

*С.В. Игнатов, магистр техн. наук
Белорусский национальный технический университет*

ВЛИЯНИЕ ИНЪЕКЦИОННОЙ ОПРЕССОВКИ ГРУНТА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ ПО ГРУНТУ

Приведены результаты опытных исследований по определению изменчивости свойств грунта вокруг буроинъекционных свай, результаты полевых испытаний свай статической нагрузкой и сравнение полученных данных с расчетами несущей способности по действующим нормативным документам и численного моделирования с учетом и без учета изменчивости свойств грунтов, опрессованных инъекцией.

Ключевые слова: грунт, инъекция, осадка, основание, плотность, раствор, свая.

*С.В. Ігнатов, магістр техн. наук
Білоруський національний технічний університет*

ВПЛИВ ІН'ЄКЦІЙНОГО ОПРЕСУВАННЯ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ПАЛЬ ПО ГРУНТУ

Наведено результати експериментальних досліджень з визначення мінливості властивостей ґрунту навколо буроін'єкційних палей, результати польових випробувань палей статичним навантаженням і порівняння отриманих даних з розрахунками несучої здатності за чинними нормативними документами та чисельного моделювання з урахуванням і без урахування мінливості властивостей ґрунтів, опресованих ін'єкцією.

Ключові слова: ґрунт, ін'єкція, осідання, основа, щільність, розчин, палля.

*S.V.Ihnatov, master of science
Belarusian national technical university*

INJECTION PRESSURE INFLUENCE ON GROUND PILES BEARING CAPACITY

The paper presents the results of experimental studies of the soil variability properties determination around the bore-injected piles, the results of the field static load pile test and comparison of these data with calculations by the current regulations and numerical simulations with and without consideration of the variability of soil properties, compressed by the injection.

Keywords: soil, injection, deposit, the base, the density of the solution, pile.

Введение. Сегодня строительная отрасль все чаще встречается с необходимостью возведения зданий и сооружений в стесненных и в сложных инженерно–геологических условиях.

Современные здания на территории СНГ передают на основание гораздо большие нагрузки по сравнению с объектами строительства, возводимым в середине – конце XX века. При проектировании зданий со значительными нагрузками на основание необходимо руководствоваться не только принципами надежности и экономичности, но также принимать во внимание технологию выполнения фундаментов. Применение буроинъекционных технологий отвечают вышеназванным требованиям: они усиливают грунты основания, опрессовывают грунт, повышают его деформационные и прочностные характеристики. Однако на сегодняшний

день отсутствует методика учета данного изменения, что приводит к неэкономичным проектным решениям, перерасходу строительных материалов и увеличению сроков строительства при обеспечении достаточно большого уровня надежности.

Обзор последних источников исследований и публикаций.

Главным отличием инъекционной технологии от набивной является опрессовка окружающего скважину грунта за счет избыточного давления в закачиваемом растворе. Вокруг скважины происходит перераспределение частиц грунта с уменьшением его пористости вплоть до минимальной (критической) в зависимости от режима инъекции [1, 2].

Многочисленные ученые (Г.М. Бич, Ю.Н. Васильев, Л. Гобст, К.В. Голубев, Г.О. Дегиль, А.Н. Драновский, В.Н. Жилинков, Ю.З. Заславский, А. Камбефор, И.М. Клейнер, В.П. Кустов, Ф.К. Лапшин, Р.А. Мангушев, Л.Г. Мариупольский, Й. Мечи, В.А. Мишаков, А.А. Мустафьев, М.И. Никитенко, А.А. Петухов, В.Ф. Раюк, Б.А. Ржаницин, К.В. Руппенейт, Д.Г. Самарин, М.И. Смородинов, В.С. Христофоров и др.) проводили исследования по изучению несущей способности буроинъекционных анкеров и свай, т. е. большая часть исследований была нацелена на определение сопротивления грунта сдвигу вдоль буроинъекционного тела и лобового сопротивления перед ним.

