

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ, ИМЕЮЩЕЙ КОНТРОЛИРУЕМОЕ УШИРЕНИЕ, С ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

Чикишев В.М.¹, Самохвалов М.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия (625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2) e-mail: 89199431379@yandex.ru

На сегодняшний день во многих городах и регионах Российской Федерации существует большое количество зданий и сооружений, которые являются памятниками истории, архитектуры, и культуры своего времени. Большая часть из них нуждается в реконструкции и модернизации в соответствии с современными требованиями, которые регламентируют освоение подземного пространства таких зданий с целью размещения в них объектов социальной, инженерной и транспортной инфраструктуры. Для решения данной проблемы в статье даётся описание нового способа устройства буроинъекционной сваи с контролируемым уширением для реконструкции зданий и сооружений с возможностью освоения их подземного пространства и результаты связанных с ним теоретических исследований. По результатам исследований предлагается новый подход к расчёту геометрических параметров образующейся буроинъекционной сваи с контролируемым уширением в пылевато-глинистых грунтах, определению радиуса уплотнённой зоны, изменения НДС и физико-механических характеристик грунтового массива возле неё. Также в статье представлены результаты численного моделирования в программе Plaxis процесса образования контролируемого уширения во время закачки инъекционного раствора и статического нагружения получившегося уширения в сравнении с экспериментальными данными.

Ключевые слова: буроинъекционная свая, контролируемое уширение, пакер, слабые глинистые грунты, статические испытания, реконструкция, подземный этаж.

THE RESULTS OF THEORETICAL RESEARCH OF DEVICES AND STATIC LOADING OF DRILL-INJECTED PILES CONTROLLED BROADENING IN THE SILTY-CLAY SOILS

Chikishev V.M.¹, Samohvalov M.A.¹

¹Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia (625001, Tyumen, street Lunacharskogo, 2) e-mail: 89199431379@yandex.ru

There are many buildings that are monuments of history, architecture, and culture in many cities and regions of the Russian Federation today. Most of them need of renovation and modernization in accordance with modern requirements, which regulate the development of underground space of buildings to contain the objects of social, engineering and transport infrastructure. To resolve this problem the article describes a new method of device of drill-injected piles controlled broadening for the reconstruction of buildings and structures with the possibility of development of their underground space and the results of related theoretical researches. According to the research, a new approach is offered to the calculation of the geometric parameters of the resulting drill-injected piles controlled broadening in silty-clay soils, determining the radius of the densified zone, strain state and changes in the physical and mechanical characteristics of the soil mass formed around the pile. The article also presents the results of numerical simulation in Plaxis of the formation process of controlled broadening during injection and static loading of the resulting broadening compared with experimental data.

Keywords: drill-injected pile, controlled broadening, packer, silty-clay soils, static tests, reconstruction, underground floor.

В соответствии с федеральной целевой программой правительства Российской Федерации «Сохранение и развитие архитектуры исторических городов» для решения проблемы освоения подземного пространства реконструируемых зданий и сооружений проведя сравнительный анализ существующих инженерных решений [1-4] авторами был разработан

и впоследствии запатентован [5] новый способ устройства буринъекционной сваи с контролируемым уширением (рис.1).

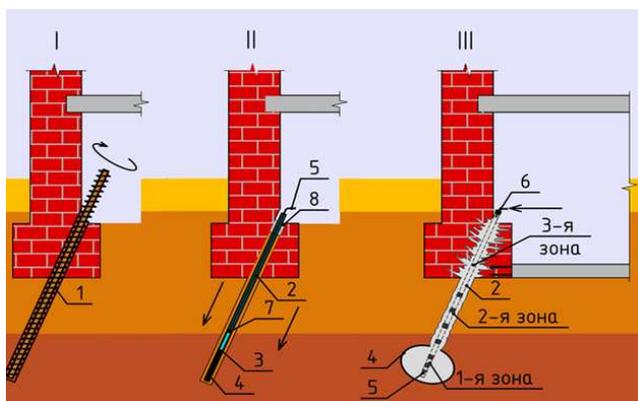


Рис. 1 Схема устройства буринъекционной сваи с контролируемым уширением

- 1 – скважина;
- 2 – труба-инъектор;
- 3 – хомут крепления;
- 4 – резиновая мембрана-стакан;
- 5 – резиновые манжеты;
- 6 – шланг подачи раствора;
- 7 – пакер;
- 8 – бетонная пробка;

