

## Определение рациональной конструкции РИТ-свай в нелинейно-деформируемом неоднородном грунтовом основании

Ю.Д. БОНДАРЕВА

Методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования определяется рациональная конструкция РИТ-свай.

**Ключевые слова:** РИТ-свая, количество уширений, зоны уплотнения, нелинейность, осадка.

The method of computer object-oriented modeling is determined by a rational construction RIT-piles.

**Keywords:** RIT-piles, quantity of broadening, seal area, the nonlinearity, sediment.

**Физические предпосылки работы.** При проектировании строительных объектов всегда возникает необходимость определения экономически эффективных фундаментов зданий для каждой строительной площадки. При определённых свойствах грунтового основания строительной площадки экономически целесообразным может оказаться фундамент на основе свай, устроенных с применением резонансно-импульсной технологии (РИТ-свай). Возникающая при этом взрывная волна в однородной среде согласно закону Паскаля по всем направлениям действует равнозначно. Диаметр образуемой полости будет зависеть от первичных характеристик грунта, от мощности и количества взрывов и их концентрации. Если взрывы производить в одной точке, то образуемая полость будет квазисферической. Камуфлетные уширения могут устраиваться с различными расстояниями между ними. Вокруг камуфлетных уширений образуются зоны уплотнённого грунта, которые будут частично или полностью накладываться, только соприкасаться или находиться на некотором расстоянии между собой. Несущая способность такой сваи будет определяться её геометрическими размерами, количеством уширений и физико-механическими характеристиками элементов структуры грунтового основания естественного залегания и в зонах уплотнения. Вследствие этого возникает задача определения рациональной конструкции и геометрических размеров РИТ-свай под заданную нагрузку. В целом РИТ-свая и грунтовое основание образуют сложную по структуре и свойствам нелинейную и неоднородную геотехническую систему деформируемых твёрдых тел. Исследование такой системы возможно комплексно: методами натурального эксперимента и методами математического и компьютерного моделирования [1], [3], [4].

**Закон деформирования уплотняемого грунтового основания.** Закон деформирования элементов структуры уплотняемого грунтового основания принят в виде степенной функции гиперболического типа в цилиндрической системе координат

$$E = a \cdot r^n, \quad a > 0, \quad n < 0; \quad R_{\text{уш}} \leq r \leq R_{\text{упл}}. \quad (1)$$

При  $r = R_{\text{упл}}$   $E = E_0$ , поэтому из (1) следует  $E_0 = a R_{\text{упл}}^n$ ,  $a = E_0 / R_{\text{упл}}^n$  и уравнение (1) примет вид

$$E_{\text{упл}} = E_0 \left( \frac{r}{R_{\text{упл}}} \right)^n. \quad (2)$$

В работе [2] показано, что

$$R_{\text{упл}} = (1,2 - 2) R_{\text{уш}}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{упл}}$  и  $R_{\text{уш}}$  – внешний и внутренний радиусы зоны уплотнения.

Используя (1)–(3) и результаты натурального эксперимента методом компьютерного моделирования исследовалось влияние количества уширений на несущую способность свай.

**Экспериментальные исследования зависимости осадки свай-РИТ от количества уширений при вертикальной нагрузке.** В настоящей работе при выполнении исследований были использованы результаты натурального эксперимента по определению осадки РИТ-свай, выполненные в отделе «Основания и фундаменты» РУП БелНИИС. На рисунках 1, 2 представлены графики зависимости осадки свай от количества уширений при различных нагрузках.

Паспорт испытания сваи Рит-1 статической вдавливающей нагрузкой по СТБ 2242 на опытной площадке ОП 1 (глинистые грунты), рисунок 1, диаметр ствола сваи 151 мм, длина 3 м, уширение в уровне пяты диаметром 460 мм.

