



005008746

На правах рукописи

ЗАСОРИН Михаил Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОЙ  
ЦЕМЕНТАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В ПОДЗЕМНОМ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Специальность 25.00. 22 – «Геотехнология» (подземная, открытая и строительная)

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

12 ЯНВ 2012

Москва 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
горный университет» на кафедре «Строительство подземных  
сооружений и шахт»

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор ШИЛИН Андрей Александрович

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор КУЗЬМИН Евгений Викторович;  
кандидат технических наук МАЛИНИН Алексей Генрихович

Ведущая организация – ООО «Геоизол»

Защита диссертации состоится «26» января 2012 года в 11 часов  
00 минут на заседании диссертационного совета Д-212.128.05  
при Московском государственном горном университете по адресу:  
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного горного университета

Автореферат разослан «26» декабря 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



В.В. Мельник

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На сегодняшний день развитие инфраструктуры крупных городов неразрывно связано с освоением подземного пространства. Так, приоритетной задачей правительства г. Москвы по комплексному освоению подземного пространства является строительство от 2 до 3 млн. м<sup>2</sup> многофункциональных комплексов, что составляет 15% от общего объема строительства.

Учитывая сложные горно-геологические условия, характеризующиеся неустойчивыми грунтами с низкими коэффициентами фильтрации, наличием подземных напорных вод, а также плотность городской застройки в центральных районах, при строительстве подземных сооружений необходимо применять специальные способы производства работ.

Анализ мирового и отечественного опыта, а также технологические преимущества в сравнении с аналогами, позволяющими решать схожие инженерные задачи, позволяют сделать предварительный вывод, что струйная цементация грунтов является надежной и прогрессивной технологией, эффективно решающей вышеперечисленные задачи освоения подземного пространства.

Однако широкому внедрению струйной цементации, особенно в глинистых грунтах, мешает малоизученность физики процесса, отсутствие взаимосвязей параметров технологии с конкретными горно-геологическими условиями, отсутствие методик проектирования, позволяющих определять технологические параметры с необходимым уровнем надежности, а также низкая управляемость технологии. Зачастую это приводит к некачественному выполнению работ и непрогнозируемости их результатов в целом, а подчас и к аварийным ситуациям, следствием чего является необходимость проведения дорогостоящих работ по ремонту полученной конструкции из грунтоцемента.

Выбор технологических параметров струйной цементации, как правило, осуществляется эмпирическим путем, на основе ранее выполненных работ на сходных объектах. Поэтому параметры не всегда оказываются оптимальными, вследствие чего возникает необходимость в создании единого подхода, позволяющего проектировать струйную цементацию в различных горно- и гидрогеологических условиях. Следует отметить, что важнейшим технологическим параметром, влияющим на прочность

грунтоцементных колонн и их противofильтрационные свойства, является расход цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта. Этот параметр напрямую связан с экономической оценкой струйной технологии, так как от него зависят продолжительность работ, затраты труда, энергии, работы механизмов. На основании практики определены эмпирические зависимости по расчету количества цемента на единицу объема песчаных, гравийно-галечниковых и гравийно-песчаных грунтов. Для глинистых грунтов сегодня отсутствует объем информации, позволяющий даже приблизительно определить основные параметры производства работ.

Для расширения диапазона применения струйной цементации, в особенности в глинистых грунтах, необходимо обладать знаниями, позволяющими определять оптимальные параметры струйной цементации для различных горно-геологических условий, а также осуществлять поиск путей снижения материальных затрат и стоимостных показателей за счет увеличения управляемости технологическими параметрами, позволяющими получать конструкции из грунтоцемента с заданными прочностными и противofильтрационными свойствами.

В связи с этим обоснование параметров струйной цементации глинистых грунтов является актуальной научной задачей.

**Цель работы** – обоснование технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов в подземном строительстве с целью их оптимизации для конкретных горно-геологических условий, обеспечивающих уменьшение стоимостных показателей, снижение сроков строительства, а также расширение возможностей применения технологии в глинистых грунтах.

**Идея работы** заключается в формировании нового подхода к проектированию основных технологических параметров струйной цементации на основе взаимосвязей физических свойств грунтов и прочностных характеристик грунтоцемента с целью их оптимизации для конкретных горно-геологических условий.

