

УДК 624.154.5

**ВПЛИВ ОБПРЕСУВАННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НАВКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТУ І НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ПАЛЬ**

**ВЛИЯНИЕ ОПРЕССОВКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТА И НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ**

**THE EFFECT OF PRESSING ON THE GROUND CHARACTERISTICS  
AROUND THE PILE AND THE BEARING CAPACITY OF PILES**

**Игнатов С. В., магістр техн. н.** (Білоруський національний технічний університет, м. Мінськ)

**Игнатов С.В., магистр техн. н.** (Белорусский национальный технический университет, г. Минск)

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

У статті розкрито сучасне уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в ґрунті при його опресуванні. Наведено результати визначення опору зондування навколосвайного ґрунту, результати польових випробувань паль статичним навантаженням і порівняння отриманих даних з результатами чисельного моделювання.

В статье раскрыто современное представление о физических процессах, происходящих в ґрунте при его опрессовке. Приведены результаты определения сопротивления зондированию околосвайного ґрунта, результаты полевых испытаний свай статической нагрузкой и сравнение полученных данных с результатами численного моделирования.

The current understanding of the physical processes which take place in the soil while pressing is given in the article. The results of the soil testing, the results of field tests of static pile load, its comparison with the simulation results are given.

**Ключові слова:**

Ґрунт, паля, бетон, щільність, ін'єкція, розчин, тиск

Ґрунт, свая, бетон, плотность, инъекция, раствор, давление.

Ground, pile, concrete, density, injection, grout, pressure.

## **Введение**

Современная строительная техника, применяемая при возведении фундаментов, позволяет изменить физико-механические характеристики грунтов оснований с целью повышения их несущей способности. Современные буроинъекционные технологии усиливают грунты основания путем опрессовки околосвайного грунта с увеличением его деформационных и прочностных характеристик. Факт усиления за счет технологии производства работ не достаточно явно учитывается при проектировании свайных фундаментов, анкерных креплений и инъекционного упрочнения грунтов оснований, что приводит к неэкономичным проектным решениям, перерасходу строительных материалов, увеличению сроков строительства.

Изучение и определение закономерностей изменения характеристик грунта при его инъекционной опрессовке позволит повысить качество проектирования, снизит трудовые и материальные затраты на нулевой цикл.

## **Общие сведения о буроинъекционной технологии**

Буроинъекционная технология, известная как “*boring injection technology*” получила широкое применение при возведении свайных фундаментов в новом строительстве, проведении ремонтных и восстановительных работ при реконструкции, усилении и замене существующих фундаментов зданий и сооружений [1].

Главным отличием инъекционной технологии от набивной является изменение свойств грунта при формировании цементного (бетонного) тела за счет опрессовки, т.е. закачки раствора под давлением. Основным процессом, который происходит при нагнетании цементного раствора в скважины и полости в нескальных грунтах, обладающих мелкими порами и достаточно низким коэффициентом фильтрации является расширение скважин. При этом происходит изменение физико-механических свойств грунта окружающей полость, возрастает доля контактной сопротивляемости грунта сдвигу вдоль боковой поверхности, возрастает лобовое сопротивление для пят свай и анкеров.

В начальный период применения буроинъекционной технологии считалось, что при закачке цементного раствора происходит пропитка грунта вокруг скважины, в результате чего образуется новый материал «грунто-цемент». Исходя из этого предположения инъекционная цементация применялась как для заполнения крупных пустот в скальных массивах, так и для снижения фильтрации под плотинами [2].

Данное предположение о пропитке было опровергнуто Камбефором, который показал, что инъекционные растворы только спрессовывают грунт, а не пропитывают все поры. Было определено, что к различной опрессовке многослойного основания приводит структура грунтов вдоль буровой скважины, а также свойства закачиваемых растворов.

