

# ДЕФОРМАЦИИ ЛОКАЛЬНО-УПЛОТНЯЕМОГО НЕЛИНЕЙНО-ДЕФОРМИРУЕМОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ РИТ-СВАИ МИНИМАЛЬНОЙ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ПОД ЗАДАННУЮ НАГРУЗКУ

В.Е. БЫХОВЦЕВ, В.С. СМОРОДИН, Ю.Д. БОНДАРЕВА

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 14 декабря 2017*

**Аннотация.** Методом численно-аналитического анализа исследуются условия построения РИТ-свай минимальной материалоемкости под заданную нагрузку.

*Ключевые слова:* РИТ-сваи, грунтовые основания, локальное уплотнение, нелинейность деформирования.

**Abstract.** Using the method of numerical and analytical analysis conditions for constructing a RPT-pile of a minimum material capacity for a given load is considered.

*Keywords:* RPT-piles, soil bases, local compaction, non-linearity of deformation.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 51-56**  
**Deformation of a locally sealed nonlinearly-deformed basis**  
**of RPT-pile of minimum materiality under the predetermined load**  
**V.E. Bykhovtsev, V.S. Smorodin, Y.D. Bondareva**

## Введение

Многочисленные попытки унификации системного подхода при решении конкретных производственных задач привели, как известно, к понятию сложной технической системы как многопараметрического объекта, представимого конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы. Подобный системный подход дает основания рассчитывать на создание необходимой базы, позволяющей в дальнейшем в каждой конкретной предметной области работать с системами любой степени сложности, вне зависимости от ее ограниченности рамками определенной формализации. Значительным вкладом в этой связи при решении проблемы энерго-ресурсосбережения в промышленном и гражданском строительстве является разработка эффективных методов и новых технологий проектирования фундаментов минимальной материалоемкости, соответствующих требованиям строительных норм и правил. При этом необходимо подчеркнуть, что конструктивно подобные фундаменты могут быть различного типа.

## Устройство, структура и свойства РИТ-свай

Как показывают результаты зарубежных экспериментальных научных исследований и исследований, проводимых в Республике Беларусь, в настоящее время представляют существенный интерес фундаменты на основе свай, устроенных с помощью резонансно-импульсной технологии (РИТ-свай) [1]. Сущность резонансно-импульсной технологии заключается в том, что изготовленную скважину заполняют мелкозернистым бетоном и обрабатывают серией высоковольтных электрических разрядов (рис. 1). При этом возникает электрогидравлический эффект, в результате которого формируется ствол свай, цементируется и уплотняется окружающий грунт.

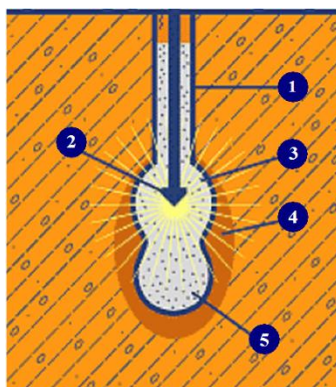


Рис. 1. Схема формирования РИТ-свай: 1 – скважина до обработки; 2 – электродная система; 3 – зона цементации грунта; 4 – зона уплотнения грунта; 5 – камуфлетное уширение в основании РИТ-свай

Первоначальный диаметр скважины в результате обработки расчетной серией разрядов может быть увеличен более чем в 2 раза, в зависимости от энергии, подаваемой в скважину, и гидрогеологических условий площадки. Окружающие грунты уплотняются, а пористость в зоне воздействия ударного импульса снижается (рис. 1).

В результате серии электровзрывов в зонах разряда образуются камуфлетные уширения, вокруг которых формируются зоны уплотненного грунта (так называемые зоны резонансно-импульсной обработки (РИО)). Размеры этих зон зависят от первичных характеристик грунта, а также от количества и силы взрыва в одной точке. На рис. 2 представлены графики зависимости осадки от количества  $n$  уширений при различных нагрузках.

