

## **Экспериментальные исследования диаметра грунтоцементных колонн в различных грунтах**

### **Введение**

Технология струйной цементации грунтов (Jet-grouting) получила широкое распространение при решении различных задач подземного строительства - устройстве противодиффузионных 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., Зега О.С., Малышев Л.И., Никонов Г.П., Хасин М.Ф. и др.) были предприняты попытки построить идеальную теорию размыва грунта струей цементного раствора [1,3,4,7,9]. Полный обзор теоретических исследований в этой области приводится в монографиях [2,5].

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.

Кроме теоретических исследований в различной литературе часто встречаются результаты замеров грунтоцементных колонн на различных реальных объектах строительства [2,5,8]. При этом построение каких-либо экспериментальных зависимостей представляется очень сложной задачей, т.к. данные носят разрозненный характер.

Настоящая работа содержит описание результатов серии 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. Актуальность подобной задачи очевидна. Знание величины диаметра позволяет на проектном этапе спрогнозировать диаметр грунтоцементных колонн, их требуемое количество и, соответственно, точно определить объемы и стоимость работ.

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.

### Способ измерения диаметра колонн

Для измерения диаметра колонн на объектах производится откопка оголовков. Эта операция выполняется спустя 2-3 суток, необходимых для набора прочности грунтоцемента. Подобная методика сопровождается значительным объемом ручного труда и не позволяет оперативно оценить диаметр колонн в процессе их устройства.

Для снижения физических затрат, ускорения проведения опытных работ, а также для операционного контроля диаметров колонн применяли специально изготовленное измерительное устройство СПР-120 (скважинный прибор ручного действия для измерения диаметров до 120 см) [6]. Устройство состоит из двух стержней, шарнирно закрепленных друг с другом в средней части. В этом случае, измеряя расстояние между верхними концами, длины стержней и расположение шарнира, можно легко рассчитать раскрытие их нижних концов. Принцип действия устройства показан на рис.1 (А).

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

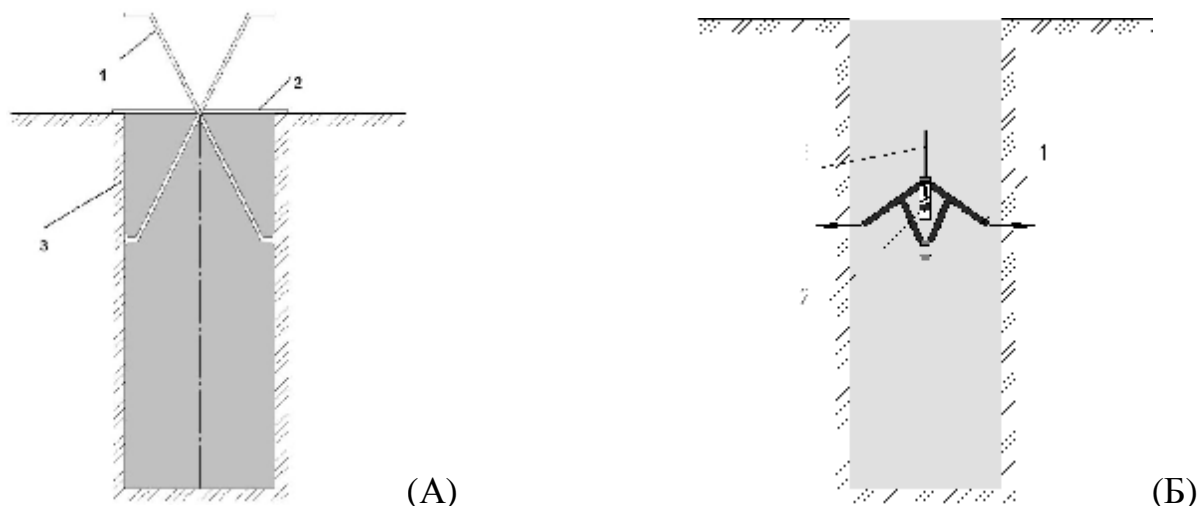


Рис. 1 Схемы измерения диаметра колонны.

(А): 1 – стержни измерительного устройства; 2 - фиксатор; 3 - стенка грунтобетонной колонны.

(Б): 1 – подвижные щупы измерительного устройства; 2 – гидравлический цилиндр; 3 – буровая штанга.

Стоит отметить, что устройство СПР-120 позволяет измерять диаметр лишь в верхней части грунтоцементной колонны, на глубине 1 м. Для

измерения диаметра колонны на большей глубине возможно применение устройства представленного на рисунке 1 (Б).