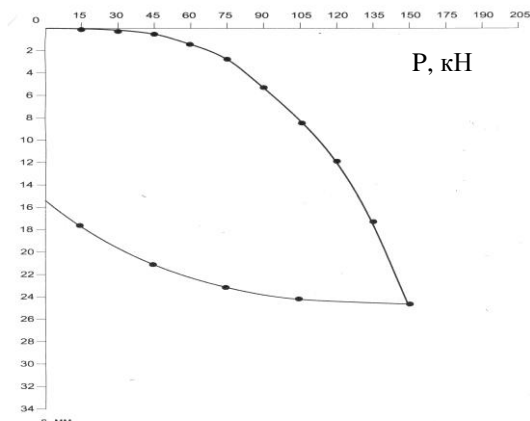


Рисунок 1 – График испытания сваи-РИТ № 1 статической вдавливающей нагрузкой

Паспорт испытания свай Рит-2–4 статической вдавливающей нагрузкой по СТБ 2242 на опытной площадке ОП 2 (слоистое основание), рисунок 2.

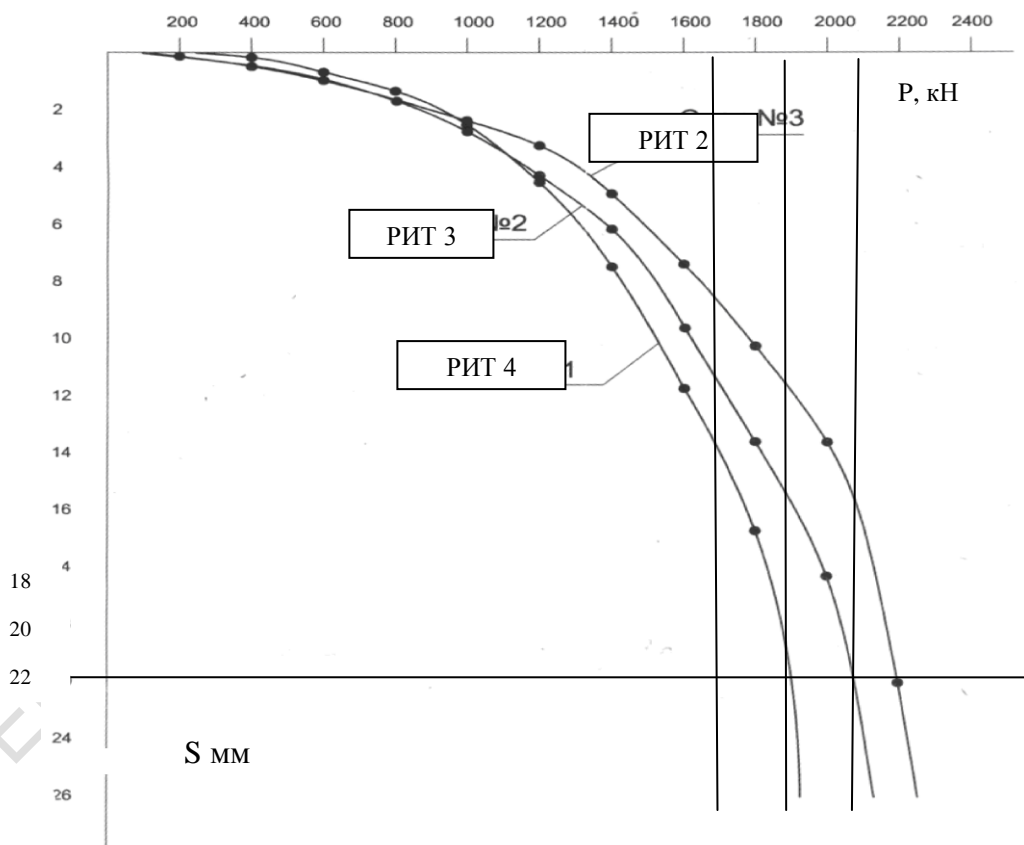


Рисунок 2 – Графики испытания свай-РИТ № 2–4 статической вдавливающей нагрузкой

1. Характеристика свай РИТ 2–4: буронабивные с диаметром ствола Ø250 мм, выполнены по технологии РИТ, длиной 16,7 м, с уширениями Ø650 мм вдоль ствола для РИТ-2 через 0,5 м начиная от уровня пяты; для РИТ-3 через 0,75м; для РИТ-4 через 1м.