В дальнейшем многие авторы [1, 2, 3 и др.] определили, что в связных грунтах возникают разрывы, в которые происходит утечка инъекционного раствора. В не связном однородном грунте расширение скважины в радиальном направлении происходит достаточно равномерно вдоль ее тела. Однако, даже в песчаных грунтах не исключена возможность образования разрывов в случае большого объема закаченного раствора и большом давлении, и при очень плотном сложении основания.

Несмотря на все выше сказанное, на сегодняшний день имеется некоторая возможность проникновения частиц цемента в грунт с его пропиткой на расстояние до 10мм, что определяется размером трещин и пор и крупностью помола цемента. При правильном подборе цемента, его домоле, достаточно большой консистенции раствора, наличии специальных добавок происходит тампонирующее действие трещин в грунте размером более 0,1 мм [4]. Пропитка слоев грунта имеет место в чистых гравелистых грунтах с коэффициентом фильтрации более  $3,2 \cdot 10^{-4}$  м/с. При стандартных условиях, на границе инъекционного тела цемент соприкасается с поверхностью частиц, вступает с ним в химическую реакцию гидратации [5], благодаря чему вокруг тела образуется слой слабого бетона, который в свою очередь увеличивает поверхность зацепления затвердевшего раствора с грунтом. Данное утверждение подтверждено исследованиями Повколаса К.Э. [6]. Им было выявлено, что грунт вокруг корня буроинъекционного анкера имеет большую плотность, по сравнению с окружающим массивом и также возникает некоторый контактный слой «грунта-цемента».

Необходимо отметить, что инъекционный раствор является жидкостью. И для него характерно такое же поведение. Так при закачке цементных растворов в скважины в несвязных грунтах происходит формирование дополнительных линий тока, распространение которых зависит от гидрогеологических условий. Основные гидродинамические сетки при инъектировании в грунтах рассмотрены в [1, 2, 6]. Процесс отжатия воды и ее фильтрация наиболее интенсивна в период начала инъектирования раствора, когда еще на стенках скважины не образовалась цементная корка. Так как поры грунта соразмерны с частицами цемента, то в несвязных песчаных грунтах имеет место быстрая кольматация пор в контактной зоне и седиментация гранул цемента и образуется цементная корка. После образования цементной водонепроницаемой корки начинается передача давления инъекции на окружающий грунт с его уплотнением и уменьшением пористости вплоть до минимальной (критической) в зависимости от режима инъекции [2, 6].

### **Опытные полевые работы. Инженерно-геологические условия**

На объекте «Реконструкция грузового двора городской товарной станции «Колядичи» было выполнено опытное контрольное динамическое зондирование околовсвайного грунтового массива и анализ результатов

испытаний свай статическими нагрузками для определения закономерностей изменения характеристик грунтов.

Площадка строительства 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 разнородного 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 необходимо было выполнить 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 отдельные инъекционные трубки.

Объем закачиваемого раствора через каждую инъекционную трубку составлял 50-70 литров. Расчетное увеличение начального диаметра свай путем опрессовки составляло 10–20%.

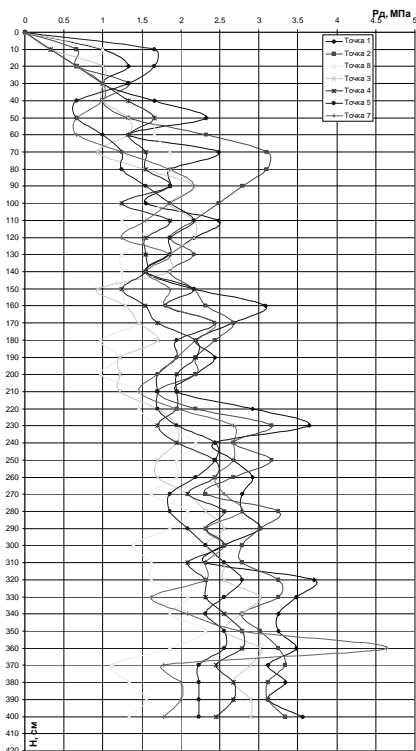
### **Результаты опытных полевых исследований**