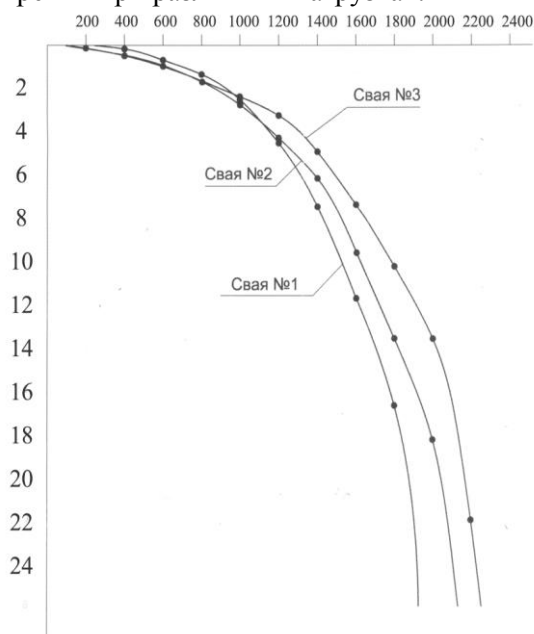


Рис. 2. Осадки РИТ-свай от вдавливающей нагрузки

В целом РИТ-свая и грунтовое основание образуют сложную по структуре и свойствам нелинейную и неоднородную геотехническую систему деформируемых твердых тел [2].

Исследование такой системы возможно комплексно: методами натурного эксперимента и методами математического и компьютерного моделирования. Несущая способность такой сваи будет определяться ее геометрическими размерами, количеством уширений и физико-механическими характеристиками элементов структуры грунтового основания, включая зоны РИО. Вследствие этого возникает проблемная задача построения рациональной структуры и определения геометрических размеров РИТ-свай под заданную нагрузку.

### Экспериментальные исследования зависимости осадки РИТ-свай от количества уширений и нагрузки

Паспорт испытания свай РИТ-2-4 статической вдавливающей нагрузкой на опытной площадке ОП 2 (слоистое основание).

Характеристика свай РИТ 2-4: буронабивные с диаметром ствола  $\varnothing 250$  мм, выполнены по технологии РИТ, 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 0,75 м; для РИТ-4 – через 1 м.

Вид испытания: статической вдавливающей нагрузкой по СТБ 2242.

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

1. Насыпной искусственный: толщина слоя – 0,6 м, удельный вес  $\gamma$ ,  $\text{кН/м}^3$  – 19,4, угол внутреннего трения  $\varphi$ , 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  $\gamma$ ,  $\text{кН/м}^3$  – 20,10, угол внутреннего трения  $\varphi$ , 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  $\gamma$ ,  $\text{кН/м}^3$  – 18,00, угол внутреннего трения  $\varphi$ , 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  $\gamma$ ,  $\text{кН/м}^3$  – 17,40, угол внутреннего трения  $\varphi$ , град – 30, сцепление  $c$ , МПа – 0,001, модуль деформации  $E$ , МПа – 25.

5. Песок средний, насыщенный водой, толщина слоя – 4,7 м, удельный вес  $\gamma$ ,  $\text{кН/м}^3$  – 19,40, угол внутреннего трения  $\varphi$ , град – 33, сцепление  $c$ , МПа – 0,001, модуль деформации  $E$ , МПа – 28.

Получены следующие средневзвешенные значения физико-механических характеристик грунтового основания:  $\varphi = 28,47$ ,  $c = 0,004$  МПа,  $E = 19,77$  МПа. Согласно закону Паскаля взрывная волна в однородной среде по всем направлениям действует равнозначно. При устройстве РИТ-свай диаметр образуемой полости будет зависеть от мощности и количества электровзрывов и их концентрации. Если взрывы производить в одной точке, то образуемая полость будет квазисферической.

Согласно данным эксперимента, диаметр уширения получен равным  $\varnothing 650$  мм и количество уширений  $n$ , начиная от уровня пяты, для испытываемых РИТ-свай будет равно: для РИТ-2 через 0,5 м  $n = 33$ ; для РИТ-3 через 0,75 м  $n = 22$ ; для РИТ-4 через 1 м  $n = 17$ .

Зона уплотнения образуется только в зоне РИО грунта и геометрически будет подобна зоне уширения. Внешний и внутренний радиусы зоны уплотнения  $R_{\text{упл}}$  и  $R_{\text{уш}}$ , максимальное значение модуля деформации зоны уплотнения будет на уровне контактной поверхности, а минимальное – в конце зоны уплотнения. На основании полученных экспериментальных данных построены графики зависимости осадки РИТ-свай от количества уширений и заданной нагрузки (рис. 3, таблица).

Рассматривалось четыре значения внешней нагрузки: 120, 140, 160, 180 т. Характерным для осадки свай при любых нагрузках является быстрое уменьшение осадки при увеличении количества уширений от одного до предельного и последующее затухание скорости уменьшения осадки до почти полной ее стабилизации.

