

УДК 624.138.24

**Шакиров И.Ф.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [fsrshakirov@mail.ru](mailto:fsrshakirov@mail.ru)

**Шайхутдинов И.И.** – студент

E-mail: [islamshaikhutdinov@mail.ru](mailto:islamshaikhutdinov@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Исследование несущей способности буронабивной сваи в массиве грунта, укрепленного напорной инъекцией цементного раствора**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью исследований является определение изменения несущей способности свайного фундамента при укреплении грунта вокруг сваи напорной цементацией в зависимости от параметров инъекции цементного раствора.

*Результаты.* Основные результаты выполненных исследований состоят в определении закономерностей изменения напряжений в окружающем сваю грунте в зависимости от объема и технологии нагнетания укрепляющего раствора и получении данных о влиянии укрепления грунта на несущую способность буронабивной сваи. Инъекция цементного раствора в окружающий сваю грунт создает в массиве напряженную зону, грунт вокруг сваи уплотняется, в результате чего происходит обжатие сваи и значительное увеличение трения по боковой поверхности сваи. Упрочнение грунта цементацией под нижним концом сваи приводит к увеличению лобового сопротивления сваи, но в меньшей степени, чем повышение сопротивления по боковой поверхности.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении степени влияния укрепления грунта на повышение несущей способности сваи, результаты исследований могут быть использованы в процессе разработки проектов усиления фундаментов при реконструкции зданий со значительным увеличением нагрузки на существующий свайный фундамент.

**Ключевые слова:** основание, массив грунта, упрочнение, цементация, свайный фундамент, буронабивная свая, несущая способность.

#### **Введение**

В процессе выполнения работ по реконструкции зданий и сооружений с увеличением нагрузок часто возникает необходимость в увеличении несущей способности свайных фундаментов. Усиление свайного фундамента может также потребоваться при ухудшении характеристик грунтов, окружающих сваю, например, из-за повышения влажности. Для увеличения несущей способности свайного фундамента можно применить способ подводки дополнительных свай. В настоящее время для усиления фундаментов широко используются разные типы свай, выполняемые по различным технологиям [1, 2]. Однако устройство дополнительных свай сопряжено высокой стоимостью и необходимостью проектирования конструкций, передающих нагрузку от существующего фундамента на новые сваи, что усложняет выполнение работ по усилению.

В то же время увеличения несущей способности свайного фундамента можно добиться путем укрепления грунта межсвайного пространства и в основании свай. Одним из эффективных методов укрепления грунта является метод напорной цементации [3, 4]. В результате напорной инъекции раствора грунт вокруг сваи и под ее нижним концом уплотняется, что приводит к усилению контактного взаимодействия грунта и сваи по боковой поверхности и увеличению сопротивления грунта под нижним концом [5-10].

#### **Экспериментальные исследования**

С целью определения закономерностей изменения несущей способности буронабивной сваи при укреплении грунта напорной цементацией и количественной оценки влияния параметров цементации на несущую способность были проведены экспериментальные исследования в объемном лотке лаборатории кафедры «Основания,

фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология» Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Общий вид испытательного лотка показан на рис. 1.

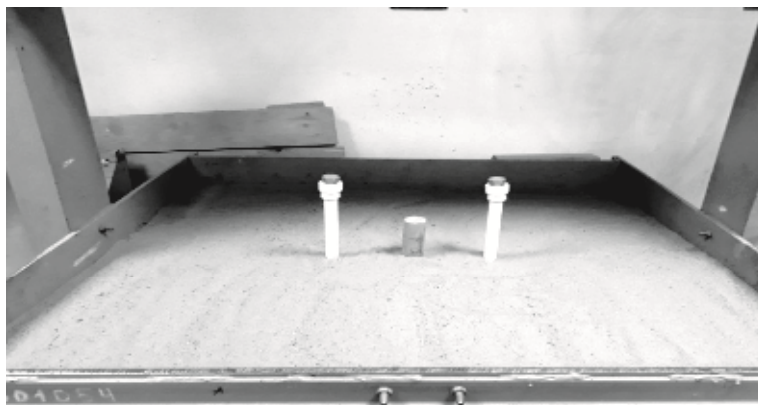


Рис. 1. Общий вид испытательного лотка (эксперимент с одиночной свай)