2. Грунтовые условия для свай РИТ 2–4: слоистое основание из грунтов.

Средневзвешенные значения физико-механических характеристик грунтового основания получены следующие:  $\varphi = 28.47$ ,  $c = 0.004$  МПа,  $E = 19.77$  МПа.

**Математическая модель системы РИТ-свай и грунтового основания. Концептуальная модель системы основания и фундаментов.** Структурно грунтовые основания представлены весьма сложными напластованиями различных грунтовых слоёв, линз, включений и вклиниваний. Геометрические и физико-механические характеристики и законы деформирования каждого из указанных элементов структуры могут быть самые разнообразные, но сплошность среды не нарушается даже в случае подработанных оснований. Совершенствование методов расчёта и применение современных компьютерных технологий позволило подойти к расчёту оснований с общих позиций и учесть при этом много таких факторов, которые ранее не могли быть учтены в связи с возникающими при этом большими математическими трудностями. Всё это даёт возможность рассматривать грунтовые основания и фундаменты как произвольную неоднородную нелинейно-деформируемую среду с произвольными законами деформирования любого её элемента. Напряжения и деформации в элементах этой зоны по мере удаления от контактной поверхности убывают до полного исчезновения. Поверхность, на которой напряжения и (или) деформации равны нулю будет границей деформируемой зоны. В границах деформированной зоны будет некоторое количество структурных элементов с различными свойствами и связями между ними [5], [6].

Следовательно, основание, фундамент и здание образуют единую систему и её исследование правомочно проводить в соответствии с принципами системного подхода посредством применения компьютерных технологий [1], [2].

Для этого необходимо от определенной в полупространстве системы перейти к адекватной системе, определенной в пространственной конечномерной области. В настоящей работе в основу концептуальной модели системы основания и фундаментов положены следующие критерии:

1. Основание, фундамент и здание рассматриваются как единая система.

2. Основание по своей структуре, геологическим напластованиям и их физико-механическим свойствам может быть произвольным. Все элементы структуры основания должны быть геометрически и физически описаны.

3. В общем случае основание считается нелинейно-деформируемым.

4. Форма, размеры и жесткость фундамента могут быть произвольными.

Таким образом, концептуальная модель системы представляется как конечная совокупность механико-математических моделей элементов системы, т. е. основание, фундамент и здание рассматриваются как сложная единая система.

**Общая структура математической модели систем механики грунтов.** Учитывая произвольность постановки задачи решать ее лучше методом математического моделирования на основе метода конечных элементов и методов численного решения нелинейных краевых задач. Это сразу накладывает свои требования на структуру ядра математической модели. Будем строить его на основе одного из энергетических принципов, например, на основе принципа минимума полной энергии системы. Математическая модель системы оснований и фундаментов будет иметь следующее содержание:

1. Геометрическая модель геологического разреза основания.

2. Механико-математическая модель элементов грунтового основания в общем случае

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i),$$

для грунтов естественного залегания в настоящей работе принято

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

где  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – интенсивности напряжений и интенсивности деформаций, для уплотняемых элементов грунтового основания модуль деформации

$$E = a \cdot r^n, \quad a > 0, \quad n < 0; \quad R_{\text{вн}} \leq r \leq R_{\text{вн}},$$

где  $R_{\text{вн}}$  и  $R_{\text{вн}}$  – внешний и внутренний радиусы зоны уплотнения.