I - бурение скважины, II – монтаж арматурного каркаса в виде трубы-инъектора, подача пакера в первую зону инъекционных отверстий. III – процесс инъецирования раствора:

Для того чтобы правильно прогнозировать поведение буринъекционных свай с контролируемым уширением в различных грунтовых условиях были выполнены теоретические исследования.

Основные задачи теоретических исследований:

1. Изучение напряженно-деформированного состояния уплотнённой зоны грунтового массива возле образующегося уширения во время закачки инъекционного раствора;
2. Выявление основных закономерностей формирования пластической и упругой области возле буринъекционной сваи с контролируемым уширением;
3. Сравнение результатов теоретических исследований с результатами полевых исследований [6].

Полевые исследования [6] проходили на строительной площадке, расположенной на пересечении улиц Щербакова и Дружбы г. Тюмени, инженерно-геологические условия которой показаны в табл.1.

Таблица 1

№ ИГЭ	Вид грунта	Глубина $H, м$	Показатель текучести, I_L	$\gamma_I, кН/м^3$	$\varphi_{II}, град$	$c_{II}, кПа$	$E, МПа$
1	Насыпной грунт	0-2,0	-	18,5	-	-	-
2	Супесь пластичная	2,0-4,0	0,40	19,8	19,0	8,0	11,0
3	Суглинок мягкопластичный	4,0-9,0	0,75	18,6	15,0	11,0	7,0

Голубев К.В. [1] рассматривает осесимметричную задачу расширения кругового отверстия диаметром, равным диаметру сваи (уширения), и, исходя из условия равенства компонент напряжения на границе упругой и пластической областей, определяют радиус уплотненной зоны грунта при погружении сваи по формуле:

$$R = \frac{d}{2} \left[\frac{(p + c \times \operatorname{ctg} \varphi)(1 + \xi)}{2(p_0 + c \times \operatorname{ctg} \varphi)} \right]^{\frac{1}{1-\xi}} \quad (1)$$

где d – диаметр нижнего конца сваи (уширения); p – радиальное давление на контуре (давление обжатия); p_0 – природное горизонтальное давление грунта на рассматриваемой глубине; ξ – коэффициент бокового давления грунта.

При этом рассматриваются две области вокруг сваи: упругая и пластическая.

Лалетин И.В. [7] считает, что часть вытесняемых сваей частиц грунта расходуется на изменение его структуры в пределах уплотнённой зоны, а другая часть возмещает объёмные изменения, возникающие вследствие упругих деформаций грунта за пределами уплотнённой зоны. При этом уплотнение грунта происходит за счёт уменьшения объёма пор, в то время как объём частиц грунта остаётся постоянным. Выражение для определения радиуса уплотнения имеет вид:

$$R = r \left(1 + \sqrt{\left(k_0^2 \frac{C}{\sigma_{R_0}} \right)} \right) \quad (2)$$

где r – радиус сваи; k_0 – коэффициент, показывающий долю вытесняемых сваей частиц грунта, расходуемых непосредственно на образование уплотнённой зоны; C – модуль остаточной деформации грунта; σ_{R_0} – радиальное напряжение на границе уплотнения.

Необходимо отметить, что использование данной формулы в практических расчётах затруднено ввиду сложности определения коэффициента k_0 .