Для исследований был изготовлен из мелкозернистого бетона масштабная модель буронабивной сваи в соотношении 1:20. Модель сваи имеет диаметр 3,0 см и общую длину 50 см. Массив грунта для испытаний создавался из мелкозернистого песка путем послойной отсыпки с равномерным уплотнением. Физико-механические характеристики исходного грунта представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-механические характеристики грунта до начала испытаний**

Наименование показателей	Обозначение	Ед.измерения	Значение
Удельный вес	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	14,8
Удельный вес частиц грунта	$\gamma_s$	кН/м <sup>3</sup>	26,5
Удельный вес сухого грунта	$\gamma_d$	кН/м <sup>3</sup>	14,36
Коэффициент пористости	$e$	д.е.	0,845
Влажность	$W$	%	3
Угол внутреннего трения	$\varphi$	град.	25
Удельное сцепление	$c$	кПа	2

Установка модели сваи и инъекторов для нагнетания раствора в массив грунта производилась в процессе отсыпки грунта в лоток. Схема размещения модели одиночной сваи, инъекторов и измерительных приборов в лотке приведены на рис. 2.

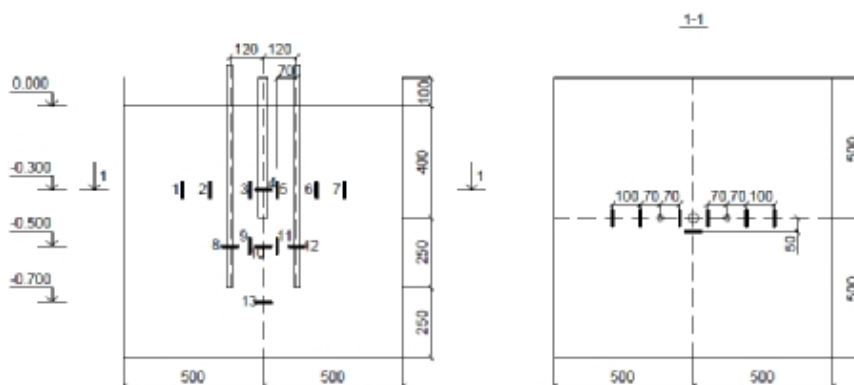


Рис. 2. Схема установки модели сваи, инъекторов и грунтовых датчиков в лоток (эксперимент с одиночной свай)

Были проведены несколько серий опытов с одиночной сваей и со свайным кустом, состоящим из четырех свай. До выполнения экспериментов с цементацией грунта проводились испытания сваи и свайного куста для определения их несущей способности в исходном грунте. По их результатам были определены общая несущая способность сваи и несущая способность по боковой поверхности (при отсутствии сопротивления грунта под нижним концом сваи).

Нагнетание цементного раствора в грунт производилась при помощи растворного насоса KSG-700 под давлением до 0,5 МПа через пластиковые инъекторы. Инъекторы в зоне инъекции с четырех сторон имеют перфорацию – отверстия диаметром 3 мм. В качестве укрепляющего раствора была использована водоцементная суспензия с водоцементным отношением 0,7, приготовленная из портландцемента марки 400. После инъекции раствора в массив грунта и его твердения в течение 5 дней снимались показания с датчиков давления, установленных в массиве грунта. В дальнейшем проводились испытания свай вертикальной статической вдавливающей нагрузкой.