На этом этапе добавление одной и более уширений незначительно уменьшает осадку РИТ-свай. Это значит, что для каждой величины внешней нагрузки может быть определено рациональное значение количества уширений. Использование этого фактора позволяет значительно уменьшить материалоемкость РИТ-свай.

Определить рациональное значение количества уширений можно посредством определения угла наклона касательной в точке графика осадки РИТ-свай в зависимости от количества уширений при заданных нагрузках (рис. 4–7) или используя построенную математическую модель, выражающую связь задаваемой нагрузки на сваю, количества уширений и осадки этой сваи.

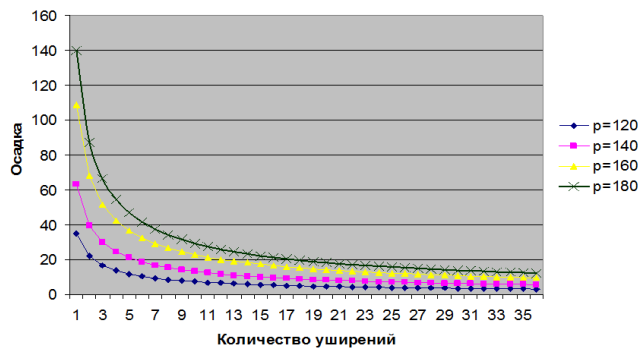


Рис. 3. Графики осадки РИТ-свай в зависимости от количества уширений при заданных нагрузках

**Осадка сваи в зависимости от нагрузки и количества уширений**

$n$	$p = 120 \text{ т}$	$p = 140 \text{ т}$	$p = 160 \text{ т}$	$p = 180 \text{ т}$
1	35	63	109	140
3	16,58	29,84	51,63	66,32
5	11,71	21,08	36,48	46,86
7	9,32	16,77	29,02	37,27
9	7,85	14,14	24,44	31,42
11	6,85	12,33	21,34	27,41
13	6,11	11,01	19,05	24,47
15	5,55	9,99	17,28	22,20
17	5,09	9,17	15,87	20,39
19	4,72	8,50	14,71	18,90
21	4,41	7,94	13,75	17,66
23	4,15	7,47	12,92	16,60
25	3,92	7,05	12,21	15,68
27	3,72	6,69	11,59	14,88
29	3,54	6,38	11,04	14,18
31	3,38	6,09	10,55	13,55
33	3,24	5,84	10,11	12,98
35	3,11	5,61	9,71	12,47

