

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗЛИЧНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

Малинин А.Г., Гладков И.Л., Малинин Д.А.  
Строительная компания «ИнжПроектСтрой».

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований зависимости диаметра грунтоцементных колонн от технологических параметров струйной цементации в различных грунтах.*

*На основе анализа результатов трех полевых экспериментов в грунтах различной связности построены эмпирические зависимости значения диаметра грунтоцементных колонн от скорости подъема монитора и давления нагнетания цементного раствора.*

### **Введение**

Технология струйной цементации грунтов (Jet-grouting) получила широкое распространение при решении различных задач подземного строительства - устройстве противofiltrационных завес, ограждении бортов котлованов, укреплении неустойчивых пород при строительстве тоннелей и горных выработок, цементации грунтовых оснований, устройстве фундаментов зданий и сооружений.

С момента появления технологии в 70-х годах прошлого века различными авторами (Бройд И.И., Зеге О.С., Малышев Л.И., Никонов Г.П., Хасин М.Ф. и др.) были предприняты попытки построить идеальную теорию размыва грунта струей цементного раствора [1-4].

К сожалению, все построенные теоретические модели не носят законченного характера, так как содержащиеся в них эмпирические коэффициенты подлежат дополнительному определению в ходе полевых экспериментов по устройству грунтоцементных колонн в реальных грунтовых условиях.

Полный обзор теоретических исследований в этой области приводится в монографиях [5,6].

Настоящая работа содержит описание результатов полевых экспериментов по измерению диаметра грунтоцементных колонн, устроенных в грунтах различного типа – глинах, супесях и песках. Полученные результаты могут быть использованы для проверки адекватности существующих теоретических моделей, а также для проведения дальнейших теоретических исследований в этой области.

В качестве параметра, характеризующего размываемость грунта, авторами предлагается использовать один из известных прочностных параметров грунта – сцепление. Выбор данного параметра обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, он соответствует опытной практике - чем выше прочностные свойства грунта, тем меньше грунт размывается струей цементного раствора.

Во-вторых, сцепление грунта измеряется единообразно в соответствии с существующими стандартными методиками. Немаловажным обстоятельством является то, что величина сцепления всегда известна проектировщику из результатов предварительных инженерно-геологических изысканий на объекте.

Подход, основанный на численном описании типа грунта, позволяет построить эмпирические зависимости диаметра свай от технологических параметров струйной цементации и прочности грунта.

Актуальность подобной задачи очевидна. Знание величины диаметра позволяет на проектном этапе спрогнозировать диаметр грунтоцементных колонн (свай), их требуемое количество и, соответственно, точно определить объемы и стоимость работ.

Для определения фактического диаметра свай проектами, как правило, предусматривается откопка оголовков после отстоя свай в течение нескольких суток, необходимых для набора прочности грунтоцемента. Это значительно увеличивает время опытных работ и приводит к нерациональному использованию бурового и инъекционного оборудования. Для ускорения проведения опытных работ, а также для последующего операционного контроля диаметров свай на всех объектах применяли специально изготовленное измерительное устройство УИР-120 (устройство измерительное ручного действия для измерения диаметров до 120 см). Устройство состоит из двух стержней, шарнирно закрепленных друг с другом в средней части, так что расстояние между верхними концами равно расстоянию между нижними концами. Принцип действия устройства показан на рис.1.

Измерение диаметра производили следующим образом. Непосредственно сразу после окончания струйной цементации в тело грунтоцементной сваи, находящейся в жидком состоянии, опускали нижние конца стержней. Стержни разводили до соприкосновения их нижних концов со стенкой размытой скважины. Расстояние между верхними концами измеряли рулеткой.

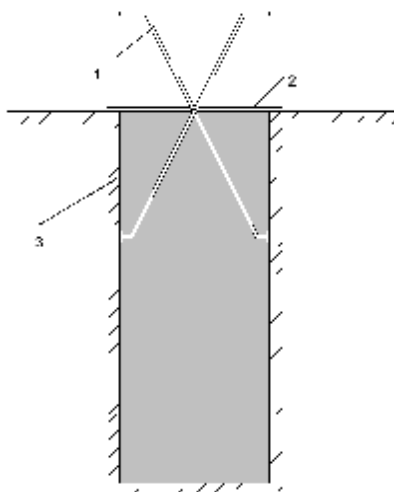


Рис. 1 Схема измерения диаметра колонны  
1 – стержни измерительного устройства; 2 - фиксатор;  
3 - стенка грунтобетонной колонны.