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

4. Условия равновесия системы (ядро математической модели):

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

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

**Учёт локального уплотнения и нелинейной деформируемости грунтового основания РИТ-свай.** Особенностью системы грунтового основания и РИТ-свай является неоднородность её структуры и свойств. Изначально грунтовое основание может быть даже однородным, но вследствие устройства РИТ-свай всегда появляются зоны уплотнённого грунта, примыкающие к стволу сваи. На этапе построения математической модели исследуемой системы размеры и физико-механические характеристики этих зон должны быть определены. В работе [2] предложено численно-аналитическое решение этой задачи, (см. (2, 3)). Наиболее эффективная методика исследования математической модели получаемой физической системы может быть построена только на основе метода конечных элементов и метода энергетической линеаризации [1], [3].

В методе энергетической линеаризации краевой задаче нелинейной теории упругости телу объёма  $V$  с границей  $\Gamma$  и законом деформирования ставится в соответствие геометрически тождественное гипотетическое линейно-упругое тело с законом деформирования

$$\sigma_i^r = E^r \varepsilon_i.$$

Модуль деформации  $E^r$  подлежит определению и должен быть таким, чтобы при тождественных граничных условиях для обоих тел их смещения совпадали.

В силу поставленного условия для модуля деформаций  $E^r$  и тождественности граничных условий для рассматриваемых твёрдых тел можно утверждать, что работы внешних сил на смещениях для исследуемого нелинейно – деформируемого и гипотетического линейно-упругого тел будут равны, т. е. будем иметь  $W^n = W^r$ , тогда

$$\delta \int_V (\Pi^n - \Pi^r) dV = \delta \int_V (\int_V \sigma_i^n d\varepsilon_i - \int_V \sigma_i^r d\varepsilon_i) dV = \delta \int_V ( \int_V f(**) \varepsilon_i d\varepsilon_i - E^r \int_V \varepsilon_i d\varepsilon_i ) dV = 0,$$

где  $\Pi^n$  – энергия деформации нелинейно-упругого тела;  $\Pi^r$  – энергия деформации гипотетического линейно-упругого тела; индексы «n» и «r» – признаки нелинейно-упругого и гипотетического линейно-упругого тел.

Полученное выражение представим в следующей форме

$$\delta \int_V \varepsilon_i (F(\varepsilon_i) - \sigma_i^r / 2) dV = \int_V \delta \varepsilon_i (F(\varepsilon_i) - \sigma_i^r / 2) dV = 0, \tag{4}$$

где  $F(\varepsilon_i) = \varepsilon_i^{-1} \int_V f(**) \varepsilon_i d\varepsilon_i$ .

В соответствии с основной леммой вариационного исчисления из (4) следует:

$$F(\varepsilon_i) - \sigma_i^r / 2 = 0. \tag{5}$$

При законе деформирования в виде степенной функции из (5) получим:

$$\sigma_i^n = 0,5 (1 + m) \sigma_i^e \tag{6}$$

Подставим (6) в уравнение состояния

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

и, учитывая закон Гука  $\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e$ , решим его относительно  $\varepsilon_i$ , получим:

$$\varepsilon_i = \left( \frac{1 + m}{2A} E_0 \sigma_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad E^r = \frac{\sigma_i^e}{\varepsilon_i} = E_0 \left[ \frac{2A}{(1 + m) E_0 \varepsilon_i^{1-m}} \right]^{\frac{1}{m}}.$$

Для полученных значений  $E^r$  решается линейная задача. Полученное решение будет являться и решением исходной нелинейной задачи.

**Компьютерное моделирование осадки РИТ-свай в грунтовом основании в зависимости от количества уширений и внешней нагрузки.**

**Исходные данные.** При компьютерном моделировании сложной нелинейной системы «РИТ-свая – грунтовое основание» необходимы следующие исходные данные:

1. Область определения системы: определяется форма и начальные размеры расчётной области, при этом определяется мощность и глубина залегания слоёв, линз и включений грунтов с указанием их физико-механических характеристик и законов деформирования.