Как показывают полученные результаты экспериментов, при инъекции цементного раствора в песчаный грунт уплотнение грунта вокруг инъектора происходит в радиальном направлении относительно равномерно, в результате после твердения раствора формируется грунтоцементный элемент, по форме близкий к цилиндрическому, но переменного по высоте сечения. Вокруг этого грунтоцементного столба образуется уплотненная зона грунта, размеры которого зависят от объема, нагнетаемого в инъектор, раствора. Достижение давлением инъекции определенного критического значения вызывает гидроразрыв грунта, раствор начинает распространяться в стороны по образовавшимся ходам (трещинам) в грунте. Для удержания и накопления наибольшего объема цементного раствора в зоне инъекции по мере его подачи в массив грунта необходимо плавное, без резких скачков увеличение давления до необходимого значения.

При расположении инъектора рядом с усиливаемой сваей или в межсвайном пространстве свайного куста, в результате инъекции цементного раствора происходит повышение плотности грунта и увеличивается давление грунта на боковую поверхность сваи. Степень уплотнения до определенных пределов зависит от объема нагнетаемого раствора, в каждом конкретном случае есть предельное значение объема раствора, при котором плотность грунта достигает своего максимального значения и дальше не увеличивается [4]. Уплотнение грунта достигается за счет более компактного расположения частиц грунта и уменьшения их пористости. Уплотнению также способствует временное повышение влажности песка при цементации из-за отдачи воды в грунт цементным раствором. В ходе экспериментов увеличение влажности песка в зоне инъекции составила с 3 % до 7-10 %. Было установлено, что увеличение плотности грунта в большей степени происходит у боковой поверхности сваи, в меньшей степени под нижним концом сваи. График изменения плотности песка в зависимости от объема нагнетаемого раствора показан на рис. 3.

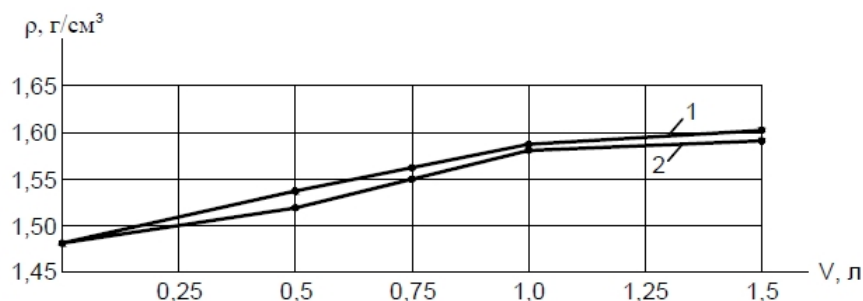


Рис. 3. График изменения плотности грунта в зависимости от объема инъектируемого раствора (1 – у боковой поверхности, 2 – под нижним концом)

В процессе инъекции раствора горизонтальные сжимающие напряжения на участке грунта между сваей и инъектором резко возрастают, достигая порядка 20-30 кПа. После снятия давления инъекции в грунте происходит релаксация напряжений, поэтому через

непродолжительное время напряжения в той же зоне составляли не более 10 кПа. На рис. 4 и 5 приведены графики изменения горизонтальных напряжений в зоне боковой поверхности сваи на глубине 30 см, измеренные согласно показаний грунтовых датчиков после стабилизации напряжений по окончании нагнетания раствора и при испытании модели сваи статической нагрузкой. Как видно из графиков, при инъекции раствора напряжения в грунте вокруг сваи увеличиваются, при статическом нагружении сначала продолжает расти, после «срыва» сваи резко уменьшаются.

