

УДК 681.3.06:624.131

Математическое моделирование предельной несущей способности и деформаций свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом уплотнения грунта в зоне РИО

В.Е. БЫХОВЦЕВ, С.В. КИРГИНЦЕВА, Д.В. ПРОКОПЕНКО

Предлагается численно-аналитический метод расчёта одиночных РИТ-свай по второму предельному состоянию (деформациям), учитывающий особенности РИТ-свай и грунтового основания как единой нелинейной физической системы.

Ключевые слова: свая-РИТ, камуфлетное уширение, несущая способность, деформации, грунты, уплотнение, математическое моделирование.

The numerical and analytical method of calculation of single RIT-piles for the second limit state (deformations) considering features of RIT-piles and the soil basis as uniform nonlinear physical system is offered.

Keywords: RIT-pile, camouflage broadening, bearing ability, deformations, soil, consolidation, mathematical modeling.

Введение. Грунтовые основания строительных площадок возводимых зданий и сооружений характеризуются многообразием структуры и свойств. В силу этого возникает необходимость выявления экономически наиболее эффективных фундаментов зданий для конкретных грунтовых условий каждой строительной площадки. Одним из таких фундаментов может быть фундамент на основе свай с камуфлетным уширением, одним или несколькими, выполненный по разрядно-импульсной технологии. Фундамент, грунтовое основание и образующиеся в результате взрыва камуфлетные уширения и уплотненные зоны в области разрядно-импульсной обработки (РИО) образуют сложную нелинейную физическую систему деформируемых твердых тел. Согласно строительным нормам и правилам (СНиП), расчет фундаментов зданий должен производиться по двум предельным состояниям: по несущей способности и по деформациям. Однако в СНиП не учитываются уплотнение и нелинейность деформирования грунта. В работе для расчёта РИТ-свай по деформациям (по второму предельному состоянию) предлагается численно-аналитический метод, учитывающий указанные особенности одиночной РИТ-свай радиусом $r_{св}$ длиной L и радиусом камуфлетных уширений $r_{уш}$ и её грунтового основания. Оценкой полученных решений будут результаты натурного эксперимента по определению предельной несущей способности и осадки РИТ-свай, выполненные в отделе «Основания и фундаменты» РУП БелНИИС.

Взаимодействие свай-РИТ с грунтовым основанием. В силу особенностей устройства свай-РИТ, характер ее взаимодействия с грунтовым основанием значительно влияет на величину осадки самой свай-РИТ и фундамента, построенного на их основе. Деформационный процесс грунтового основания свай, устроенной по разрядно-импульсной технологии, можно разделить на два этапа:

- 1) устройство свай-РИТ,
- 2) взаимодействие свай-РИТ с грунтовым основанием при действии на нее внешней нормальной нагрузки.

При устройстве свай-РИТ, в отличие от винтовой сваи, смятие грунта вдоль ствола свай не происходит, уплотнение грунта происходит только в области камуфлетного уширения.

При математическом моделировании осадок свай учет уплотнения грунта ведет к необходимости принятия некоторой модели структуры и свойств рассматриваемой физической системы. Наилучшим решением этой задачи будет характеризоваться натурный эксперимент. В отде-

ле оснований и фундаментов БелНИИСа были проведены соответствующие натурные экспериментальные исследования. Анализ полученных результатов показал, что для всех поставленных задач зависимость осадки РИТ-сваи от вдавливающей нагрузки является нелинейной.

Математические модели предельной несущей способности одиночной сваи-РИТ в грунтовом основании. Для определения предельной несущей способности сваи-РИТ в [1], исходя из условия равновесия одиночной прямой сваи, математически выведена формула:

$$P = 2\pi r_c L(c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \varphi) + \pi r_y^2 \sigma_{np}.$$

Значение σ_{np} , используемое в этой формуле, может определяться экспериментально, что очень трудоёмко и дорого, или теоретически посредством решения задачи предельного равновесия грунта [2].