2. Величина и характер распределения внешней нагрузки.

3. Параметры дискретизации: определяются исходя из размеров, структуры и свойств грунтового основания и РИТ-сваи.

**Построение виртуальной модели системы.** При работе с программным обеспечением компьютерного моделирования заданной структуры сваи и грунтовых оснований выполняются следующие действия, рисунок 3:

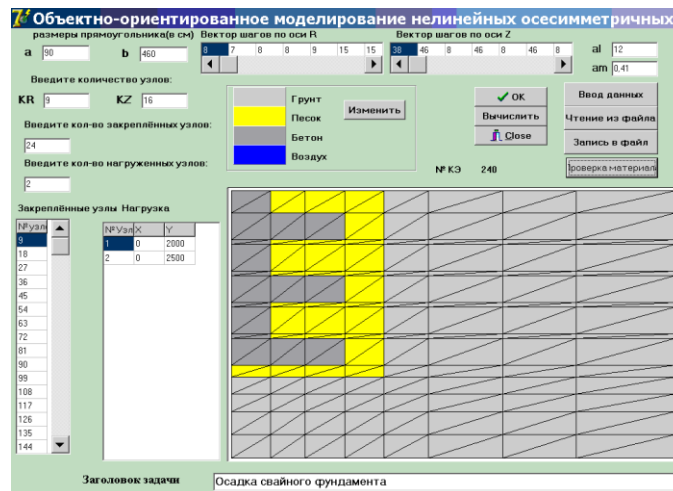


Рисунок 3 – Главное окно приложения – Компьютерная модель системы

1. Формируются вектора для автоматического построения дискретизованной области;
2. Создается наполнение базы данных характеристик грунтового основания;
3. Формируются вектора граничных условий для заданной системы;
4. На экране монитора строится пространственная виртуальная физическая модель системы, производится адресная привязка конструктивных элементов фундамента, при этом каждому конечному элементу системы назначаются его начальные свойства, считываемые из соответствующей базы данных (рисунок 3).

Далее происходит численное решение сформированной задачи. Результаты решения представлены значениями компонент векторов перемещений для каждого узла дискретизованной области при условиях линейного и нелинейного деформирования.

**Компьютерное моделирование.** В плане приведенных экспериментальных исследований зависимости осадки сваи-РИТ от количества уширений при вертикальной нагрузке методом компьютерного моделирования исследовалась зависимость осадки РИТ-сваи от количества и расположения уширений и зон локального уплотнения

**РИТ-свая № 1:** рисунок 1, опытная площадка ОП 1, диаметр ствола сваи 151 мм, длина 3 м, уширение в уровне пяты диаметром 460 мм.

Для этой физической системы было построено несколько модельных задач, отличающихся количеством уширений и расстояниями между ними. Для каждой модельной задачи по приведенному выше алгоритму определялись зоны уплотнения грунта и его физико-механические характеристики. Определялись осадки РИТ-сваи в зависимости от количества уширений, их расположения и внешней нагрузки, соответствующей данным эксперимента. Результаты вычислений представлены в таблицах № 1, 2, 3 и в графиках на рисунках 4, 5.

Таблица № 1 – Осадка РИТ-свай,  $S_{\text{пнт}}$ , в зависимости от нагрузки и количества уширений

| Р, т<br>п | 3     | 6    | 9    | 12   | 14    |
|-----------|-------|------|------|------|-------|
| Опыт      | 0,2   | 1,7  | 5,6  | 12,1 | 18,8  |
| 1         | 0,32  | 1,88 | 5,7  | 12,3 | 18,54 |
| 2         | 0,164 | 1,0  | 2,9  | 6,2  | 9,3   |
| 3         | 0,1   | 0,6  | 1,77 | 3,78 | 5,7   |
| 4         | 0,085 | 0,52 | 1,53 | 3,28 | 4,94  |

