

УДК 681.3.06:624.131

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГРУППЫ СВАИ-РИТ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ В НЕЛИНЕЙНО- ДЕФОРМИРУЕМОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ**

**Д. В. ПРОКОПЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*В современном мире строительная отрасль играет особую роль. Существенным фактором является стоимость возводимого здания. При строительстве здания или сооружения стоимость фундамента возводимого здания может достигать третьей части от стоимости всего здания, поэтому рациональное устройство фундамента играет важную роль.*

*В статье предложена оригинальная методика расчета для определения осадки любой сваи-РИТ в произвольной группе свай-РИТ, которая учитывает нелинейность деформирования грунтового основания и его уплотнение вследствие устройства свай-РИТ, что ведет к удешевлению стоимости возводимого здания.*

**Ключевые слова:** свая-РИТ, разрядно-импульсная технология, сложная нелинейная система «фундамент – грунтовое основание», методика расчета, математическая модель, уплотнение грунтового основания.

## **CALCULATION METHODOLOGY OF RIT-PILES GROUP BY DEFORMATIONS IN NONLINEAR- DEFORMABLE SOIL BASE**

**D. V. PROKOPENKO**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*In the modern world, the construction industry plays a special role. A significant factor is the cost of the building being built. During the construction of a building or structure, the cost of the foundation of the building under construction can reach a third of the cost of the entire building, so the rational arrangement of the foundation plays an important role.*

*The article proposes an original calculation method for determining the settlement of any RIT-piles in an arbitrary group of RIT-piles, which takes into account the nonlinearity of deformation of the soil base and its compaction due to the arrangement of RIT-piles, which leads to a cheaper cost of the built building.*

**Keywords:** RIT-piles, discharge-pulse technology, complex non-linear system “foundation-soil base”, calculation technique, mathematical model, compaction of soil base.

### **Введение**

Одной из проблем удешевления жилья является внедрение рациональных конструкций фундаментов. При определенных свойствах грунтового основания экономически эффективным может оказаться фундамент на основе свай, устроенных при помощи разрядно-импульсной технологии (свай-РИТ). При устройстве свай-РИТ происходит уплотнение грунтового основания в области камуфлетного уширения, что увеличивает несущую способность свай-РИТ. Данное уплотнение также влияет на соседние сваи. В строительных нормах и правилах приводятся формулы для расчета свай-РИТ, которые не учитывают уплотнение грунта в области камуфлетного

уширения и его влияния на соседние сваи-РИТ, что ведет к недоиспользованию несущей способности грунтового основания сваи-РИТ. Такой фундамент и грунтовое основание образуют сложную нелинейную систему деформируемых твердых тел, исследование которой наиболее эффективно может быть выполнено математическими методами.

Проблема рационального использования свай в строительстве является актуальной и исследуется многими учеными [1]–[4]. Целью данной работы является определение осадки группы свай-РИТ с учетом нелинейности деформирования грунтового основания и его уплотнения вследствие устройства свай, что позволит повысить несущую способность грунтового основания и, как следствие, снизить ресурсоемкость фундаментов, выполненных на основе свай-РИТ.

### **Устройство сваи-РИТ**

Сущность разрядно-импульсной технологии (сваи-РИТ) заключается в следующем: скважину, заполненную бетоном, обрабатывают серией высоковольтных электрических разрядов, при этом возникает электрогидравлический эффект, в результате которого формируется ствол сваи. Далее ствол сваи цементируется и уплотняется окружающий грунт (рис. 1). Первоначальный диаметр скважины в результате обработки серией разрядов может быть увеличен более чем в 2 раза в зависимости от энергии, подаваемой в скважину, и гидрогеологических условий площадки.



*Рис. 1. Устройство сваи-РИТ*

### **Математическая модель системы**

Математическую модель сложной системы «фундамент – грунтовое основание» построим на основе принципа минимума полной энергии системы:

1. Геометрическая модель деформируемой среды.
2. Механико-математическая модель элементов системы:

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

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

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

4. Условия равновесия системы:

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

где  $\Pi$ ,  $\{P\}$  – полная энергия деформируемой системы и вектор внешних сил;  $\{\sigma\}$ ,  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{U\}$  – векторы напряжений, деформаций и перемещений;  $V$  – объем области существования исследуемой системы.

### Математическое моделирование уплотнения грунта вокруг ствола сваи-РИТ

Уплотнение грунтового основания при его разрядно-импульсной обработке изменяет значения основных физико-механических характеристик грунта. Следовательно, использование первоначальных характеристик грунтового основания без их коррекции будет неправомерным и приведет к погрешности в расчетах. Для исследования осадки отдельной сваи-РИТ в группе свай-РИТ строится математическая модель исследуемой системы посредством формирования однородного грунтового основания, эквивалентного по несущей способности реальному неоднородно уплотненному. Ранее для такого эквивалентного основания автором была разработана формула для определения эквивалентного модуля деформации [5]:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_0}{1 - \mu f}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – начальный модуль деформации грунтового основания, кг/см<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