Полученное теоретическое решение задачи предельного равновесия грунта оказалось очень сложным для практического применения. Поэтому были разработаны соответствующие таблицы [2] и было предложено несущую способность сваи-РИТ определять по формуле [3], [4], [5]:

$$F_d = g_{kk} g_{crin} (g_{cR} R_{rit} A_{rit} + g_{cf} \sum u_{irit} f_i h_i), \quad (1)$$

Но формула (1) не учитывает нелинейность деформирования и уплотнение грунта вокруг камуфлетных уширений сваи-РИТ, что ведет к значительному недоиспользованию несущей способности грунтового основания сваи-РИТ. В [6] несущую способность сваячей сваи, работающей на осевую сжимающую нагрузку, предложено определять в соответствии с формулой (2) как сумму расчётных сопротивлений грунтов основания под камуфлетным уширением на конце сваи и по её боковой поверхности при учёте уплотнения грунта по формуле:

$$F_d = g_{kk} g_{crin} (g_{cR} R_{rit \max} A_{rit} + g_{cf} \sum u_{irit} f_{i \max} h_i), \quad (2)$$

где $R_{rit \max}$ – предельное расчётное сопротивление уплотнённого грунта, рассчитывается по формуле

$$R_{rit \max} = R_{rit \min} \left(\frac{r_{\max}}{r_{yu}} \right)^n,$$

где $f_{i \max}$ – расчётное сопротивление i -го слоя уплотнённого грунта на боковой поверхности сваи, рассчитывается только для зон РИО выше конца сваи; r_{\max} – радиус зоны уплотнения; r_{yu} – радиус уширения сваи.

Вычисленные значения предельной несущей способности сваяч-РИТ оказались достаточно близкими экспериментальным данным, представленным отделом оснований и фундаментов БелНИИС, и тем самым показана необходимость учёта уплотнения и нелинейности деформирования грунта вокруг камуфлетного уширения сваи, что позволит увеличить предельную несущую способность на 30 % [6].

Экспериментальные исследования несущей способности сваяч-РИТ.

Паспорт испытания сваяч-РИТ № 1 статической вдавливающей нагрузкой на опытной площадке ОП 1.

Характеристика сваяч-РИТ № 1: буронабивная с диаметром ствола Ø151 мм, выполнена по технологии РИТ, длиной 3 м, с уширением в уровне пяты диаметром 460 мм.

Вид испытания: статической вдавливающей нагрузкой по СТБ 2242.

Грунтовые условия: пылеватый суглинок на всю разведанную глубину: удельный вес γ , кН/м³ – 19,4; угол внутреннего трения φ , град – 23; сцепление c , МПа – 0,018; модуль деформации E , МПа – 6.

Паспорт испытания сваяч-РИТ № 2–4 статической вдавливающей нагрузкой на опытной площадке ОП 2 (слоистое основание).

Характеристика сваяч-РИТ № 2–4: буронабивные с диаметром ствола Ø250 мм, выполнены по технологии РИТ, длиной 16,7 м, с уширениями вдоль ствола для сваяч-РИТ № 2 через 0,5 м начиная от уровня пяты; для сваяч-РИТ № 3 – через 0,75 м; для сваяч-РИТ № 4 – через 1 м.

Вид испытания: Статической вдавливающей нагрузкой по СТБ 2242.

Грунтовые условия: слоистое основание из грунтов, сверху вниз.

1. Насыпной искусственный: толщина слоя – 0,6 м; удельный вес γ , кН/м³ – 19,4; угол внутреннего трения φ , град – 23; сцепление c , МПа – 0,008; модуль деформации E , МПа – 8.

2. Супесь пылеватая текучая ($I_L > 1$) с примесью органических веществ: толщина – 1,4 м; удельный вес γ , кН/м^3 – 20,10; угол внутреннего трения φ , град – 17; сцепление c , МПа – 0,014; модуль деформации E , МПа – 3.

3. Песок пылеватый средней прочности, насыщенный водой: толщина слоя – 9 м; удельный вес γ , кН/м^3 – 18,00; угол внутреннего трения φ , град – 28; сцепление c , МПа – 0,004; модуль деформации E , МПа – 18.

4. Песок мелкий средней прочности, насыщенный водой: толщина слоя – 1,5 м; удельный вес γ , кН/м^3 – 17,40; угол внутреннего трения φ , град – 30; сцепление c , МПа – 0,001; модуль деформации E , МПа – 25.

5. Песок средний, насыщенный водой: толщина слоя – 4,7 м; удельный вес γ , кН/м^3 – 19,40; угол внутреннего трения φ , град – 33; сцепление c , МПа – 0,001; модуль деформации E , МПа – 28.