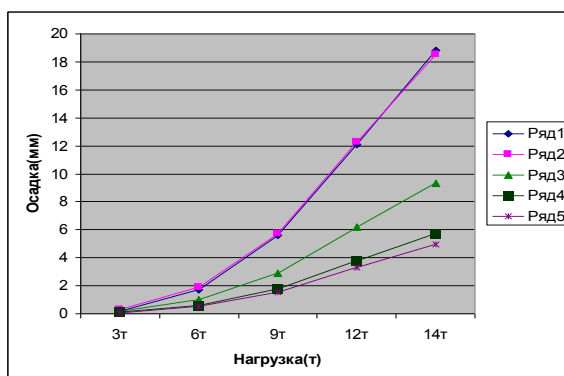


Рисунок 4 – Графики осадки  $S$ (мм) РИТ-свай в зависимости от нагрузки при фиксированном количестве уширений

Таблица № 2 – Осадка РИТ-свай,  $S_{\text{пнт}}$ , в зависимости от количества уширений при заданных нагрузках

| опыт | 1    | 2     | 3    | 4+    |
|------|------|-------|------|-------|
| 0,2  | 0,32 | 0,164 | 0,1  | 0,085 |
| 1,7  | 1,88 | 1,0   | 0,6  | 0,52  |
| 5,6  | 5,7  | 2,9   | 1,77 | 1,53  |
| 12,1 | 12,3 | 6,2   | 3,78 | 3,28  |
| 18,8 | 18,5 | 9,3   | 5,7  | 4,94  |

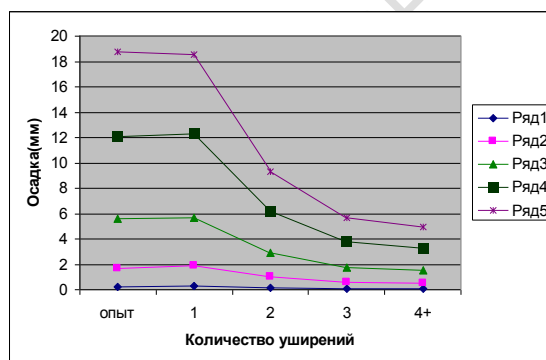


Рисунок 5 – Графики осадки РИТ-свай в зависимости от количества уширений при заданных нагрузках

Таблица 3 – Осадка РИТ-свай,  $S_{\text{пнт}}$ , в зависимости от нагрузки и диаметра

| Р <sub>т</sub><br>h | 3    | 6    | 9    | 12    | 14   |
|---------------------|------|------|------|-------|------|
| опыт                | 0,2  | 1,7  | 5,6  | 12,1  | 18,8 |
| тонкая              | 3,75 | 23,9 | 70,6 | 152,5 | 230  |

Устройство одного уширения позволило увеличить несущую способность свай не менее как в 10 раз (таблица № 3). Устройство второго уширения, по сравнению с предыдущим вариантом, увеличило несущую способность почти в 2 раза. Устройство третьего уширения увеличило несущую способность на 35 %.

Для рассматриваемой сваи оптимальное количество уширений  $n = 3$ , т. е. расстояние между уширениями равно их диаметру.

Следовательно, устройто для трехметровой сваи с тремя уширениями является оптимальным вариантом и позволяет уменьшить расход материала на 25 %.

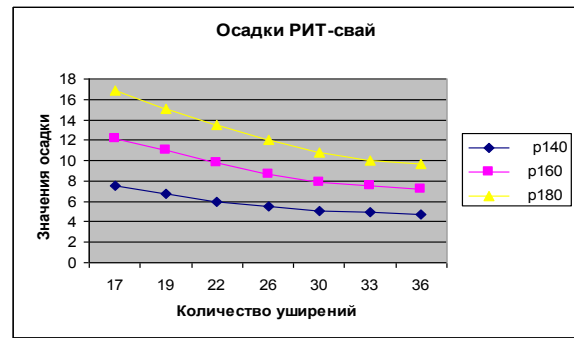
**РИТ-сваи № 2–4:** рисунок 2, опытная площадка ОП 2 (слоистое основание), диаметр ствола сваи  $\varnothing 250$  мм, длиной 16,7 м, с уширениями  $\varnothing 650$  мм вдоль ствола для РИТ-2 через 0,5 м начиная от уровня пяты; для РИТ-3 через 0,75м; для РИТ-4 через 1м.