На основании экспериментальных данных, полученных в БелНИИС, был уточнен коэффициент  $f$ :

$$f = \frac{(r_{\text{уп}} - r_0) k_c}{r_{\text{уп}}},$$

где  $r_{\text{уп}}$  – радиус зоны уплотнения, м;  $r_0$  – радиус сваи-РИТ, м;  $k_c$  – коэффициент конфигурации сваи-РИТ:

$$k_c = 0,012 \mu P^{1-m}.$$

Чтобы применить приведенные формулы для сваи-РИТ, ее нужно представить в виде цилиндрической сваи, равной по объему с исходной. При условии равенства объемов свай, после несложных преобразований формула вычисления радиуса эквивалентной сваи будет иметь вид:

$$r_{\text{пр}} = r_0 \sqrt{1 + 2n \frac{r_u}{L} \left( \left( \frac{r_u}{r_0} \right)^2 - 1 \right)}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество уширений сваи-РИТ;  $r_u$  – радиус уширения сваи-РИТ, м;  $L$  – длина сваи-РИТ, м.

### Методика расчета осадки сваи-РИТ в структурах фундаментов в нелинейно-деформируемом грунтовом основании

При расчете осадки сваи-РИТ, находящейся в некоторой группе свай-РИТ, необходимо учитывать влияние соседних свай. Для нелинейно-деформируемых тел принцип независимости действия сил не подходит, поэтому для решения

поставленной задачи воспользуемся формулой, полученной в работе [5], для определения осадки одиночной винтовой сваи (3) для всей рассматриваемой системы:

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

Для упругого деформирования общая деформация системы определяется суперпозицией сил. Выражения, полученные при упругом деформировании [5], подставляются в формулу (3), и после интегрирования получим решение поставленной задачи. Покажем это на примере отдельных групп свай-РИТ.

*Однорядный ленточный фундамент на основе свай-РИТ* (рис. 2). Каждая свая-РИТ воспринимает нагрузку  $P$ .

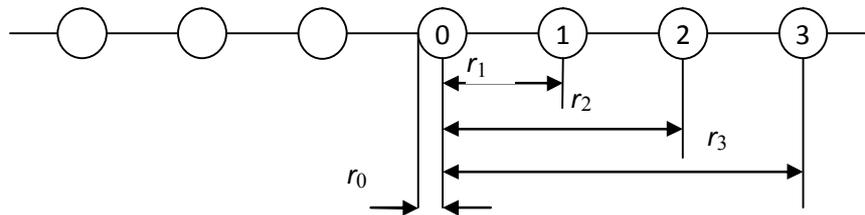


Рис. 2. Однорядный ленточный фундамент на основе свай-РИТ:  
 $nr_0$  – расстояние между осями свай;  $r_0$  – радиус сваи-РИТ;  $n$  – целое число, выражающее расстояние между осями,  $r_1 = nr_0$ ;  $r_2 = 2nr_0$ ;  $r_3 = 3nr_0$

Учитывая физические параметры свай-РИТ и физико-механические характеристики грунтового основания [5], получим:

$$\frac{\partial W^l}{\partial r} = \frac{\partial W_0^l}{\partial r_0} + 2 \frac{\partial W_1^l}{\partial r_1} + 2 \frac{\partial W_2^l}{\partial r_2} + \frac{\partial W_3^l}{\partial r_3} = \left( 1 + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k \frac{1}{k} \right) \frac{c}{r_0}, \quad (4)$$

где  $k$  – количество свай-РИТ, влияние которых учитывается при определении осадки сваи-РИТ в группе свай-РИТ.

$$c = \frac{\mu P}{GL}.$$

Подставим (4) в (3), учитывая (1), и проинтегрируем:

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-\mu)\sigma_{kr}}{\sqrt{3}(1-m)E_0} \frac{r_{up} - r_{pr}}{r_{up}} k_c \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{kr} L r_{0pr}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{pr} \left( 1 + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^k \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

*Квадратный куст из четырех свай-РИТ* (рис. 3, а). Каждая свая-РИТ воспринимает нагрузку  $P$ . Осадка каждой сваи-РИТ будет определяться действующей на нее нагрузкой  $P$  и влиянием трех соседних свай-РИТ, расстояния между ними будут:  $r_1 = nr_0$ ;  $r_2 = 2^{1/2}nr_0$ . В этом случае, учитывая физические параметры свай-РИТ и физико-механические характеристики грунтового основания, для каждой сваи куста получим:

$$\frac{\partial W^I}{\partial r} = \frac{\partial W_1^I}{\partial r_0} + 2 \frac{\partial W_2^I}{\partial r_1} + \frac{\partial W_4^I}{\partial r_2} = \left( 1 + \frac{1+2\sqrt{2}}{\sqrt{2n}} \right) \frac{c}{r_0}. \quad (5)$$

Подставим (5) в (3), учитывая (1), и проинтегрируем:

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-\mu)\sigma_{kr} r_{up} - r_{pr}}{\sqrt{3}(1-m)E_0} k_c \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{kr} L r_{0pr}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{pr} \left( 1 + \frac{1+2\sqrt{2}}{\sqrt{2n}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