Есипов А.В. [8] и Петухов А.А. [4] для определения радиуса уплотнённой зоны грунтового массива предлагают использовать экспериментально-теоретический способ, основывающийся на реальных данных изменения характеристик грунта (в частности изменения плотности) возле уширения на основании сетки отбора монолитов грунта с использованием эмпирической зависимости:

$$\rho_d(x) = \rho_d^0 + (\rho_d^{\max} - \rho_d^0) \cdot \left(1 + \frac{x}{r} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

где $\rho_d(x)$ – плотность сухого грунта на расстоянии (x); ρ_d^0 – природная плотность сухого грунта; ρ_d^{\max} – максимальное значение плотности сухого грунта; x – расстояние до рассматриваемой точки; r – радиус уширения на конце сваи; α – коэффициент аппроксимации.

Значение максимальной плотности сухого грунта для слабых глинистых грунтов авторы предлагают принимать равным $1,55 - 1,6 \text{ г/см}^3$, значение параметра $\alpha = 1,275$. В данном способе не учитывается изменение напряжённого состояния массива грунта возле образующегося уширения при закачке раствора под давлением.

Богомолов В.А. [9] описывает напряженно-деформированное состояние уплотнённой зоны грунтового массива исходя из уравнения равновесия для случая расширения сферической полости:

$$2(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{rd\sigma_r}{dr} = 0$$

где σ_r, σ_θ - радиальные и тангенциальные напряжения;

Решение задачи базируется на использовании модели упрочняющейся физически анизотропной (разномодульной) грунтовой среды (УРС). Данная модель основана на представлении о существовании упругих (e), допредельных пластических (p) и предельных пластических (f) деформаций по каждому из трех главных направлений. Важнейшей характеристикой среды является начальное напряжение (например, от собственного веса грунта) или любое большее напряжение, когда-либо действовавшее в каждом из трех направлений. Физические соотношения выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\nu\sigma_r}{E} + \frac{\lambda\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu\sigma_r}{E} - \frac{\nu\lambda\sigma_\theta}{E} + \frac{\lambda\sigma_z}{E} \end{aligned} \right\}$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ - деформации, $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ - напряжения соответственно в радиальном, тангенциальном и вертикальном направлениях; ν - коэффициент Пуассона; E - модуль деформации при сжатии; $\lambda = E/E_p$ - коэффициент разномодульности (E_p - модуль деформации при растяжении).

Напряжения в пластической области определяются на основе условия прочности Кулона-Хворслева, модифицированного для упрочняющейся грунтовой среды:

$$\tau_n = c_i + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_0 \Rightarrow |\sigma_r - \sigma_\theta| - \sin \varphi_0 (\sigma_r + \sigma_\theta) - 2c_i \cos \varphi_0 = 0$$

где $c_i = c + t\sigma^*$ - переменное сцепление, $\sigma^* = [\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z]/3$;

$t = \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_0 \geq 0$ - среднее напряжение в грунте (параметр упрочнения).

Принципиальное отличие этого условия от традиционного условия прочности Кулона $\tau = \sigma tg \varphi + c$ состоит в том, что состояние сдвига анализируется с переменным сцеплением c_i и постоянным углом внутреннего трения.

Критическое давление $p_{кр}$, соответствующее началу образования пластических деформаций (напряжения в упругой области достигают предельных значений) на поверхности сферической полости определяется по следующей формуле:

$$p_{кр.} = 12 \left(\sigma_0 \sin \varphi_0 + c \cos \varphi_0 + \frac{\sigma_0 t \cos \varphi_0}{3[1 - \omega - \sin \varphi_0 (3 + \omega)]} - 4t \cos \varphi_0 (2 + \omega) \right)$$

Деформации при $p > p_{кр}$ определяются как продолжение упругих и пластических деформаций протекающих по закону пластического течения:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_r &= d\varepsilon_r^e + d\varepsilon_r^p \\ d\varepsilon_\theta &= d\varepsilon_\theta^e + d\varepsilon_\theta^p \end{aligned} \right\}$$

Радиус уплотнённой зоны массива грунта, которая развивается при $p > p_{кр}$, описывается следующим выражением:

$$R = \left[\frac{p + s}{p_{кр.} + s} \right]^\alpha \quad (4), \text{ где} \quad \alpha = \frac{12(\sin \varphi_0 + t \cos \varphi_0)}{3 + 3 \cos \varphi_0 + 4t \cos \varphi_0}; \quad s = \sin \varphi_0 / [\sin \varphi_0 + t \cos \varphi_0];$$

Сравнение результатов теоретических и полевых исследований радиуса уплотнённой зоны грунтового массива представлено в таблице 2.