Контрольное динамическое зондирование выполнялось через 21 день после бетонирования свай в радиальном направлении с шагом 150 мм от скважины на расстояние 1,2 метра от ее оси. Необходимо отметить, что представленные графики зондирования имеют не ступенчатый, как это принято, а плавный характер изменения условного динамического зондирования по аналогии со статическим. За сопротивление грунта природного залегания динамическому зондированию принималось сопротивление зондированию грунта на расстоянии 1,2 метра от оси опытной сваи (рис.1).

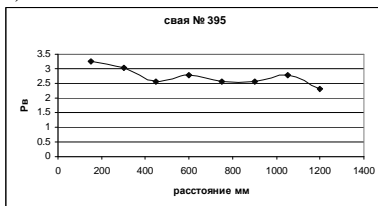
По представленным графикам (рис.1) видно, что удельное сопротивление грунта основания динамическому зондированию возрастает по мере приближения к телу сваи. Особенно этот факт проявляется с увеличением глубины сваи. Потери опрессовки грунта в верхней части обусловлены некачественным свайным оборудованием; технологической невозможностью поддержания постоянного давления в верхней части сваи, свойствами более

рыхлого грунта, залегающего непосредственно у дневной поверхности и сообщающимся с ним по порам. Характер влияния опрессовки грунта начинает четко проявляться с глубин более 3,0 метра от дневной поверхности. Участки разупрочнения грунта в процессе выполнения опытных работ не выявлены.

а)



б)



в)

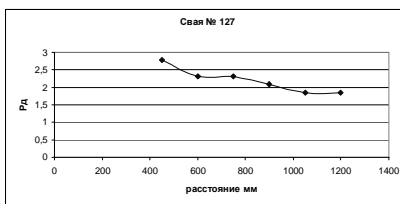


Рис. 1. Изменение условного динамического зондирования (а – по глубине вокруг сваи №396; в радиальном направлении на глубине 3,5 метра для б – сваи №396, диаметром 219мм; в – сваи №127, диаметром 325мм)

Согласно выполненным исследованиям определено, что радиус влияния инъекции составляет до 3 диаметров скважины. Максимальное отношение условного сопротивления уплотненного инъекцией грунта динамическому зондированию к природному составляет 1,65. При этом значение условного динамическому зондированию в непосредственной близости от сваи составляет 3,0 – 3,5 МПа, в природном состоянии – 1,7–2,0 МПа. Данным

значениям условного динамического зондирования соответствует следующие характеристики грунта [7]:

- 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 привело к разрыву тела сваи и образования в полукруговом секторе сваи № 127 бетонного уширения. Такие уширения существенно повышают несущую способность свай за счет дополнительного участка развития лобового сопротивления.

После динамического зондирования вокруг опытных свай производилось их испытание статической нагрузкой. По результатам выполненных полевых исследований построены графики зависимости «осадка-нагрузка» (рис.2).

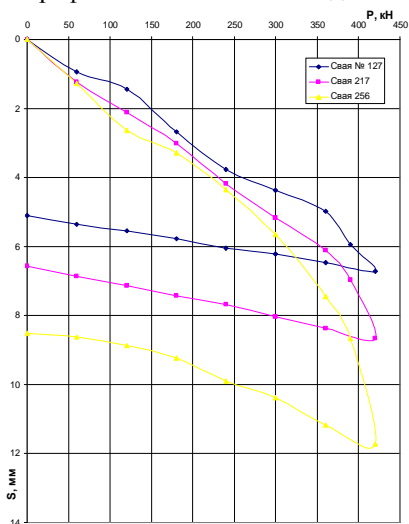


Рис. 2. Графики зависимости «осадка-нагрузка» для свай диаметром 325 мм.