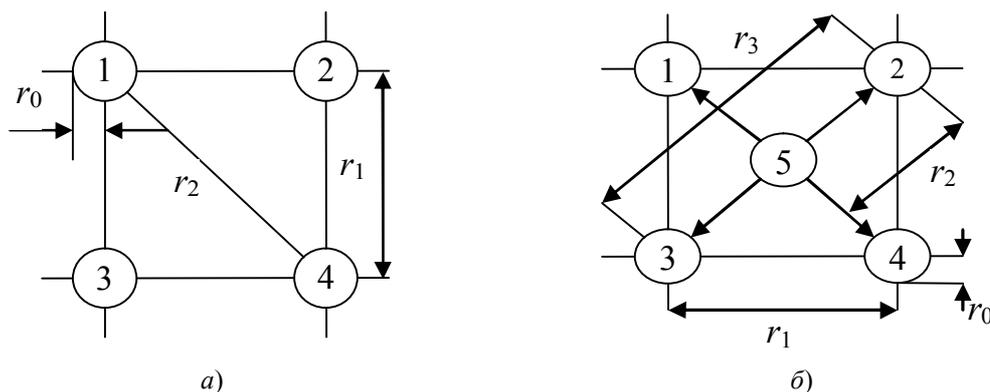


Рис. 3. Куст свай:

*a* – квадратный куст из четырех свай; *б* – квадратный куст из пяти свай

Рассмотрим группу из пяти свай-РИТ (рис. 3, б), каждая из которых воспринимает нагрузку  $P$ . В этом случае:

$$r_1 = nr_0;$$

$$r_2 = \frac{\sqrt{2nr_0}}{2};$$

$$r_3 = \sqrt{2nr_0}.$$

При определении осадок свай № 1 и 5 будет учитываться влияние четырех других свай в кусте. Тогда осадки для свай № 1–4 рассчитываются по формуле

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-\mu)\sigma_{kr} r_{up} - r_{pr}}{\sqrt{3}(1-m)E_0} k_c \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{kr} L r_{0pr}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{pr} \left( 1 + \frac{3+2\sqrt{2}}{\sqrt{2n}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

Для сваи № 5 применяется следующая формула:

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-\mu)\sigma_{kr} r_{up} - r_{pr}}{\sqrt{3}(1-m)E_0} k_c \left( \frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{kr} L r_{0pr}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{pr} \left( 1 + \frac{8}{\sqrt{2n}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

### **Заключение**

Исследование деформационных процессов в твердых телах и их систем является важной задачей механики деформируемого твердого тела. При решении такой задачи математическими методами строится ее математическая модель, которая должна описывать реальные свойства рассматриваемого объекта (система «фундамент – грунтовое основание»): нелинейность деформирования, неоднородность структуры и др. Исследование таких моделей является трудной задачей и учет всех особенностей данной системы приводит к разработке новых методик.

Представленная в работе методика позволяет определить аналитические выражения для определения осадки любой сваи-РИТ в произвольной группе свай-РИТ, которая в отличие от существующих учитывает нелинейность деформирования грунтового основания и его уплотнение в зоне разрядно-импульсной обработки. Разработанная автором формула для определения осадки одиночной сваи-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании, радиус которой рассчитан по предложенной формуле (2), прошла апробацию на экспериментальных данных [6]. Учет уплотнения грунтового основания и его нелинейность деформирования может привести к повышению несущей способности грунтового основания на 20 % и, как следствие, обеспечит снижение ресурсоемкости фундаментов из свай, устроенных при помощи разрядно-импульсной технологии (указанное повышение несущей способности показано на примере одиночной сваи в работе [6]).

### **Литература**

1. О необходимости исследований работы винтовых свай и актуализации норм проектирования свайно-винтовых фундаментов / А. Г. Алексеев [и др.] // Промышл. и граждан. стр-во. – 2018. – № 1. – С. 43–47.
2. Аль-Тамими, С. С. Х. Несущая способность и устойчивость песчаных оснований коротких винтовых металлических свай при действии вдавливающей и выдергивающей нагрузок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / С. С. Х. Аль-Тамими ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – 24 с.
3. Кравцов, В. Н. Применение и исследования металлических винтовых свай в Республике Беларусь / В. Н. Кравцов, Аль-Тамими Саиф // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. – Минск : БНТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 158–165.
4. Носков, И. В. Современное состояние проблемы применения винтовых свай в строительстве / И. В. Носков, С. А. Ананьев, А. Г. Суртаев // Вестн. Евраз. науки. – 2019. – № 3, Т. 11. – С. 1–10.
5. Прокопенко, Д. В. Аналитический метод определения осадки группы винтовых свай / Д. В. Прокопенко // Материалы, технологии, инструменты. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 44–48.
6. Прокопенко, Д. В. Расчет сваи РИТ по предельным состояниям / Д. В. Прокопенко, В. Е. Быховцев, В. С. Смородин // Докл. БГУИР. – 2016. – № 8 (102). – С. 71–75.

*Получено 23.02.2021 г.*