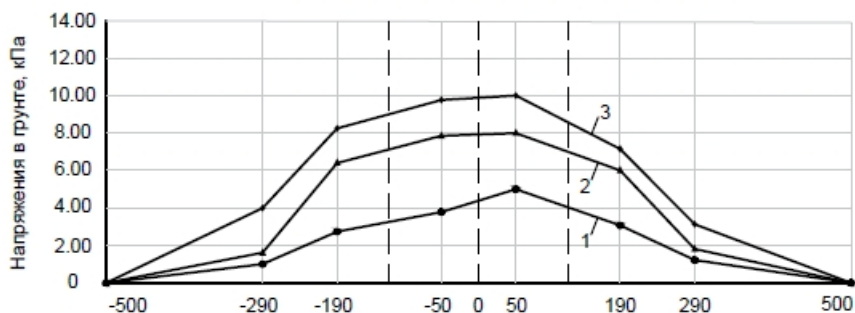


Рис. 4. Изменение горизонтальных напряжений на глубине 30 см после инъекции раствора (1, 2, 3 – при объеме нагнетаемого раствора на иньектор соответственно 0,5, 1,0 и 1,5 л)

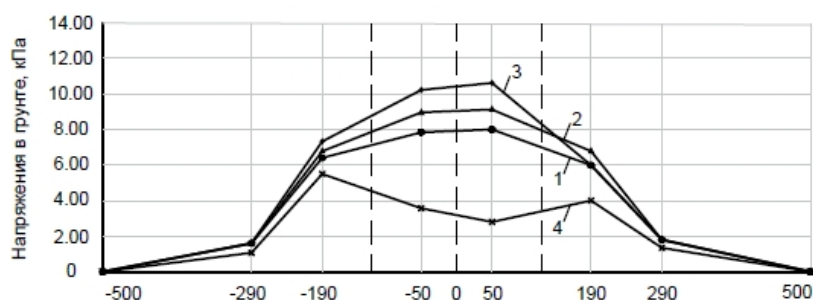


Рис. 5. Изменение горизонтальных напряжений на глубине 30 см при нагружении сваи статической нагрузкой (1 – после инъекции раствора; 2, 3, 4 – при нагрузке на сваю соответственно 8, 16 и 24 кгс; эксперимент № 5)

Графики зависимости осадки сваи от прикладываемой нагрузки при различных параметрах инъекции укрепляющего раствора приведены на рис. 6

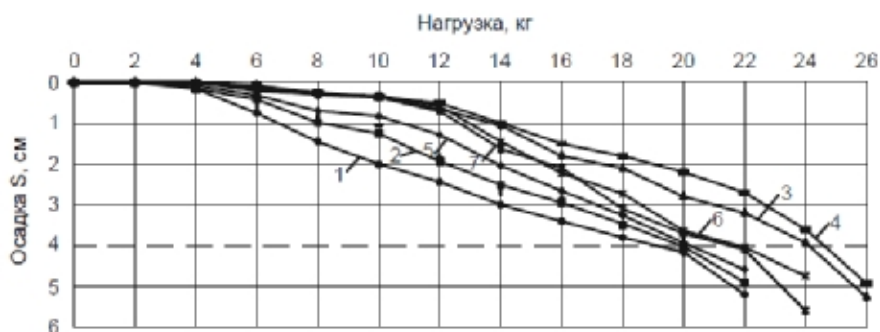


Рис. 6. График зависимости осадки сваи от прикладываемой нагрузки на сваю (1 – до укрепления грунта; 2, 3, 4 – укрепление в зоне боковой поверхности; 5, 6, 7 – укрепление под нижним концом, при объеме нагнетаемого раствора на иньектор соответственно 0,5, 1,0 и 1,5 л)

В ходе экспериментов установлено увеличение угла внутреннего трения грунта в уплотненной при инъекции раствора зоне массива с  $25^{\circ}$  до  $31^{\circ}$ , наибольшее значение этого показателя было зафиксировано между иньектором и свай.

Полученные в ходе исследований результаты приводятся в табл. 2.