Таблица 2

Методы определения	Среднее значение R, м	Гистограмма сравнения
1. Полевые исследования [6]	0,64	
2. Голубев К.В. [1]	0,78	
3. Лалетин И.В. [7]	0,84	
4. Есипов А.В., Петухов А.А. [4,8]	0,72	
5. Богомолов В. А. [9]	0,66	

Таким образом, предложенная Богомоловым В.А. модель УРС на наш взгляд является наиболее подходящей для описания закономерностей образования контролируемого уширения на конце буринъекционной сваи в слабых пылевато-глинистых грунтах, так как

имеет две принципиальные особенности: разномодульность и упрочнение, которые зависят как от свойств грунта, так и от конкретного НДС.

Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе PLAXIS_8.2 с использованием осесимметричной упругопластической модели грунтового основания с критерием прочности Мора-Кулона в первом случае при помощи расширения кластера (рис. 2), во втором случае при помощи равномерно распределенной нагрузки, расширяющей оболочку изнутри (рис. 3).

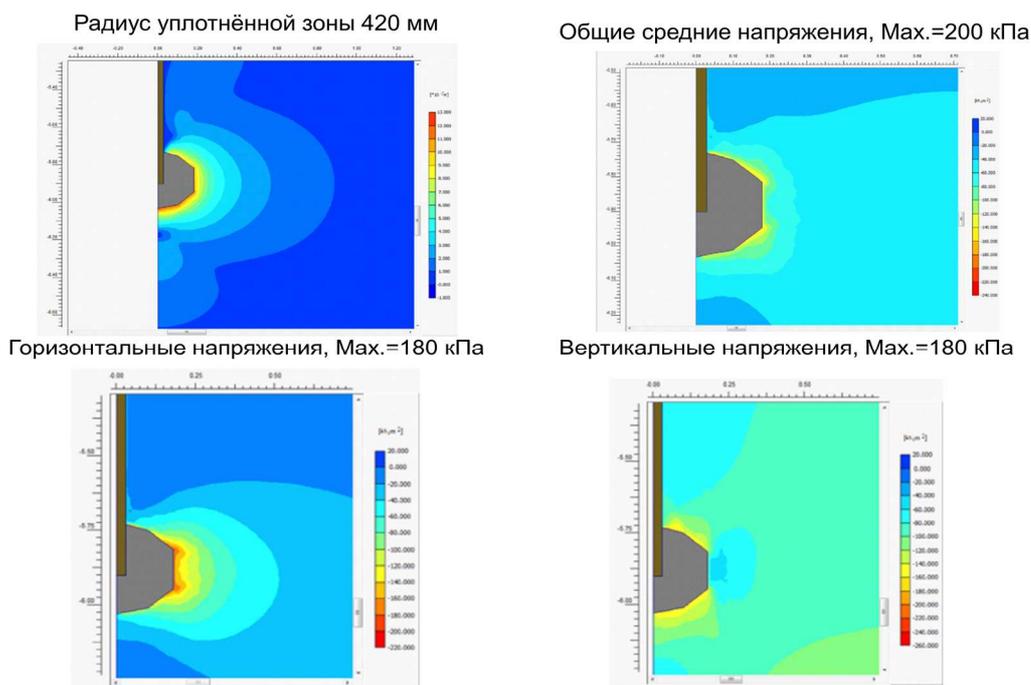


Рис. 2. Моделирование образования уширения с помощью расширения кластера на 3%

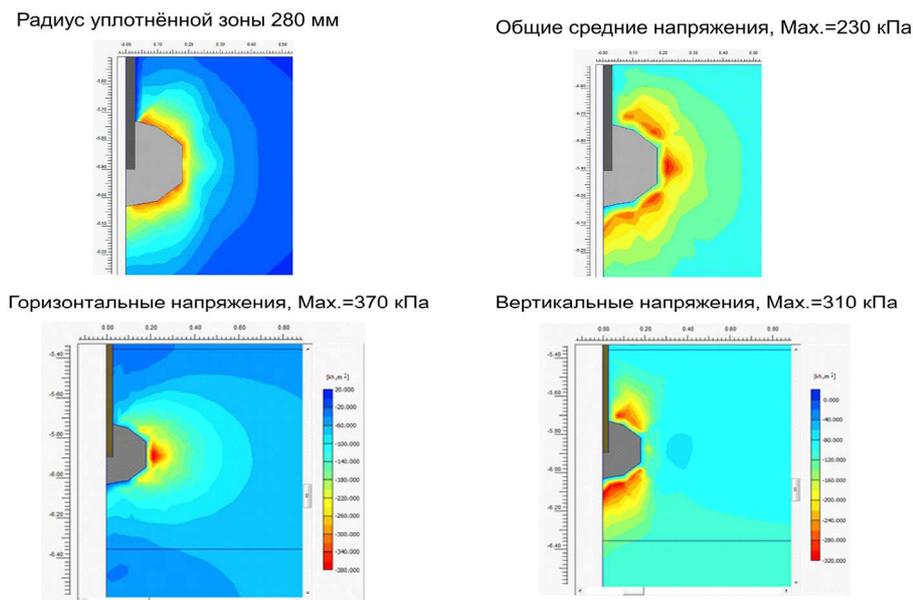


Рис. 3. Моделирование образования уширения с помощью давления $P=1.2$ МПа

Оба способа имеют свое прикладное технологическое значение: первый случай подходит для определения радиуса уплотнённой зоны грунтового массива, второй - для определения минимально требуемого давления закачки раствора.

Что касается результатов моделирования статического нагружения уширения, то сходимость с PLAXIS_8.2 составляет 10% (рис.13), что позволяет использовать полученные данные при проектировании.