Результаты испытаний свай-РИТ для двух опытных площадок представлены на рисунке 1 и рисунке 2.

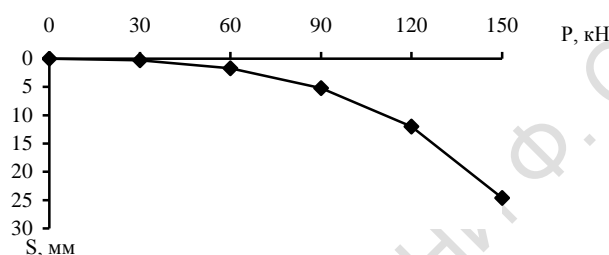


Рисунок 1 – График испытания РИТ-свай № 1 статической вдавливающей нагрузкой

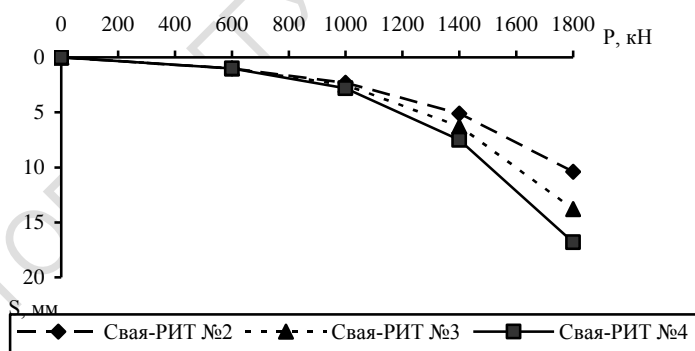


Рисунок 2 – Графики испытания РИТ-свай № 2–4 статической вдавливающей нагрузкой

Определение осадки свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. Рассмотрим одиночную сваю-РИТ радиусом ствола r_c длиной L с n камуфлетными уширениями радиусом r_{yu} в нелинейно-деформируемом грунтовом основании.

Уравнение состояния грунтового основания принято в виде степенной функции

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \quad 0 < m < 1, \quad A > 0. \tag{3}$$

Поставим в соответствие свае-РИТ некоторую эквивалентную по объему прямую цилиндрическую сваю. При условии равенства объемов свай после несложных преобразований формула вычисления радиуса эквивалентной (приведенной) сваи r_{np} будет иметь вид:

$$r_{np} = r_c \sqrt{1 + 2n \frac{r_{yu}}{L} \left(\left(\frac{r_{yu}}{r_c} \right)^2 - 1 \right)}, \tag{4}$$

На основании метода энергетической линеаризации [7] осадка сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании вычисляется по формуле:

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2ALr_c} \right)^{\frac{1}{m}} r_c, \quad (5)$$

Вследствие разрядно-импульсной обработки грунт в зонах РИО будет уплотнен. При учете уплотнения необходимо определить характеристики измененного состояния грунта в зоне РИО: эквивалентные значения используемых параметров грунта в деформируемой зоне:

$$A_{\text{эkv}} = \frac{A_0}{1-m} \cdot \frac{r_{\text{упл}}}{(r_{\text{упл}} - r_c)k_c}, \quad (6)$$

где $r_{\text{упл}}$ – радиус уплотненной зоны сваи-РИТ; $m = \sin \varphi$; φ – угол внутреннего трения грунтового основания;

$$A_0 = \left(\frac{E}{\sigma_{\text{сп}}} \right)^m \sigma_{\text{сп}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{сп}} = c + 0,01(1-2\mu) \operatorname{tg} \varphi E, \quad (8)$$

c – коэффициент сцепления в грунте; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = \frac{1 - \sin \varphi}{2 - \sin \varphi}$;

k_c – коэффициент конфигурации сваи-РИТ, $k_c = 0,012\mu P^{1-m}$.

Таким образом, формула вычисления осадки сваи-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании будет иметь вид:

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2A_{\text{эkv}}Lr_{\text{упл}}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{\text{упл}}. \quad (9)$$

Оценим точность предлагаемого аналитического решения на примере конкретных задач механики грунтов и сравним полученные результаты с экспериментальными данными, представленными отделом оснований и фундаментов БелНИИС.