В ходе проведения полевых экспериментов варьировали два наиболее важных технологических параметра - скорость подъема монитора и уровень давления нагнетания цементного раствора. Отметим, что по этим параметрам можно рассчитать другие характеристики процесса устройства свай - время размыва грунта, расход цемента на единицу длины сваи, количество цемента на единицу объема закрепленного грунта и т.д. [6].

В зависимости от типа буровых машин подъем монитора осуществляется непрерывно или ступенчато по 2...4 см. К сожалению, на всех трех объектах применяли машины различных фирм-изготовителей, поэтому все значения скорости подъема монитора для их общей сопоставимости были приведены к единому варьируемому параметру – времени подъема монитора на высоту 1,0 м.

Отметим, что все экспериментальные результаты были получены при устройстве свай по однокомпонентной технологии струйной цементации в рамках опытных работ на реальных объектах, выполненных предприятием «ИнжПроектСтрой» в различные годы.

### **Серия полевых испытаний №1.**

Первая серия опытных работ была проведена на площадке строительства котлована подземного паркинга в г. Пушкино Московской области. В пределах площадки грунт был представлен однородным массивом, состоящим из обводненного мелкого песка средней

плотности. Величина сцепления практически несвязного песчаного грунта составляла  $C = \text{кПа}$ .

Конструкция временного ограждения котлована представляла «стену в грунте» из пересекающихся грунтоцементных свай диаметром 700 мм, расположенных с шагом 500 мм. В связи с высоким уровнем грунтовых вод грузонесущее ограждение из пересекающихся свай должно было также выполнять функцию противодиффузионной завесы.

Для проверки правильности проектного решения были выполнены опытные сваи в количестве 16 штук. В процессе опытных работ варьировали следующие основные параметры технологии - скорость подъема монитора и давление нагнетания цементного раствора.

В процессе производства опытных работ диаметр свай измеряли с помощью измерительного устройства УИР-120. Для проверки полученных результатов в последующем все колонны были откопаны. Расхождение между результатами измерений с помощью устройства УИР-120 и результатами непосредственного измерения диаметров откопанных свай составляло не более 5%. В дальнейшем данная методика измерений применялась для оперативного контроля диаметров рабочих свай в процессе устройства ограждения котлована.

Время подъема монитора на высоту 1,0 м, являющееся аналогом скорости подъема монитора и времени обработки грунта, изменяли в диапазоне от 56 до 176 секунд при давлении нагнетания цементного раствора 40 МПа. Зависимость диаметра свай от скорости подъема монитора приведена на рис. 2, график №1.

Во второй части опытных работ варьировали давление нагнетания цементного раствора в диапазоне от 10 до 50 МПа при постоянном времени подъема монитора на 1,0 м, составляющем 130 секунд.

Результаты измерений диаметра свай от уровня давления нагнетания показаны на рис.3, график №1.

Отметим, что во всей серии экспериментов применяли цементный раствор с водоцементным отношением  $В/Ц=0,8$ . Монитор был оснащен двумя форсунками диаметром 2,6 мм.