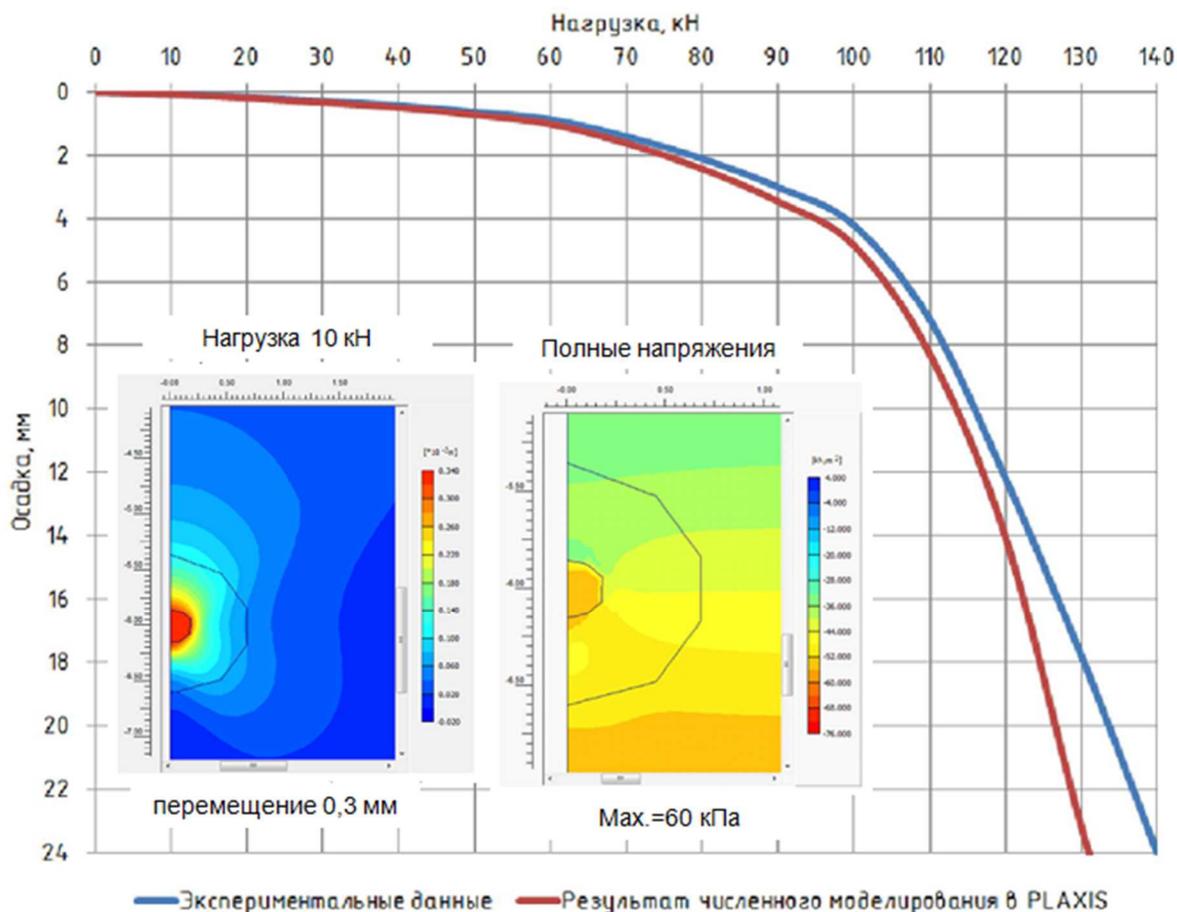


Рис. 4. Моделирование статического нагружения уширения, сходимость 10%

Список литературы

1. Голубев К.В. Усиление оснований фундаментов нагнетаемыми несущими элементами: дис... канд. техн. наук. – Пермь, 2006. - 220с.
2. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъецировании: дисс. к-та техн. наук / В.А. Ермолаев // СПбГАСУ – Санкт-Петербург, 2013. - 166с.
3. Мангушев Р.А., Осокин А.И. Геотехника Санкт-Петербурга. Монография. – М.: Издательство АСВ. – 2010. – 264 с.

4. Петухов А.А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: дис... канд. техн. наук. – Томск 2006. - 192с.
5. Патент на изобретение RU №2522358 С1 от 19.12.2012 / Способ изготовления буроинъекционной сваи с контролируемым уширением / Я.А. Пронозин, Ю.В. Зазуля, М.А. Самохвалов.
6. Результаты лабораторных и полевых исследований изготовления буроинъекционной сваи с контролируемым уширением / Я. А. Пронозин, М.А. Самохвалов, Д.В. Рачков // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №3 С.63-68
7. Лалетин Н. В. Расчет свайных оснований на действие осевой вертикальной нагрузки. Вестник ВИА, №78, 1954. - с.37-65
8. Есипов А. В. Взаимодействие микросвай с грунтовым основанием при усилении фундаментов: дис... канд. техн. наук. – Тюмень. 2002. - 168с.
9. Богомолов В.А. Предложения по расчету геотехногенных систем, выполненных методами высоконапорной инъекции // Труды Междунар. научно-практической конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. В 2т. – Пермь: изд-во Перм.гос.техн. университета,2004. – Т.1.- С. 25-31.

Рецензенты:

Чекардовский М.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», г. Тюмень;

Миронов В.В., д.т.н., профессор кафедры «Водоснабжения и водоотведения» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», г. Тюмень.