Устройство работает следующим образом: при помощи буровой штанги устройство погружают в тело колонны, с поверхности земли в гидравлический цилиндр подается давление, что приводит к раздвижению подвижных щупов устройства. Вытесненный объем и давление в цилиндре измеряют на поверхности. Перед фактическим измерением диаметра требуется калибровка прибора. Калибровка осуществляется путем расширения рычажных щупов и измерения изменений конечного давления и объема внутри системы. В тот момент, когда щупы достигают стенки грунтоцементной колонны, давление начинает расти, при этом зная величину вытесненного объема можно судить о диаметре колонны. Для измерения диаметра колонны с большей точностью возможно присоединение к рычажным щупам цифровых инклинометров [8].

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 колонн - время размыва грунта, расход цемента на единицу длины колонны, количество цемента на единицу объема закрепленного грунта и т.д. [5].

На объектах применяли машины различных фирм-изготовителей с непрерывным или ступенчатым подъемом монитора, поэтому все значения скорости подъема монитора для их общей сопоставимости были приведены к единому варьируемому параметру – времени подъема монитора на высоту 1,0 м.

Все экспериментальные результаты были получены при устройстве колонн по однокомпонентной технологии струйной цементации в рамках опытных работ на реальных объектах, выполненных предприятием «СК «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  $c = 1$  кПа.

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

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

Диаметр колонн в процессе их устройства измеряли с помощью прибора СПР-120 (Рис. 2). Для оценки достоверности полученных результатов все колонны в последующем были откопаны. Расхождение между результатами измерений с помощью устройства СПР-120 и результатами непосредственного измерения диаметров откопанных колонн составляло не более 5%. В дальнейшем данная методика измерений применялась для оперативного контроля диаметров рабочих колонн в процессе устройства ограждения котлована.



Рис.2 Измерение диаметра колонны с помощью прибора СПР-120.

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 колонн от скорости подъема монитора приведена на рис. 3, график №1.

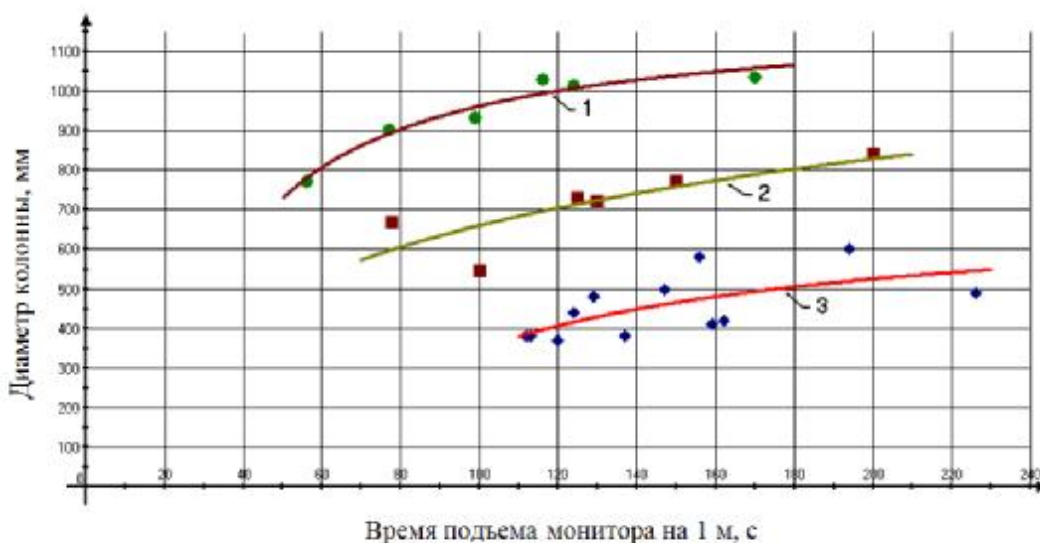


Рис. 3. Зависимости диаметра грунтоцементных колонн от скорости подъема монитора (времени подъема монитора на высоту 1,0 м):  
1 –  $c = 1$  кПа; 2 –  $c = 7$  кПа; 3 –  $c = 47$  кПа.

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 колонн от уровня давления нагнетания показаны на рис.4, график №1.