Согласно данным эксперимента количество  $n$  уширений, начиная от уровня пяты, для испытываемых РИТ-свай будет равно для РИТ-2 через 0,5 м  $n = 33$ ; для РИТ-3 через 0,75м  $n = 22$ ; для РИТ-4 через 1м  $n = 17$ . Зона уплотнения образуется только в зоне РИО (резонансно – импульсной обработки) грунта и геометрически будет подобна зоне уширения. Внешний и внутренний радиусы зоны уплотнения  $R_{\text{упл}}$  и  $R_{\text{уш}}$ .

На рисунке 6 представлены данные зависимости осадки РИТ-свай от количества  $n$  уширений при различных нагрузках и построены соответствующие графики. Для рассматриваемых свай рациональным будет  $n = 26$  при всех нагрузках. При этом условии для исследуемых РИТ-свай расстояние между уширениями будет  $H = L/n = 1760 / 26 = 64,23$  см.

Таблица №4 – Осадка РИТ-свай в зависимости от нагрузки и уширений

| n  | p140 | p160 | p180 |
|----|------|------|------|
| 17 | 7,5  | 12,2 | 16,9 |
| 19 | 6,7  | 11   | 15,1 |
| 22 | 6    | 9,8  | 13,5 |
| 26 | 5,5  | 8,7  | 12   |
| 30 | 5,1  | 7,9  | 10,8 |
| 33 | 4,9  | 7,5  | 10   |
| 36 | 4,7  | 7,2  | 9,7  |

Рисунок 5 – Графики осадки  $S$ (mm) РИТ-свай в зависимости от количества уширений при заданных нагрузках

Вследствие общего анализа результатов исследования показано:

1. Для РИТ-свай любой длины расстояние между уширениями можно принимать  $H = D_{уш} = 2 R_{уш}$ .
2. Уплотнение грунта вокруг тела РИТ-свай с диаметром ствола равном диаметру уширения увеличивает несущую способность свай почти в 2 раза (таблица № 5).

Таблица №5 – Влияние уплотнения на осадку свай при различных нагрузках

| $P_t$                           | 3    | 6    | 9    | 12  | 14  |
|---------------------------------|------|------|------|-----|-----|
| $D_{св}$                        |      |      |      |     |     |
| $D_{св} = D_{вш} + \text{упл.}$ | 0,09 | 0,52 | 1,48 | 3,1 | 4,6 |
| $D_{св} = D_{вш} - \text{упл.}$ | 0,14 | 0,93 | 2,74 | 5,9 | 8,9 |

### Литература

1. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
2. Быховцев, В.Е. Математическое и компьютерное моделирование осадки РИТ-свай в нелинейно-деформируемом грунтовом основании / В.Е. Быховцев, Ю.Д. Бондарева // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2016. – № 3 (96). – С. 92–95.
3. Бондарева, Ю.Д. Моделирование методом конечных элементов неоднородных систем деформируемых твёрдых тел / Ю.Д. Бондарева // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2015. – № 6 (93). – С. 80–86.
4. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твёрдых деформируемых средах / М.А. Журавков. – Мн. : БГУ, 2002. – 456 с.
5. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.
6. Технические рекомендации по проектированию и устройству свайных фундаментов, выполненных с использованием разрядно-импульсной технологии для зданий повышенной этажности (свай-РИТ) ТР 50-180-06. – М., 2006.