Изучению же изменчивости свойств грунта вокруг заполняемых цементным раствором скважин и полостей под давлением и без него до сих пор было посвящено небольшое количество работ. Это сопряжено со сложностью откапывания устроенных анкеров и свай в различных грунтах или же высокой стоимостью выполнения опытных работ в натуральных условиях, а также, методологической сложностью моделирования в лабораторных условиях физических процессов, протекающих при инъекции цементного раствора в грунт [2].

Обобщение имеющихся результатов исследований изменчивости свойств грунтов за счет их инъекционной опрессовки представляет сложность по ряду причин [2]:

- опыты носят разрозненный характер при малой повторяемости;
- физико-механические характеристики грунтов приведены в неполной мере или не приведены вообще;
- отсутствует информация о конструкции анкеров и свай;
- нет описания методики проведения опытов.

Однако все авторы отмечают, что инъекционная опрессовка окружающего скважину грунта закачиваемым раствором приводит к увеличению несущей способности буроинъекционных анкеров, свай и упроченных цементацией оснований фундаментов, а также к снижению их деформативности. Но факт опрессовки не учитывается на стадии проектирования в связи с отсутствием достоверной методики. Выполняемые контрольные и приемочные испытания буроинъекционных анкеров и свай нацелены лишь на определение несущей способности их

оснований, но не позволяют определять изменчивость характеристик грунтов за счет применяемой технологии.

Постановка задачи. Существующие методы определения несущей способности буроинъекционных анкеров и свай (эмпирические, теоретические, численные и инженерные) чаще всего учитывают начальные природные инженерно–геологические условия площадки строительства, геометрические параметры и прочностные характеристики тела анкера и сваи.

Применение современного численного компьютерного моделирования поведения анкеров и свай при их создании позволяет использовать нелинейные зависимости между напряжениями и деформациями на различных этапах загрузки. Применение метода конечных элементов, как одного из самых распространенных, и реализованного в различных программных комплексах, позволяет создать математическую модель грунта в рамках теории пластического течения, пластического течения с упрочнением, реологического поведения рассчитываемых моделей. Однако применение численного моделирования требует большого объема начальных исходных данных, для определения которых необходимо выполнение большого количества разнородных исследований с применением уникального оборудования, что повышает трудоемкость и продолжительность подготовительного этапа. Необходимо отметить, что существующие численные методы не учитывают развитие и распространение фильтрационных потоков, возникающих при инъекции и твердении бетона или раствора, а также временное снижение прочностных и деформационных характеристик грунтов при их замочении.

Наиболее доступным методом определения несущей способности свай и анкеров является инженерный метод. По результатам различных опытных исследований были выведены функциональные зависимости, отражающие влияние того или иного фактора на несущую способность сваи или анкера. Эти зависимости введены в нормативные документы и являются обязательными для использования при проектировании. Применение таких зависимостей позволяет упростить определение несущей способности буроинъекционных анкеров и свай, обеспечив при этом достаточный уровень надежности [2, 3]. Такой подход с использованием расчетных зависимостей и соответствующих таблиц либо зависимостей со значениями лобового сопротивления и по боковой поверхности нашел свое отражение в советской практике проектирования (рекомендации НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, нормативные документы) и распространился на национальные нормы. Данный метод позволяет оценить несущую способность анкера и сваи в зависимости от грунтовых условий и геометрических параметров со среднестатистической точностью порядка 65% [3], что на сегодняшний день приводит к реализации неэкономичных или же не достаточно надежных проектных решений

Как видно, вопрос влияния инъекции на изменение прочностных, деформативных характеристик основания и на несущую способность свай

и анкеров на сегодняшний день является открытым. Решение данного вопроса возможно только в результате комплексного изучения свойств грунтов основания и несущей способности свай.

Основной материал и результаты. Площадка строительства городской товарной станции «Колядичи» приурочена к участку конечно-моренной возвышенности, осложненной покровом лессовидных отложений. В геологическом строении пятна застройки принимают участие:

- почвенно-растительный слой (sIV), мощностью слоя 0,1 м;
- техногенные отложения голоценового горизонта (tIV), представленные насыпным грунтом из супеси с примесью разнозернистого песка;
- лессовидные отложения поозерского горизонта (prIIIpz), представленные суглинком от текучепластичной до полутвердой консистенции и пластичной супесью;
- конечно-моренные отложения сожского горизонта (gtIIIsz), представленные разнородными песчаными и глинистыми отложениями.