Осадки одиночной сваи-РИТ на опытной площадке ОП № 1, полученные методом натурного эксперимента $S_{\text{опыт}}$, методом компьютерного моделирования $S_{\text{коом}}$ и вычисленные по формулам (6–9) $S_{\text{форм}}$, представлены в таблице 1 и на графике (рисунок 3).

Таблица 1 – Осадки сваи-РИТ № 1 в нелинейно-деформируемом грунтовом основании

P, кН	0	30	60	90	120	150
$S_{\text{опыт}}$	0	0,3	1,7	5,2	12	24,6
$S_{\text{коом}}$	0	0,5	2,5	6,7	13,8	24,2
$S_{\text{форм}}$	0	0,33	1,94	5,49	11,47	20,3

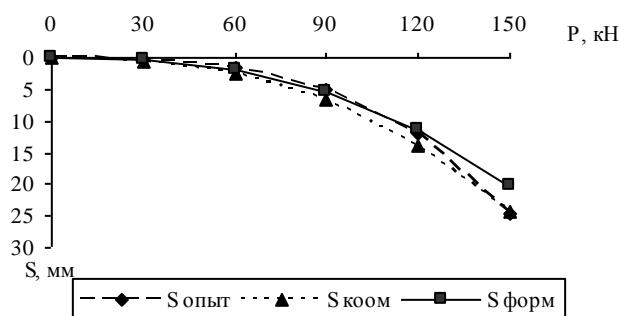


Рисунок 3 – Графики зависимости осадки одиночной сваи-РИТ № 1 от нагрузки, полученные различными методами

Из данных таблицы 1 видно, что осадки одиночной сваи-РИТ с одним камуфлетным уширением в нелинейно-деформируемом грунтовом основании на опытной площадке ОП №1, полученные различными методами, при различных статических вдавливающих нагрузках отличаются незначительно.

Для вычисления осадок свай-РИТ № 2–4 на опытной площадке ОП 2 необходимо определить взвешенные значения основных характеристик грунта [8]. Было получено $\varphi=28,47$; $c=0,02$; $E=19,77$ МПа. Результаты испытания $S_{опыт}$ и вычислений $S_{форм}$ РИТ-свай №2-4 статической вдавливающей нагрузкой представлены в таблице 2 и на графиках рисунка 4, рисунка 5 и рисунка 6.

Таблица 2 – Осадки свай-РИТ №2-4 в нелинейно-деформируемом грунтовом основании

S , мм \ P , кН	0	600	1000	1400	1800
Свая-РИТ-2: $S_{опыт}$	0	1,0	2,3	5,1	10,4
$S_{форм}$	0	0,39	1,93	5,6	12,4
Свая-РИТ-3: $S_{опыт}$	0	1,0	2,5	6,3	13,8
$S_{форм}$	0	0,47	2,35	6,8	15,1
Свая-РИТ-4: $S_{опыт}$	0	1,0	2,8	7,5	16,8
$S_{форм}$	0	0,53	2,69	7,8	17,17

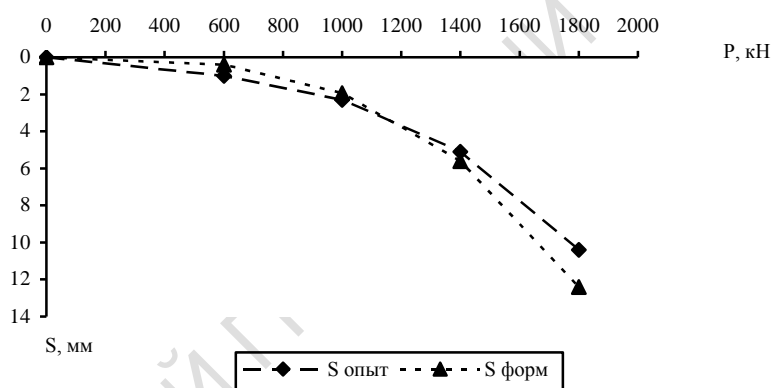


Рисунок 4 – Графики зависимости осадки одиночной сваи-РИТ № 2 от нагрузки, полученные различными методами