Таблица 2

**Технологические параметры цементации и результаты экспериментов**

№ эксп.	Кол-во свай	Кол-во инъект.	Объем раствора на инъектор, л.	Зона инъекции	Несущ. способн. модели свай, кгс			Плотн. грунта у свай, г/см <sup>3</sup>
					общ.	бок.	низ	
1	1	-	-	-	19,1	6,6	12,5	1,48
2	4	-	-	-	22,0			1,48
3	1	2	0,5	боков. пов.	19,9	7,4		1,53
4	1	2	0,75	боков. пов.	21,4	8,9		1,561
5	1	2	1,0	боков. пов.	24,1	11,6		1,575
6	1	2	1,5	боков. пов.	24,6	12,1		1,605
7	1	2	0,5	низ	20,2		13,6	1,52
8	1	2	0,75	низ	20,9		14,3	1,546
9	1	2	1,0	низ	21,5		14,9	1,577
10	1	2	1,5	низ	21,8		15,2	1,59
11	4	1	1,0	боков. пов.	23,8			1,586
12	4	1	1,0	низ	25,1			1,564
13	4	4	1,0	боков. пов.	24,2			1,610
12	4	4	1,0	низ	27,0			1,607

На основании анализа результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для определения несущей способности свай после укрепления грунта напорной цементацией следует применять формулу СП 24.13330.2011 с добавлением поправочных коэффициентов к табличным значениям расчетных сопротивлений  $R$  и  $f_i$ :

$$F_d = g_c \zeta_{cR} \zeta_{cR} \times R \times A + u \sum_{i=0}^n g_{cR} \zeta_{f_i} \times f_i \times h_i$$

где коэффициенты  $\zeta_R$  и  $\zeta_{f_i}$  учитывают степень уплотнения грунта при инъекции цементного раствора. Эти коэффициенты зависят от объема инъектируемого раствора, первоначальной плотности грунта и схемы установки инъекторов относительно свай. Согласно полученным экспериментальным данным, в случае песчаных грунтов коэффициент  $\zeta_R$  меняется в пределах 1,05...1,2, коэффициент  $\zeta_{f_i}$  – в пределах 1,1...1,6. Также необходимо отметить, что при усилении свайного фундамента цементацией образуются грунтоцементные элементы, по форме напоминающие буроинъекционную сваю. Поэтому при расчете общей несущей способности свайного куста после усиления фундамента напорной цементацией можно учитывать несущую способность и этих элементов, определяемых в соответствии с [4].

### Заключение

На основании выполненных экспериментов определены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта вокруг буронабивной сваи в зависимости от объема инъектируемого раствора. Напорная цементация грунтов, окружающих сваю, приводит к обжатию свай и увеличению трения по боковой поверхности свай, в меньшей степени увеличению лобового сопротивления свай – при упрочнении грунта под нижним концом свай. В принятых грунтовых условиях увеличение плотности грунта около одиночной сваи после инъекции раствора составило до 8,8 %, увеличение несущей способности свай по боковой поверхности до 80 %, под нижним концом до 20 %. В случае укрепления грунта в межсвайном пространстве свайного куста, повышение несущей способности каждой отдельно взятой сваи куста получается больше, чем у одиночной сваи, при одинаковых технологических параметрах нагнетания укрепляющего раствора. Исходя из этого можно предположить, что наибольший эффект от напорной цементации достигается при укреплении грунтов под свайными фундаментами при кустовом расположении свай и под плитно-свайными фундаментами.

**Список библиографических ссылок**

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : АСВ, 2014. 728 с.
2. Коновалов П. А., Коновалов В. П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М. : АСВ, 2011. 384 с.
3. Шакиров И. Ф., Тюркин С. И. Исследование несущей способности висячих свай в массиве грунта, укрепленного напорной цементацией // Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов. XIV Международный симпозиум по реологии грунтов / КГАСУ. Казань, 2014. С. 75–80.
4. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование несущей способности и деформаций песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34). С. 200–205.
5. Способ повышения несущей способности свайного фундамента : пат. 2379419 Рос. Федерация. № 2007144147/03 ; заявл. 27.11.2007 ; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2. 5 с.
6. Голованов А. М., Пашков В. И., Рево Г. А., Пашков Д. В., Нерчинский О. В., Туренко Р. И. Опыт закрепления структурно-неустойчивых грунтов цементацией. // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 59–67.
7. Готман Н. З., Готман А. Л. Определение модуля деформации закрепленного цементацией грунта. // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 138–144.
8. Mirsayarov I. T., Shakirov M. I. Behavior models of plate-pile foundations under cyclic loading : Proceedings of the baltic piling days conference : Baltic Piling Days, Estonian Geotechnical Society ISSMGE / Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayarov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading // Energy Geotechnics. Proceedings of the 1st international conference on energy geotechnics : Germany, ICEGT / Kiel, 2016. P. 423–428.
10. Mirsayarov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.