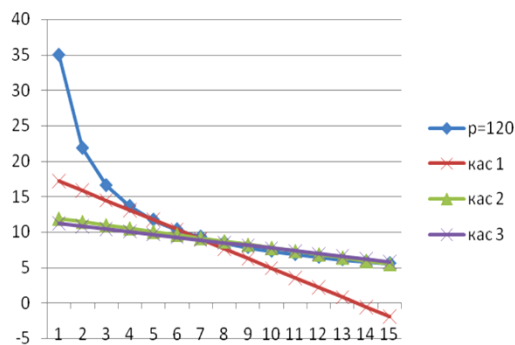


Рис. 4. Определение угла наклона касательной,  $P = 120 \text{ т}$

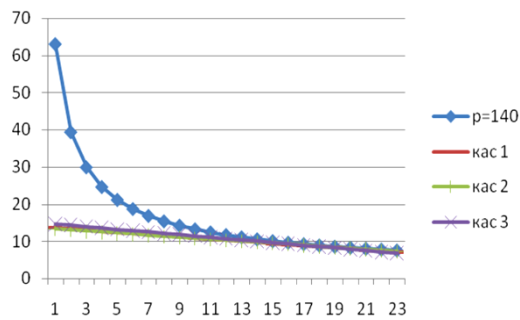


Рис. 5. Определение угла наклона касательной,  $P = 140 \text{ т}$

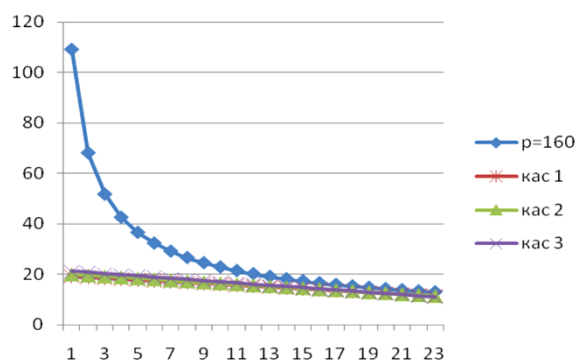


Рис. 6. Определение угла наклона касательной,  $P = 160$  т

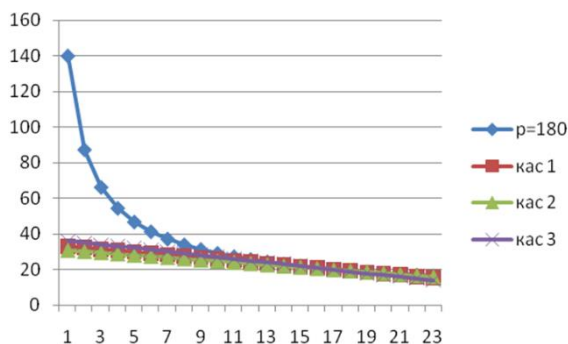


Рис. 7. Определение угла наклона касательной,  $P = 180$  т

Разработанная математическая модель связи задаваемой нагрузки на сваю, количества уширений и осадки сваи имеет вид

$$n = \left( 0,0001 \times \frac{m}{2S} \times P^{1/\mu} \right)^{1/2\mu},$$

где  $m$  – параметр нелинейного закона деформирования;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $S$  – осадка сваи;  $n$  – рациональное количество уширений РИТ-сваи.

При максимальном количестве уширений РИТ-свая может рассматриваться как прямая цилиндрическая свая в грунтовом основании. В этом случае равновесие системы будет определяться только одним дифференциальным уравнением для осадки сваи, которое имеет решение [3]:

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

Таким образом, проведенные исследования дают теоретическую основу для оптимизации конструкции РИТ-сваи в нелинейно-деформируемом неоднородном грунтовом основании.

### Заключение

В настоящей работе изложены результаты исследований авторов по разработке методики и технологии конструирования РИТ-сваи минимальной материалоемкости в нелинейно-деформируемом грунтовом основании при учете зон локального уплотнения грунта вследствие устройства РИТ-сваи. При выполнении исследований были использованы результаты натурного эксперимента по определению осадки РИТ-сваи, выполненные в отделе «Основания и фундаменты» РУП БелНИИС.

### Список литературы

1. Быховцев В.Е., Смородин В.С., Прокопенко Д.В. Методика расчета по предельным состояниям свай, устроенных с применением разрядно-импульсной технологии // Докл. БГУИР. 2016. № 8 (102). С. 71–75.
2. Журавков М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах. Минск: БГУ, 2002. 456 с.

3. Быховцев В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел. Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины». 2007. 219 с.

### References

1. Byhovcev V.E., Smorodin V.S., Prokopenko D.V. Metodika rascheta po predel'nyh sostojanijam svaj, ustroennyh s primeneniem razrjadno-impul'snoj tehnologii // Dokl. BGUIR. 2016. № 8 (102). S. 71–75. (in Russ.)
2. Zhuravkov M.A. Matematicheskoe modelirovanie deformacionnyh processov v tverdyh deformiruemyh sredah. Minsk: BGU, 2002. 456 s. (in Russ.)
3. Byhovcev V.E. Komp'juternoe ob#ektno-orientirovanное modelirovanie nelinejnyh sistem deformiruemyh tverdyh tel. Gome!': UO «GGU im. F. Skoriny». 2007. 219 s. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Смородин В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой математических проблем управления и информатики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

Быховцев В.Е., д.т.н., профессор, профессор кафедры вычислительной математики и программирования Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

Бондарева Ю.Д., магистрант кафедры математических проблем управления и информатики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

### Information about the authors

Smorodin V.S., D. Sci, professor, head of the department of mathematical problems of control and Informatics of Gomel state university named after F. Scorina.

Bykhovtsev V.E., D. Sci, professor, professor of the department of computational mathematics and programming of Gomel State University named after F. Scorina.

Bondareva Y.D., master student of the department of mathematical problems of control and informatics of Gomel state university named after F. Scorina.

### Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,  
г. Гомель, ул. Советская, 104,  
Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины  
тел. +375-29 -329-27-99;  
e-mail: smorodin@gsu.by  
Смородин Виктор Сергеевич

### Address for correspondence

246019, Republic Belarus,  
Gomel, Sovetskaya st., 104,  
Gomel state university  
named after F. Scorina  
тел. +375 29 329 27 99;  
e-mail: smorodin@gsu.by  
Smorodin Victor Sergeevich