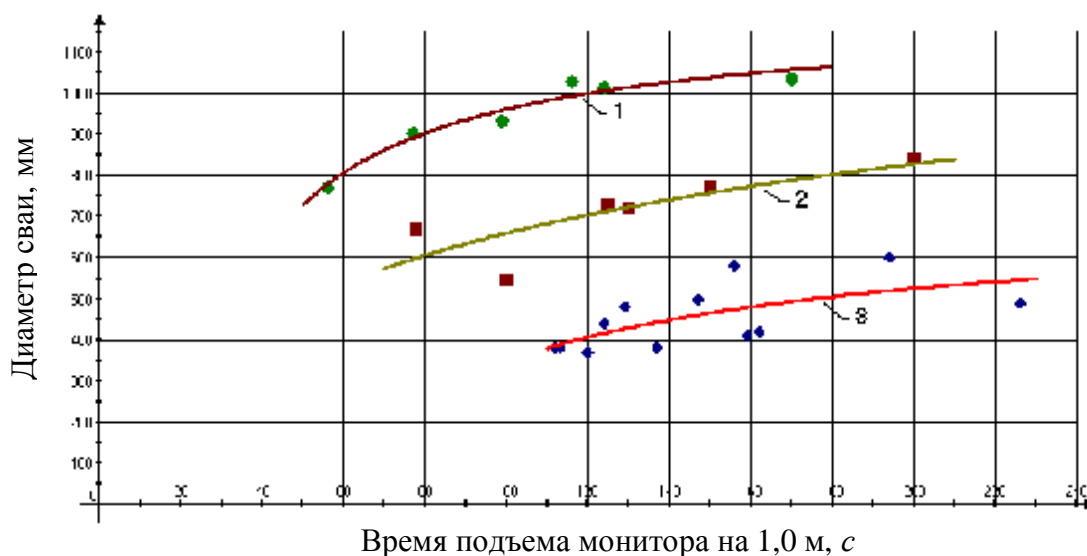


Рис. 2. Зависимости диаметра грунтоцементных свай от скорости подъема монитора (времени подъема монитора на высоту 1,0 м):  
1 -  $C = 1 \text{ кПа}$ ; 2 -  $C = 7 \text{ кПа}$ ; 3 -  $C = 47 \text{ кПа}$ .

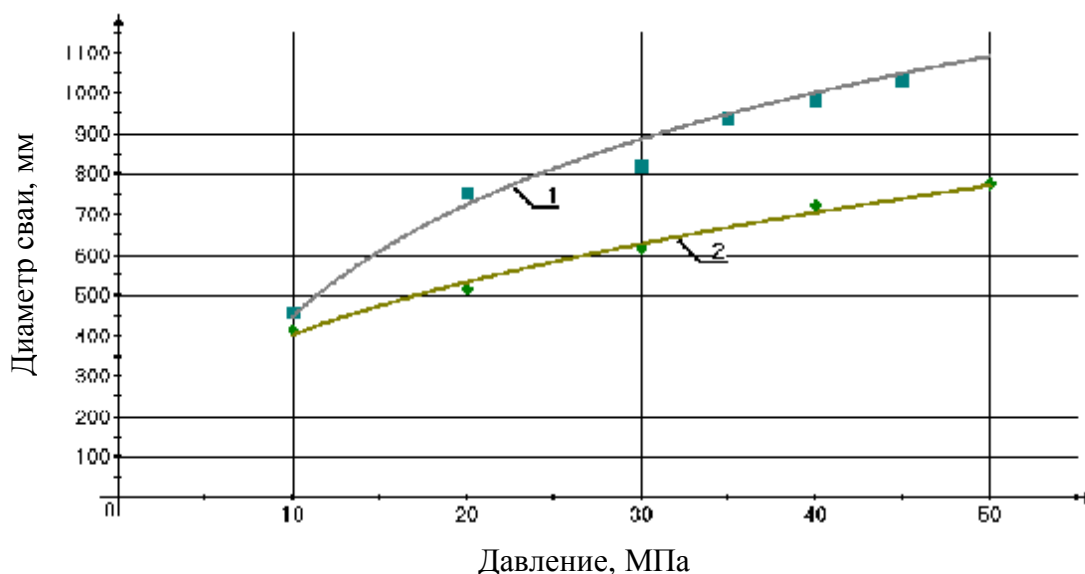


Рис. 3. Зависимость диаметра грунтоцементных свай от давления нагнетания цементного раствора:  
1 –  $C = 1$  кПа; 2 –  $C = 7$  кПа.

#### Серия полевых испытаний №2.

В г. Перми ведется строительство административно-торгового здания с многоуровневой подземной автостоянкой.

Проектным решением предусмотрена разработка котлована под защитой временного ограждения из пересекающихся грунтоцементных свай диаметром 700 мм, устроенных с шагом 500 мм.