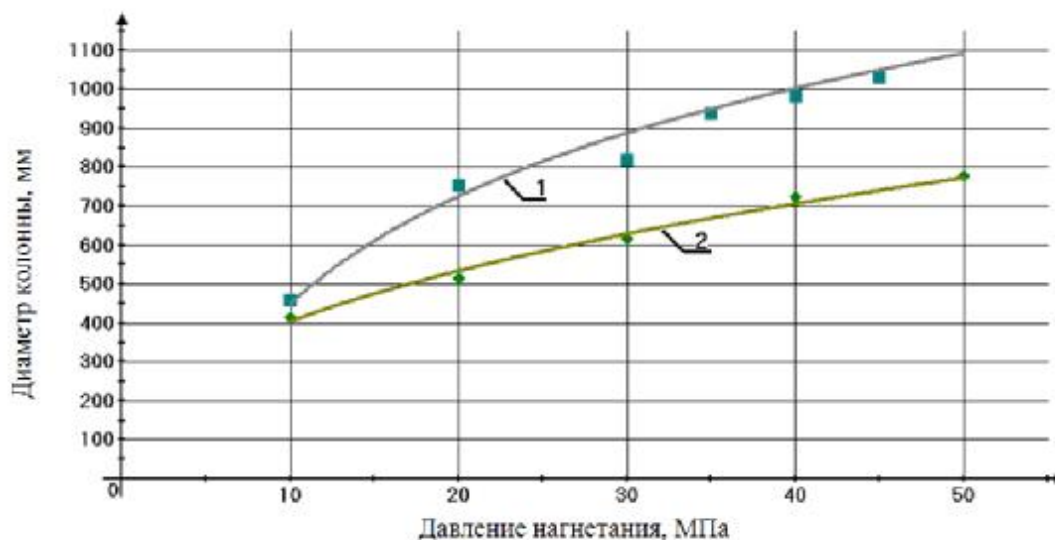


Рис. 4. Зависимость диаметра грунтоцементных колонн от давления нагнетания цементного раствора: 1 –  $c = 1$  кПа; 2 –  $c = 7$  кПа.

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.

### 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 колонн 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 колонны.

Скорость подъема монитора и давление нагнетания варьировали в тех же пределах, как в предыдущей серии полевых испытаний (графики №2 на рис.3 и 4).

На данном объекте была проведена дополнительная серия экспериментов по применению цементных растворов с различным водоцементным

отношением. Результаты измерений в диапазоне  $V/C=0,8 \dots 1,1$ , показали, что при сгущении цементного раствора наблюдается небольшое снижение диаметра свай до 5% (рис.5), что оказалось сопоставимым с погрешностью измерений в полевых условиях.

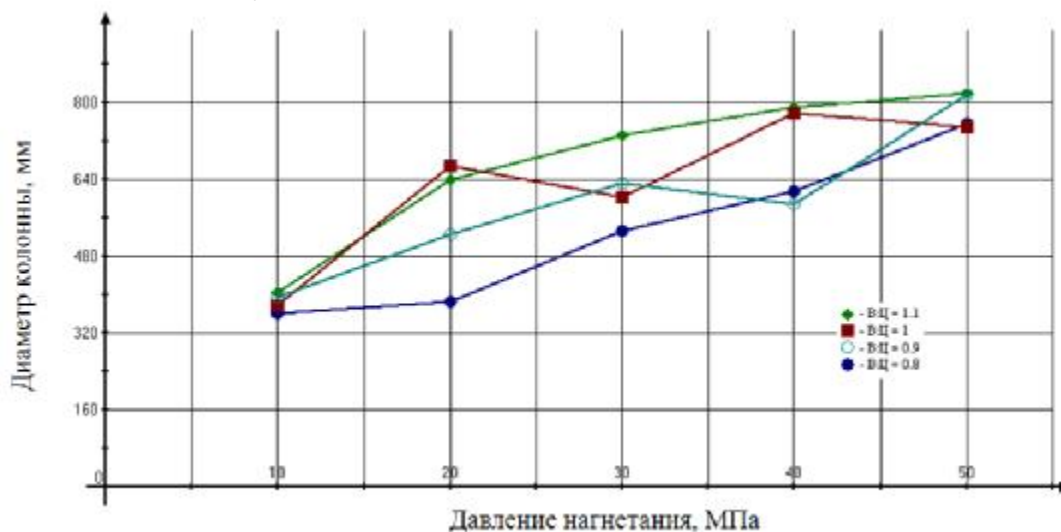


Рис.5. Зависимость диаметра свай от давления нагнетания цементных растворов с различным водоцементным отношением.

