

## Метод определения осадки винтовой сваи в деформируемом грунтовом основании

Д.В. ПРОКОПЕНКО

В работе предлагается приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в линейно и нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом уплотнения грунта вокруг ствола сваи.

**Ключевые слова:** винтовая свая, грунтовое основание, модуль деформации, несущая способность, приближенный аналитический метод.

In work the approached analytical method for determination of sludge screw piles in a deformable soil foundation in linearly and nonlinear-deformed soil basis taking into account consolidation of a ground round a pile trunk is presented.

**Keywords:** screw pile, soil basis, deformation module, bearing ability, approached analytical method.

**Введение.** Одной из проблем удешевления жилья является задача разработки и внедрения рациональных конструкций фундаментов зданий. При определенных свойствах грунтового основания и способе устройства фундамента здания экономически целесообразным может оказаться фундамент на основе винтовых свай. При завинчивании сваи в грунтовое основание происходит уплотнение грунта вокруг ствола с постепенным убыванием до его первоначального состояния. Неучет этой особенности приводит к недоиспользованию несущей способности грунтового основания и, как следствие, к повышению стоимости фундамента возводимого здания. Такой фундамент и грунтовое основание образуют сложную нелинейную систему деформируемых твердых тел. Исследование этой системы наиболее эффективно может быть выполнено математическими методами.

**Математическая модель системы.** Всякая реальная система или объект всегда имеют определенные связи с внешней средой, которая налагает свои условия на их существование и функционирование. Все эти и другие качества в математической модели должны иметь свое отображение, а это значит, что математическая модель может иметь свою структурную схему. Это сразу накладывает свои требования на структуру ядра математической модели. Ядро математической модели будем строить на основе принципа минимума полной энергии системы. В этом случае для краевых задач механики грунтов приведенная структурная схема будет иметь вид [1], [2]:

1. Геометрическая модель деформируемой среды.

2. Механико-математическая модель элементов системы

– при линейно-упругом деформировании:  $\sigma_i = E \varepsilon_i$ ,

– при нелинейно-упругом деформировании:  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ , в частности

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1,$$

где  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – интенсивности напряжений и деформаций,  $E$  – модуль деформации,  $A$ ,  $m$  – параметры закона нелинейного деформирования.

3. Система краевых условий задается в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики.

4. Условия равновесия системы (ядро математической модели):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = 0, \quad \text{где } \Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\},$$

$\Pi$  – полная энергия деформируемой системы,

$\{P\}$  – вектор внешних сил,

$\{\sigma\}$ ,  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{U\}$  – векторы напряжений, деформаций и перемещений;

$V$  – объем области существования исследуемой системы.

Учет уплотнения грунта при математическом моделировании несущей способности грунтового основания винтовой сваи. Уплотнение грунта изменяет значение его основных физико-механических характеристик. Следовательно, использование приведенных значений нормативных характеристик грунтового основания без их коррекции при расчете осадки сваи будет неправомерным. Учет уплотнения математическими методами приводит к необходимости принятия некоторой модели структуры и свойств рассматриваемой физической системы. Для исследования осадки винтовой сваи при вдавливании строится математическая модель исследуемой системы посредством формирования однородного грунтового основания, эквивалентного по несущей способности реальному, неоднородно уплотненному грунтовому основанию. Для построения эквивалентного грунтового основания необходимо определить основные физико-механические характеристики эквивалентного грунтового основания – модуль деформации  $E_{экв}$ .

Как показывает эксперимент, проведенный в БелНИИС, на степень уплотнения грунта вокруг ствола сваи влияют ее геометрические размеры, а именно высота сваи и ее радиус. На основании этих экспериментальных данных была разработана формула для определения  $E_{экв}$  [3]:

$$E_{экв} = \frac{E_0}{1 - \mu f} \tag{1}$$

$$f = \frac{R_{max}}{R_{max} - r_{св}}$$

где  $E_0$  – начальный модуль деформации грунтового основания, кг/см<sup>2</sup>;  
 $R_{max}$  – радиус деформируемой области, м;  
 $r_{св}$  – радиус сваи, м;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона.

*Определение осадки винтовой сваи в линейно-деформируемом грунтовом основании*

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном линейно-деформируемом грунтовом основании [1]. В этом случае выше плоскости ее конца существует так называемый телескопический сдвиг, т.е. будет

$$U = 0, W = f(r),$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \gamma_{rz} = \partial W / \partial r,$$

и состояние равновесия можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0$$

или в более компактной форме:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = 0. \tag{2}$$

Решение уравнения (2) должно отвечать и физическим условиям задачи, т.е. в решении должны содержаться физические параметры сваи и физико-механические характеристики основания. Решение в виде

$$W = c_1 \ln \frac{c_2}{r_0}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > r_0 \tag{3}$$

удовлетворяет (2) и соответствует поставленным требованиям, если константы  $c_1$  и  $c_2$  будут определены посредством указанных параметров. В случае линейного деформирования основания осадка сваи линейно зависит от нагрузки и обратно пропорциональна модулю сдвига грунта основания и длине сваи. В известных решениях принята именно такая зависимость. Для прямой сваи при учете радиуса ствола:

$$c_1 = \frac{\mu P}{G L}; \quad c_2 = \frac{(1 + \mu) L - 4 r_0}{2}; \dots \tag{4}$$

$$W = \frac{\mu P}{GL} \ln \frac{(1+\mu)L - 4r_0}{2r_i}, \quad (5)$$

где  $L$  – длина сваи,  
 $r_0$  – радиус ствола сваи,  
 $P$  – нагрузка на сваю,  
 $G$  – модуль сдвига.