В соответствии с проектом было выполнено всего 402 сваи диаметром 219 и 325 мм. Из них опытные сваи выполнялись по следующей технологии:

–буроинъекционные сваи, устраиваемые методом «вертикально-перемещающейся трубы» с опрессовкой грунта при устройстве свай, а также закачкой цементного раствора под пяту сваи через инъекционную трубку;

–буроинъекционные сваи, устраиваемые методом «вертикально-перемещающейся трубы» с опрессовкой грунта при устройстве свай, а также закачкой цементного раствора под пяту сваи и на глубине $3/7$ ее длины через раздельные инъекционные трубки.

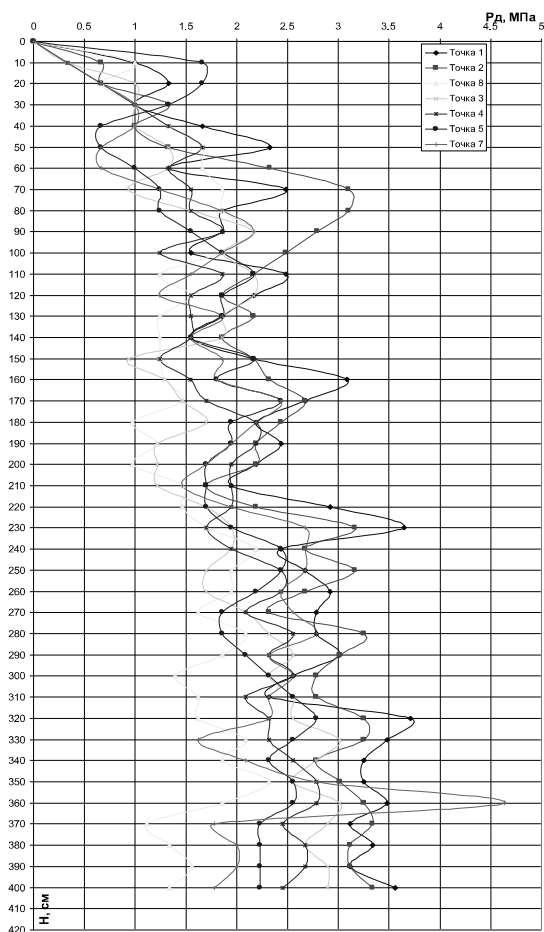
Объем закачиваемого раствора через каждую инъекционную трубку составлял 50 – 70 литров. Расчетное увеличение начального диаметра свай путем опрессовки составляло 10 –20% на длину до 0,5 метра.

При строительстве здания нами было выполнено опытное контрольное динамическое зондирование околосвайного грунтового массива, анализ результатов испытаний свай статическими нагрузками для определения закономерностей изменения характеристик грунтов, численное моделирование осадок свай с учетом и без учета изменчивости характеристик грунтов оснований за счет инъекционной опрессовки.

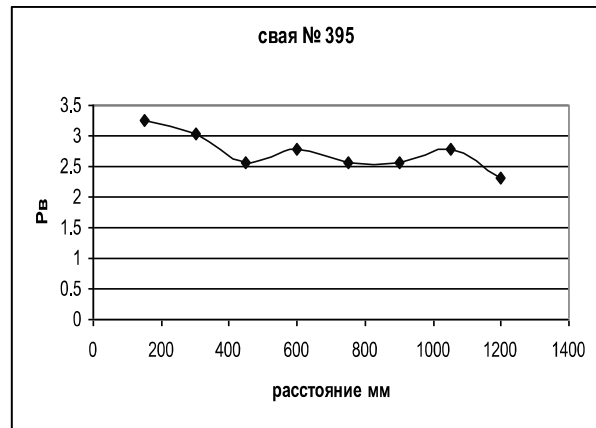
Зондирование выполнялось через 21 сутки после бетонирования свай в радиальных направлениях с шагом 150 мм до удаления 1,2 м от оси скважины (8 точек по периметру сваи). Сопrotивление грунта природного сложения динамическому зондированию принималось на расстоянии 1,2 м от оси опытной сваи. Заметим, что характер изменения условного динамического зондирования приведен не традиционно (ступенчатым), а плавным по аналогии со статическим (рис.1).