Несущая способность свай, выполненных с опрессовкой грунта под пятой сваи цементным раствором на 15-30% превышает несущую способность свай, выполненных без опрессовки. Это достигается за счет дополнительного уплотнения забоя скважины, уплотнения стенок скважины, а также за счет возможных разрывов по контакту затвердевшего бетона и грунта, что обуславливает создание пяты сваи большего размера.

По выполненным опытным полевым испытаниям свай статической нагрузкой определено, что их реальная несущая способность больше, определяемой по существующим действующим нормативным документам в области фундаментостроения, которые учитывают только природные характеристики грунта в ненарушенном состоянии.

### Численное моделирование осадок опытных свай

Натурные исследования и определения несущей способности буроинъекционных анкеров и свай и деформаций оснований плитных фундаментов усиленных инъекцией, 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.

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 [Фадеев и др].

На сегодняшний день при решении практических задач геотехники наиболее часто применяются следующие комплексы: Lira, SCAd Office, Geomehanika, Plaxis, которые имеют различные расчетные процессора 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 следующих свай № 127, 217 и 256 с последующим сравнением с опытными данными (рис.3).

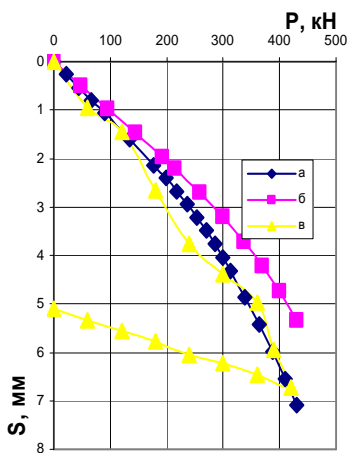


Рис. 3. Результаты расчета сваи № 127 и сравнение результатов с полученными опытными данными  
(а – без учета опрессовки, б – с учетом опрессовки, в – опытные значения)

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

- 1-ая – как для бурозаливной сваи, диаметром 325мм без учета изменения характеристик грунтов оснований во время выполнения сваи;

- 2-ая – 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.

В целях снижения трудоемкости ввода исходных данных, уменьшения продолжительности расчета, характеристики грунтов с учетом опрессовки грунта приняты как для слоя, расположенного на расстоянии 1,5–2,0 начального диаметра сваи.

По результатам выполненных расчетов определено, что программные комплексы позволяют с достаточно большой вероятностью определить конечные осадки свай. Так, программа Plaxis 3D дает как завышенные так и заниженные значения с разность осадок головы сваи не превышающей 20%.

## **Выводы**

Технико-экономическую эффективность применения буроинъекционной технологии зависит от конкретным грунтовыми условиями, и в большей мере от применяемой технологии. Приведенные результаты применения буроинъекционной технологии показывают эффективность ее использования при возведении конструкций нулевого цикла новых зданий и сооружений и ремонте уже существующих. В результате опытных полевых работ и численного моделирования осадок свай определено, что опрессовка грунта при выполнении свай, а также дополнительная инъекция цементного раствора в объеме 40-60 литров повышает несущую способность сваи на 15-25% и уменьшает осадку до 40%.

**1** Никитенко, М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений: монография / М.И. Никитенко. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с. **2.** Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01–83) / НИИОСП им. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1986. – 128 с. **3.** Камбефор, А. Инъекция грунтов. Принципы и методы / А. Камбефор. – М.: Энергия, 1971. – 334 с. **4.** Производство гидротехнических работ / А.И. Чураков [и др.]; под общ. ред. А.И. Чуракова. – Москва: Стройиздат, 1985. – 623 с. **5.** Ржаницин, Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве / Б.А. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с. **6.** Повколас, К.Э. Взаимодействие буроинъекционных анкеров с песчаными грунтами при статических и динамических воздействиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / К.Э. Повколас. – Минск, 2001. – 196 с. **7.** 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.