Используя полученную формулу (1) для нахождения эквивалентного модуля деформации, преобразуем формулу (5) к виду

$$W = \frac{\mu P(1+\mu)(1-f\mu)}{LE_0} \ln \frac{(1+\mu)L - 4r_0}{2r_i}.$$

*Определение осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании*

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном нелинейно-деформируемом грунтовом основании. В этом случае условия телескопического сдвига сохраняются, т.е. будет

$$U = 0, W = f(r),$$

следовательно, деформации

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \gamma_{rz} = \partial W / \partial r \quad (6)$$

и состояние равновесия можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

где  $U, W$  – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора перемещения.

Уравнение состояния грунта при упругом деформировании может быть представлено законом Гука:

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e, \quad (8)$$

а при нелинейном деформировании любым уравнением кривой параболического типа, но только для соотношения

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m \quad (9)$$

возможны аналитические преобразования, и оно позволяет достаточно точно описывать процесс нелинейного деформирования, поэтому в работе уравнение (9) принято в качестве закона деформирования грунта. В выражении (8) индекс « $e$ » – признак линейного деформирования.

На основании метода энергетической линеаризации [1]

$$\varepsilon_i = \left( \frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \varepsilon_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (10)$$

где

$$\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}. \quad (11)$$

Уравнение (10) устанавливает связь между интенсивностями деформаций, полученными при линейном и нелинейном решении исходной задачи.

Выражение (10) при учете соотношений (6) и (11) примет вид

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \left( \frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2(1+\mu)} \right)^{\frac{1-m}{m}} \left( \frac{\partial W^e}{\partial r} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

При упругом деформировании из уравнения (7) следует

$$\frac{\partial W^e}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad c_1 = \frac{\mu P}{GL}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) при учете (13), получим

$$W = \left( \frac{1+m}{2} \frac{\sqrt{3}}{A} \frac{G}{GL} \frac{\mu P}{GL} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{2(1+\mu)}{\sqrt{3}} \int_{r_0}^{\infty} \left( \frac{1}{r} \right)^{\frac{1}{m}} dr + c_1. \quad (14)$$

В (14) несобственный интеграл будет сходящимся, выполнив интегрирование, получим

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2ALr_0} \right)^{\frac{1}{m}} r_0. \quad (15)$$

Используя полученную формулу (1) для нахождения эквивалентного модуля деформации, преобразуем формулу (15) к виду

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-f\mu)\sigma_{i,кп}}{\sqrt{3}(1-m)E_0} \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{i,кп} L r_0} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

Оценку полученного решения покажем на реальной задаче (натурный эксперимент, выполненный в РУП БелНИИС): железобетонная одиночная свая сечением 0,20 м погружена на 4,1 м в грунтовое основание, на сваю действует вертикальная статическая нагрузка  $q$ . Приведенные начальные характеристики грунтового основания следующие:  $E = 32$  МПа,  $\varphi = 35^\circ$ ,  $B = 0,2$ . Необходимо определить осадку сваи в заданном диапазоне нагрузок. Значения смещения сваи, полученные методом натурного эксперимента и по аналитическому решению при учете и без учета уплотнения грунтового основания, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Осадка винтовой сваи в грунтовом основании

$P$ (кН)	50	100	150	200	250
$S_o$	0,4	1,0	2,3	4	6,
$S_y$	0,36	1,2	2,4	4	6
$S_{\delta}$	0,56	1,9	3,8	6,3	9,
$S_{\text{упл}}$					3

$S_{on}$  – осадки сваи, полученные опытным путем;

$S_{упл}$  – осадки сваи с учетом уплотнения грунта;

$S_{безупл}$  – осадки сваи без учета уплотнения грунта.

Из таблицы видно, что учет уплотнения грунта вокруг ствола сваи повышает несущую способность грунтового основания в среднем на 47 %, что обеспечивает значительное снижение ресурсоемкости фундаментов из винтовых свай.

## Литература

1. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
2. Быховцев, В.Е. Методология исследования деформаций нелинейных систем твердых тел методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования / В.Е. Быховцев, В.В. Бондарева, Д.В. Прокопенко // Материалы юбилейной Республиканской научно-технической конференции – Гомель, УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2009. – С. 106–109.
3. Быховцев, В.Е. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко. // Известия ГГУ им. Ф. Скорины – 2012. – № 6. – С. 110–114.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