По представленным графикам видно, что удельное сопротивление грунта основания динамическому зондированию возрастает по мере приближения к телу сваи.

а)



б)



в)

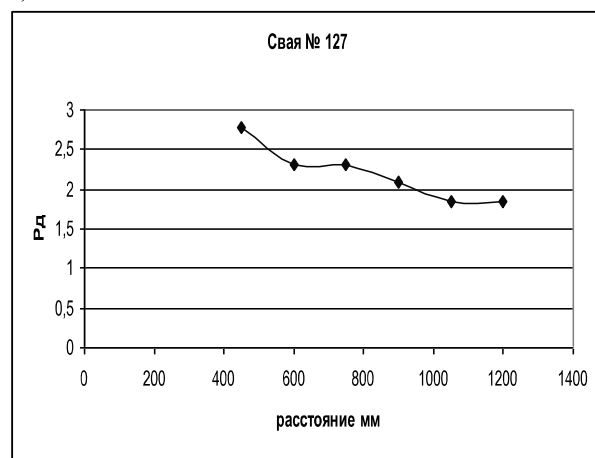


Рис. 1. Изменение условного динамического зондирования: по глубине вокруг: а – сваи № 396; в радиальном направлении на глубине 3,5 метра для: б – сваи № 396, диаметром 219мм; в – сваи № 127, диаметром 325мм

Особенно этот факт проявляется с увеличением глубины сваи. Потери опрессовки грунта в верхней части обусловлены некачественным свайным оборудовани­ем; технологической невозможностью поддержания постоянного давления в верхней части сваи, свойствами более рыхлого грунта, залегающего непосредственно у дневной поверхности и сообщающегося с ним по порам. Характер влияния опрессовки грунта начинает четко проявляться с глубин более 3,0 м от дневной поверхности. Участки разупрочнения грунта в процессе выполнения опытных работ не выявлены.

Как видим, радиус влияния инъекции от оси скважины составляет до трех ее диаметров.

Максимальное отношение условного сопротивления уплотненного инъекцией грунта динамическому зондированию к природному составляет 1,90. Значение сопротивления условному динамическому зондированию в непосредственной близости от сваи составляет 3,0 – 3,5 МПа, в природном состоянии – 1,7 – 2,0 МПа. Этим значениям соответствуют следующие характеристики грунта [4]:

– у тела сваи: $\varphi = 26 - 27^\circ$, $c = 24 - 25$ кПа, $E = 15 - 16$ МПа;

– в природном залегании: $\varphi = 24 - 25^\circ$, $c = 19 - 20$ кПа, $E = 11 - 12$ МПа.

Наличие дополнительной инъекционной трубки в теле сваи № 127 привело к его разрыву и созданию локального бетонного уширения вокруг ствола, что повышает площадь передачи сжимающих напряжений на грунт.

По результатам выполненных полевых испытаний статической нагрузкой построены графики зависимости «осадка – нагрузка» для опытных свай (рис.2).

Несущая способность свай, выполненных с опрессовкой цементным раствором грунта под пятой сваи, на 15 – 30% больше чем у свай без нее. Это достигается за счет создания пяты сваи большего размера и проникновению бетона в разрывные трещины в грунте вдоль ствола.

Можно отметить, что свая № 127 с выявленным бетонным уширением вдоль ствола имеет большую несущую способность по сравнению со сваями № 217 и 256, у которых инъекция выполнена только под пяту.

Натурные исследования и определения несущей способности буроинъекционных анкеров и свай, являются наилучшим и самым надежным способом для прогноза совместной работы оснований, конструкций нулевого цикла и надземной части здания. Однако эти исследования требуют значительных временных и материальных затрат.