В пределах площадки грунт был представлен однородным массивом, состоящим из мелкого плотного песка. Грунт обладал незначительной связностью ( $C = 7$  кПа).

В рамках опытных работ были выполнены 21 опытные сваи.

Скорость подъема монитора и давление нагнетания варьировали в тех же пределах, как в предыдущей серии полевых испытаний (графики №2 на рис.2 и 3).

На данном объекте была проведена дополнительная серия экспериментов по применению цементных растворов с различным водоцементным отношением. Результаты измерений в диапазоне  $В/Ц=0,8 \dots 1,1$ , показали, что при сгущении цементного раствора наблюдается небольшое снижение диаметра свай до 5% (рис.4), что сопоставимо с погрешностью измерений в полевых условиях.

Отметим, что на территории строительной площадки верхняя часть грунта была представлена техногенным слоем мощностью 0,5-0,7 м, включающим старые фундаменты, остатки древесных строений и т.п., поэтому оперативное измерение диаметров свай устройством УИР-120 оказалось невозможным. Для измерения диаметров свай в пределах свайного поля был откопан котлован до обнажения тел свай в естественном грунте (рис.5).

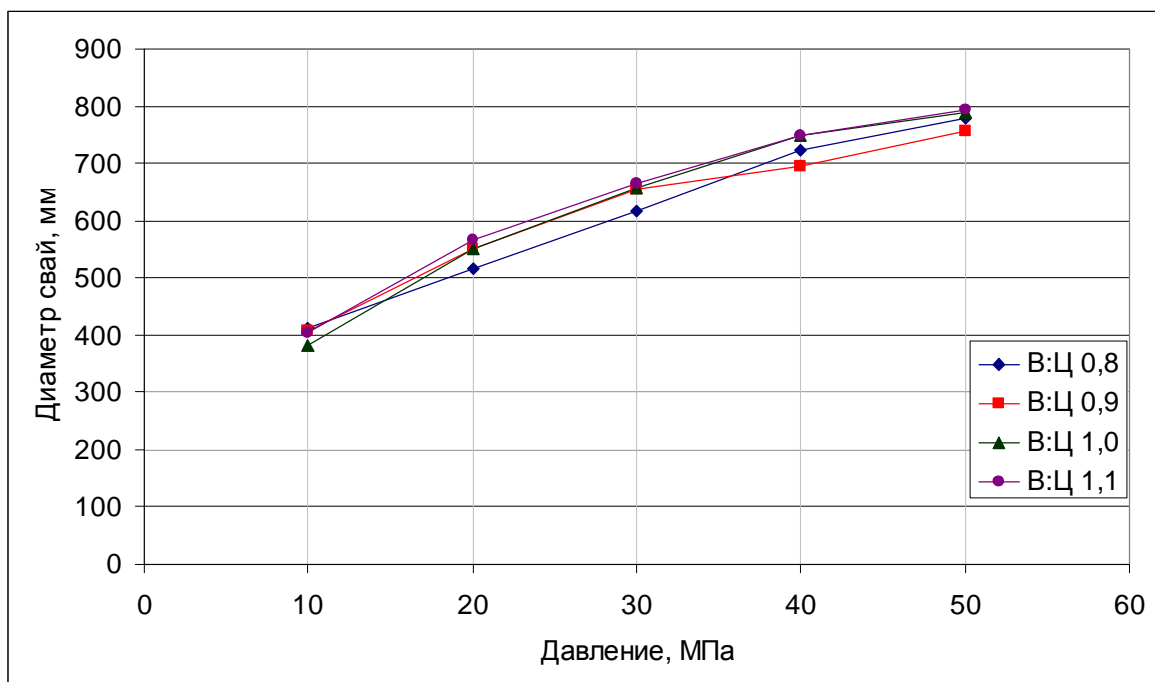


Рис.4. Зависимость диаметра свай от давления нагнетания цементных растворов с различным водоцементным отношением.