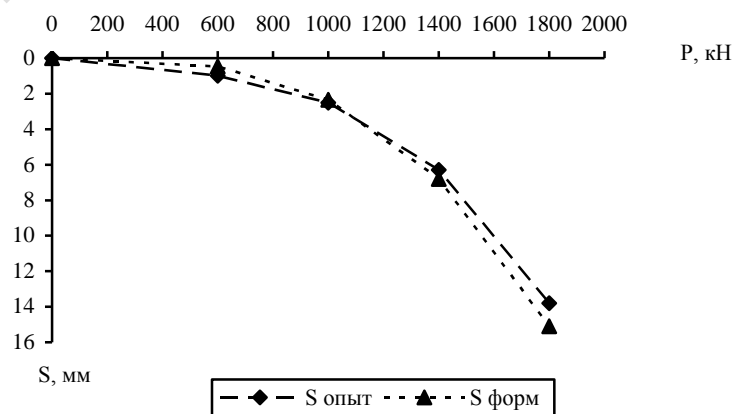


Рисунок 5 – Графики зависимости осадки одиночной сваи-РИТ №3 от нагрузки, полученные различными методами

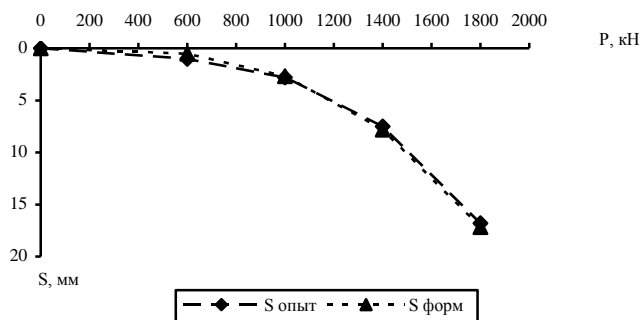


Рисунок 6 – Графики зависимости осадки одиночной сваи-РИТ № 4 от нагрузки, полученные различными методами

Анализ полученных данных показал, что осадки свай-РИТ № 2–4, представленные отделом оснований и фундаментов БелНИИС и вычисленные по разработанным формулам, отличаются мало. А значит, разработанный алгоритм определения осадки свай, устроенных по разрядно-импульсной технологии, в нелинейно-деформируемом грунтовом основании позволяет вычислять осадки свай-РИТ в грунтовом основании достаточно точно.

Заключение. Разработаны аналитические (численные) методики расчета свай-РИТ по первому и второму предельным состояниям для грунтовых условий Республики Беларусь (по несущей способности и по деформациям). Показано высокое соответствие разработанного численно-аналитического решения по определению предельной несущей способности и осадки свай-РИТ экспериментальным данным и результатам компьютерного моделирования. Учёт уплотнения и нелинейности деформирования грунтового основания вокруг камуфлетного уширения свай-РИТ позволяет вычислить осадку и значения несущей способности свай-РИТ по грунту достаточно близкими экспериментальным данным, представленными отделом оснований и фундаментов БелНИИС.

Литература

1. Прокопенко, Д.В. Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании / Д.В. Прокопенко, В.Е. Быховцев, С.В. Киргинцева // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 129–132.
2. Березанцев, В.Г. Расчёт прочности оснований сооружений / В.Г. Березанцев. – Л : Госстройиздат, 1960. – 139 с.
3. Темкин, Л.Е. Строительные нормы и правила. Свайные фундаменты. СНиП II-17-77. Стройиздат. / Л.Е. Темкин, Б.В. Бахолдин, Н.Б. Экимян, Ю.Г. Трофименков. – Москва, 1978. – 59 с.
4. Кубецкий, В.Л. Технические рекомендации по проектированию и устройству свайных фундаментов, выполненных с использованием разрядно-импульсной технологии для зданий повышенной этажности (свай-РИТ) ТР 50-180-06. / В.Л. Кубецкий, В.Ф. Афанасьева, В.А. Косоруков, В.В. Иванов. – Москва, 2006. – 46 с.
5. Бахолдин, Б.В. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.03-85. / Б.В. Бахолдин, В.П. Петрухин, И.В. Колыбин. – Москва, 2011. – 148 с.
6. Быховцев, В.Е. Расчет свай-РИТ по первому предельному состоянию / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 3 (20). – С. 88–91.
7. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
8. Быховцев, В.Е. Приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в грунтовом основании / В.Е. Быховцев, С.В. Киргинцева // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 107–111.