Натурные исследования и определение несущей способности буроинъекционных анкеров и свай, являются наилучшим и самым надежным способом для прогноза совместной работы оснований, конструкций нулевого цикла и надземной части здания. Однако эти исследования требуют значительных временных и материальных затрат.

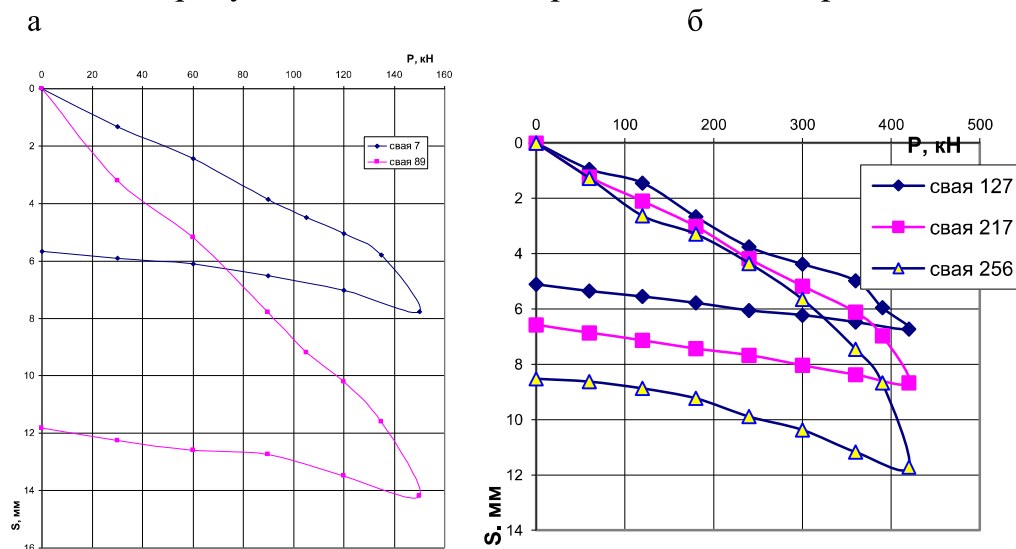


Рис. 2. Графики зависимости «осадка-нагрузка» для свай:
а - сваи $\varnothing 219$ мм; б – $\varnothing 325$ мм

Одним из методов прогноза несущей способности и деформативности в геотехнике стало численное моделирование. Одним из методов численного моделирования в геотехнике, получившем наиболее широкое

распространение, является метод конечных элементов (МКЭ). Методологическая основа и теория метода конечных элементов достаточно широко разработана и представлена в технической литературе.

На сегодняшний день при решении практических задач геотехники наиболее часто применяются следующие комплексы: Lira, SCADOffice, Geomehanika, Plaxis, которые имеют различные расчетные процессоры и решают как плоскую, так и объемную задачи.

На программном комплексе Plaxis 3D было выполнено компьютерное моделирование зависимостей осадок головы сваи от прикладываемых нагрузок для свай № 127, 217 и 256 с последующим сравнением результатов с опытными данными (рис. 3).