Рис. 5. Опытные грунтоцементные колонны

### Серия полевых испытаний №3.

При строительстве многосекционного цементного силоса на территории цементного завода в г. Новотроицке было принято решение об устройстве свайно-плитного

фундамента. Под фундаментной плитой диаметром 42 м и толщиной 3,4 м предполагалось устройство грунтоцементных свай диаметром 600 мм и длиной 20 м. В основании плиты находилась глина легкая с дресвой и прослойками известковых пород. В соответствии с результатами геологических изысканий величина сцепления глинистого грунта составляла  $C = 47$  кПа.

Результаты измерения диаметров свай, выполненные в рамках опытных работ, в зависимости от скорости подъема монитора представлены графиком №3 на рис. 2.

Большой разброс экспериментальных значений обусловлен тем, что укрепляемый грунт был сильно неоднороден, так как состоял из глин различного строения и консистенции. Это было видно даже по выходящей пульпе, цвет которой менялся от темно красного до светло-коричневого оттенка. Кроме того, в глинистом массиве присутствовали прослойки известняка.

#### Выводы.

Анализ результатов всех трех серий полевых испытаний показал, что диаметр свай существенно зависит от сцепления частиц грунтового массива. Так для одной и той же скорости подъема монитора (1 п.м. за 120 с) для связных грунтов – глин с высоким уровнем сцепления ( $C = 47$  кПа) диаметр свай составил 400 мм. С уменьшением прочности грунтов ( $C = 7$  кПа) диаметр увеличился до 700 мм, а для практически несвязных грунтов ( $C = 1$  кПа) диаметр составил 1000 мм. Примерно такие же отношения существуют и для других скоростей подъема монитора.

## ВЫВОДЫ

1. При устройстве грунтобетонных колонн определяющим фактором являются физико-механические свойства грунта. При выборе технологического режима необходимо в первую очередь оценить связность грунта. Тип грунта играет заметную роль в изменения диаметра колонны, которое может достигать 50 %.

2. Неоднородность грунтового массива оказывает большое влияние на прогнозирование диаметра грунтобетонной колонны.

3. В связных грунтах при увеличении времени обработки вдвое наблюдался рост диаметра колонны на 70%. В несвязных грунтах увеличение времени обработки не приводит к резкому увеличению диаметра, основной рост наблюдается на начальном этапе размыва.

4. В связных грунтах высокая скорость вращения монитора и небольшое время обработки грунта может приводить к плохому перемешиванию грунта – образованию комьев грунта в составе грунтобетонной колонны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасин М.Ф., Малышев Л.И. Бройд И.И. Струйная технология укрепления грунтов. // «ОФМГ». - 1984. - №5.
2. Nikonov G.P. Research into the cutting of coal by small diameter high pressure water jet. Ch. 34. Dynamic rock mechanics. Soc. Of Mining Engineers. New-York, 1971.
3. Зега С.О., Бройд И.И. Концепции физических основ струйного закрепления грунтов. // «ОФМГ». - 2004. - №2.
4. Балыхин Г.А., Нзамуйе И. Взаимодействие гидромоторной струи с горным массивом // Труды Университета дружбы народов. - М.:, 1992, вып. 155, с. 208-114.
5. Бройд И.И. Струйная геотехнология. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004 г.

6. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. – М.: Стройиздат, 2009.
7. Зега С.О., Бройд И.И. Технологические особенности проектирования подземных конструкций, выполняемых с помощью струйной геотехнологии.// «ОФМГ». -2009. -№2.
8. Патент на полезную модель !!!!!

1. Rehbinder, G. The drag force on the grains in a permeable medium subjected to a water jet// Journal of applied mathematic and physics (ZAMP), vol. 28, 1977.
2. Бройд И.И. Струйная геотехнология: Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004 г. – 448 с.
3. Рекламный проспект фирмы TREVI Group, 1999.
4. Балыхин Г.А., Нзамуйе И. Взаимодействие гидромоторной струи с горным массивом // Труды Университета дружбы народов.-М., 1992, вып. 155, с. 208-114.
5. Рекламный проспект фирмы Ischebeck.
6. Бройд И.И. Гидродинамические расчеты процесса струйного резания грунтов при строительстве подземных сооружений // Экспресс-информация ЦБНТИ Минмонтажспецстрой СССР. Монтажные и специальные работы. Серия: специальные строительные работы.-М., 1984, № 12, с. 23-30.