Верхняя часть грунта в пределах строительной площадки была представлена техногенным слоем мощностью 0,5-0,7 м, включающим старые фундаменты, остатки древесных строений и т.п., поэтому для измерения диаметров колонн в пределах опытной площадки был откопан котлован до обнажения тел колонн в естественном грунте (рис.6).



Рис. 6. 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 колонн 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 колонн, выполненные в рамках опытных работ, в зависимости от скорости подъема монитора представлены графиком №3 на рис. 4.

Большой разброс экспериментальных значений обусловлен высокой неоднородностью грунта, состоящего из глин различного строения и консистенции. Кроме того, в глинистом массиве присутствовали прослойки известняка.

### **Построение эмпирической зависимости**

При построении эмпирической зависимости за основу была взята зависимость, предложенная специалистами фирмы Ischebeck:

$$D = \sqrt[A]{\frac{PQ}{BV}} \quad (1)$$

где  $P$  – давление нагнетания, МПа;

$Q$  – расход, м<sup>3</sup>/с;

$V$  – скорость подъема монитора, м/с;

$A, B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от грунтов.

На основе полученных экспериментальных данных были определены коэффициенты  $A$  и  $B$  в зависимости от сцепления грунта  $c$ . Коэффициенты зависимости подбирались методом наименьших квадратов. Полученные результаты приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Зависимость коэффициентов  $A$  и  $B$  от величины сцепления грунта.**

Серия полевых испытаний			
	1	2	3
Сцепление $c$ , кПа	1	7	47 кПа
$A$	4,4	3,7	2
$B$	11,8	36	44

Используя полученные результаты, были построены зависимости коэффициентов  $A$  и  $B$  от величины сцепления  $c$ :

$$A(c) = 5.7c^{-0.25} \quad (2)$$

$$B(c) = 11.2c^{0.4} \quad (3)$$

Подставив выражения (2) и (3) в (1), получим окончательную экспериментальную зависимость диаметра грунтоцементной колонны от технологических параметров и величины сцепления размываемого грунта:

$$D = \sqrt[5.7c^{-0.25}]{\frac{PQ}{11.2Vc^{0.4}}} \quad (4)$$

Формула (4) позволяет достаточно точно выполнить прогноз диаметра колонн в различных типах грунтов. Так, например, для 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 колонны составит 400 мм. С уменьшением связности грунтов  $c = 7$  кПа диаметр увеличится до 700 мм, а для практически несвязных грунтов  $c = 1$  кПа диаметр составит 1000 мм. Примерно такие же отношения существуют и для других скоростей подъема монитора.

Формула (4) показывает, что вторым значительным фактором, влияющим на диаметр колонн, является давление нагнетания цементного раствора. Например, при давлении 40 МПа в связных грунтах небольшой связности  $c = 7$  кПа диаметр свай составил 700 мм, а в несвязных грунтах - 1000 мм.

Это достаточно точно отражает результаты эксперимента, что позволяет рекомендовать эмпирическую зависимость (4) для проектирования грунтоцементных колонн в различных грунтах.

### Литература

1. Балыхин, Г.А., Нзамуйе И. 1992. Взаимодействие гидромоторной струи с горным массивом. *Труды Университета дружбы народов*, вып. 155, с. 208-114.
2. Бroyд, И.И. 2004. Струйная геотехнология. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов.
3. Зеge, С.О., Бroyд И.И. 2004. Концепции физических основ струйного закрепления грунтов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*, №2.
4. Зеge, С.О., Бroyд И.И. 2009. Технологические особенности проектирования подземных конструкций, выполняемых с помощью струйной геотехнологии. *Основания, фундаменты и механика грунтов*, №2.
5. Малинин, А.Г. Струйная цементация грунтов. - М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2010.
6. Патент на полезную модель № RU 85191 U1. Скважинный прибор // Малинин А.Г. Оpubл. 27.07.2009 Бюл. № 21.
7. Хасин, М.Ф., Малышев, Л.И. Бroyд, И.И. 1984. Струйная технология укрепления грунтов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*, №5.
8. J.C.W.M. de Wit, Bogaards P.J., Lanngorst and others. 2007. Design and validation of jetgrouting for the Central Station Amsterdam, *Proc. 14<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid Vol. 3: 1299-1305.
9. Nikonov, G.P. 1971. Research into the cutting of coal by small diameter high pressure water jet. Ch. 34. Dynamic rock mechanics. Soc. Of Mining Engineers. New-York.