**Shakirov I.F.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [fsrshakirov@mail.ru](mailto:fsrshakirov@mail.ru)

**Shaikhutdinov I.I.** – student

E-mail: [islamshaikhutdinov@mail.ru](mailto:islamshaikhutdinov@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Researches of the bored pile bearing capacity in a soil massive,  
reinforced by cement mortar pressure injection****Abstract**

*Problem statement.* The researches aim is to determine the changes in the pile foundation bearing capacity during strengthening the soil around the pile by pressure cementation, depending from the cement mortar injection parameters.

*Results.* The main results of the performed studies consist in determining the stress changing patterns in the pile surrounding soil, depending on the strengthening mortar volume and pumping technology, obtaining the data about the effect to the soil reinforcement on the bored pile bearing capacity. The injection of cement mortar into the pile surrounding soil creates a stress zone in the massive, the soil around the pile is compacting, and as a result occurs the compression of the pile and a significant increase of friction along the pile lateral surface. Hardening of the ground by cementation under the pile lower end, leads to an increase in the pile frontal surface, but to a lesser degree than an increase in resistance along the lateral surface.

*Conclusion.* Significance of the obtained results consists in determining the soil strengthening influence degree on increasing the piles bearing capacity, research results can be

used in the projects developing process for reinforcing foundations at the reconstruction of buildings with a significant load increase on the existing pile foundation.

**Keywords:** ground base, soil massive, hardening, cementation, pile foundation, bored pile, bearing capacity.

### References

1. Ilyichev V. A., Mangushev R. A. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. M. : ASV, 2014. 728 p.
2. Konovalov P. A., Konovalov V. P. Soil bases and foundations of buildings under reconstruction. M. : ASV, 2011. 384 p.
3. Shakirov I. F., Tyurkin S. I. Researches of bearing capacity of hanging piles in the array of soil, reinforced by pressure cementation // Perspective directions of development in theory and practice of rheology and soil mechanics. XIV International Symposium on the rheology of soils / KGASU. Kazan, 2014. P. 75–80.
4. Shakirov I. F., Garifullin D. R. The research of bearing capacity and deformation of sandy ground, reinforced by pressure cementation // Izvestiya KGASU. 2015. № 4 (34). P. 200–205.
5. Method for increasing the bearing capacity of the pile foundation : pat. 2379419 Russian Federation. № 2007144147/03 ; decl. 27.11.2007 ; publ. 01.20.2010. Bul. in № 2. 5 p.
6. Golovanov A. M., Pashkov V. I., Revo G. A., Pashkov D. V., Nerchinsky O. V., Turenko R. I. Fixing experience of the structurally unstable soils by cementation // Vestnik MGSU. 2013. № 8. P. 59–67.
7. Gotman N. Z., Gotman A. L. Determination of the deformation modulus strengthened by ground cementing // Izvestiya KGASU. 2017. № 1 (39). P. 138–144.
8. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Behavior models of plate-pile foundations under cyclic loading : Proceedings of the baltic piling days conference : Baltic Piling Days, Estonian Geotechnical Society ISSMGE / Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading // Energy Geotechnics. Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on energy geotechnics : Germany, ICEGT / Kiel, 2016. P. 423–428.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.