. наук / В. Г. Федоровский. – Москва, 1974. – 22 с.
7. Цитович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов / Н. А. Цитович. – 3-е изд. доп. – Москва: Высшая школа, 1979. – 272 с.

**V.S. Utkin**

### **NEW METHOD OF FRICTION PILE SETTLEMENT CALCULATION IN FOUNDATION BASE SOIL**

The article describes a new design model of the friction pile in soil of foundation base, in which the occurrence of friction forces on the pile surface in contact with the soil and at the rest state is justified by micro-displacements (deformations) of the surface layers of pile material. A new theory and design formula are proposed for friction piles settlement calculation at different loads and pile length based on this type of pile work in the soil.

Friction pile, pile settlement, soil of foundation base, design formula, ultimate settlement.