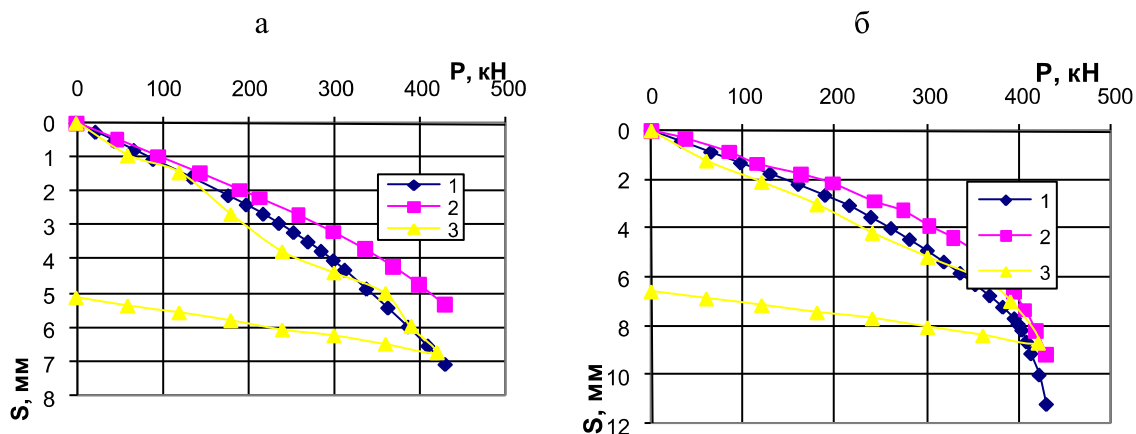


Рис.3. Результаты расчета свай и сравнение результатов с полученными опытными данными: а – № 127; б – № 217; 1 – без учета опрессовки; 2 – с учетом опрессовки; 3 – опытные значения)

Расчеты с применением программного комплекса проводились для каждой сваи по двум методикам:

- первая – как для буронабивной сваи диаметром 325 мм без учета изменения характеристик грунтов оснований во время выполнения сваи;
- вторая – как для сваи с увеличенным диаметром тела до величины 350 мм за счет опрессовки и с учетом измененных характеристик грунта, которые были определены во время опытного динамического зондирования в условиях строительной площадки.

Для контроля полученных значений на программном комплексе Lira 9.4 были определены конечные осадки свай в линейной стадии поведения грунтового массива при учете опрессовки грунта и без него. Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 1.

Выполненные расчеты показали, что программные комплексы позволяют определить порядок конечных осадок свай. Так, программа Plaxis 3D дает как завышенные, так и заниженные значения (разность осадок головы сваи не превышает 20%). Lira 9.4 при объемном моделировании наоборот дает заниженные значения осадок (разность с полученными значениями достигает 30%).

Таблица 1. Осадки свай, полученные различными методами, мм

№ сваи	Нагрузка на сваю, кН	Plaxis, 3D		Lira 9.4		Опытное значение
		без учета	с учетом	без учета	с учетом	
217	420	7,084	5,342	5,744	5,089	6,72
217	420	11,2	9,18	7,961	6,495	8,67
256	420	13,9	11,7	11,172	10,756	11,71

Выводы. Опрессовка грунтов с использованием буроинъекционной технологии позволяет увеличить несущую способность оснований за счет повышения плотности сложения грунтов и, как следствие, увеличение угла внутреннего трения и сцепления

В результате опытного полевого испытания свай статической вдавливающей нагрузкой и численного моделирования, определено, что опрессовка грунта при выполнении свай, а также дополнительная инъекция цементного раствора в объеме 40 – 60 л повышает несущую способность сваи на 15 – 25%.

Установка дополнительной инъекционной трубки в середине тела сваи с последующей инъекцией через нее цементного либо цементно-песчаного раствора позволяет создать уширение вдоль ствола. Это значительно повышает несущую способность сваи за счет создания дополнительных опор вдоль ее тела, работающих на сжатие.

Влияние опрессовки для свай начинает проявляться с глубин не менее трех метров. Это обусловлено наличием дополнительного вертикального пригруза на инъецируемый раствор. При меньших глубинах имеет место излив раствора через устье скважины, или выход раствора на поверхность. Также часто раствор прорывается и неконтролируемо двигается по контакту между материнской породой и вышележащими современными антропогенными четвертичными отложениями.

Литература

1. Камбефор, А. Инъекция грунтов: принципы и методы / А. Камбефор. – М.: Энергия, 1971. – 334 с.
2. Никитенко, М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений: монография / М.И. Никитенко. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с.
3. Негахдар, М.Р. Повышение несущей способности набивной сваи за счет предварительного изменения напряженного состояния оснований: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / М.Р. Негахдар. – Москва, 2009. – 154 с.
4. Прочностные и деформационные характеристики грунтов по данным динамического зондирования. Правила определения: ТКП 45–5.01–17–2006 (02250). – Введ. 03.03.2006. – Минск: Минстройархитектуры, 2006. – 20с.

Надійшла до редакції 04.11.2013

© С.В. Ігнатов