**Методы исследований.** Для решения сформулированной задачи в работе применен комплексный метод, включающий теоретические и натурные исследования, а также анализ и обобщение полученных результатов с применением методов математической статистики.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлены закономерности влияния числа пластичности глинистых грунтов ( $I_p$ ) на прочностные характеристики грунтоцемента, состоящие в том, что с уменьшением показателя числа пластичности ( $I_p$ ) глинистых грунтов прочность грунтоцемента увеличивается.
2. Уточнен механизм и дана количественная оценка прироста прочности грунтоцемента, полученного посредством струйной цементации глинистых грунтов различного физического состава, на 70-е сутки, которая отлична от стандартной методики определения прочностных характеристик на 28-е сутки.
3. Установлены зависимости влияния расхода цемента на прочностные характеристики грунтоцемента, полученного по технологии струйной цементации, состоящие в том, что между рассматриваемыми параметрами существуют взаимосвязи, которые отличаются от известных результатов тем, что в них учтено влияние физических свойств различных по составу и свойствам глинистых грунтов.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы подтверждаются:**

- использованием нормативных экспериментальных методов исследования прочности грунтоцементных образцов при одноосном сжатии, растяжении и изгибе;
- удовлетворительной сходимостью полученных результатов лабораторных исследований и практических испытаний, выполненных в рамках научной работы.
- положительным результатом внедрения разработанных рекомендаций в практику городского подземного строительства.

**Научная новизна работы** состоит в выявлении закономерностей влияния технологических параметров струйной цементации на прочностные свойства грунтоцемента, позволяющих повысить контроль и управляемость технологии и тем самым получать конструкции из грунтоцемента с заданными прочностными и противофильтрационными свойствами.

**Научное значение работы** состоит в дальнейшем развитии существующих знаний о процессах технологии струйной цементации в различных горно-геологических условиях, а также в расширении диапазона применения струйной цементации в глинистых грунтах.

**Практическое значение работы** заключается в обосновании методики «Рекомендации по выбору технологических параметров струйной цементации в глинистых грунтах», позволяющей существенно сократить материальные и стоимостные затраты.

**Реализация выводов и рекомендаций.** Разработанная методика «Рекомендации по выбору и определению технологических параметров технологии струйной цементации глинистых грунтов» принята к использованию ООО «Геоизол» и ООО «НПП ТХ-Инжиниринг»; применялась при строительстве индустриального парка «Ворсино» Боровского района в Калужской области, а также укреплении грунтов при ремонте Коломенских шлюзов в г. Москве.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались в рамках международного симпозиума «Неделя горняка» на семинаре «Научные проблемы строительной геотехнологии и освоения подземного пространства» (Москва, 2010), научно-техническом совете ООО «Геоизол» (Санкт-Петербург, 2010), а также на научных семинарах кафедры СПСиШ МГТУ (2008-2011 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертации и результаты проведенных исследований опубликованы в 3-х печатных трудах в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

**Объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 66 наименований, четырех приложений, 45 таблиц, 26 рисунков и 18 графиков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена анализу методов расчета технологических параметров струйной цементации. Работы отечественных ученых: Картозия Б.А., Певзнера М.Е., Баклашова И.В., Борисова В.Н., Аренса В.Ж., Иофиса М.А., Макарова А.Б. и др. - внесли существенный вклад в развитие теории динамики и механики подземных сооружений.

Исследованием проблем искусственного изменения свойств, стабилизации и укрепления грунтов в разное время занимались Безрук В.М., Рубцов И.В., Кузьмин Е.В., Калганов В.Ф., Гончарова Л.В., Абелев Ю.М., Ганичев И.А., Шилин А.А., Жинкин, Г.Н.,

Меркин Е.С., Борисова Е.Г., Куликов Ю.Н., Ржаницин Б.А., Токин А.Н., Воронкевич С.Д., и др.

Значительный вклад в развитие теории и практики струйной цементации грунтов внесли: Богов С.Г., Бройд И.И., Дмитриев Н.В., Запелалов И.А., Коновалов П.А., Корольков В.Н., Малинин А.Г., Малышев Л.И., Петросян Л.Р., Попов А.В., Смородинов М.И., Соколович В.Е., Федоров Б.С., Хасин М.Ф., и др.

На сегодняшний день развитие инфраструктуры мегаполисов неразрывно связано с освоением подземного пространства. Так, приоритетной задачей правительства г. Москвы по комплексному освоению подземного пространства является строительство от 2 до 3 миллионов квадратных метров подземных многофункциональных комплексов, что составляет 15% от общего объема строительства. Под землей планируется разместить:

- 30% объектов сферы услуг;
- 70% всех гаражей;
- 80% складских помещений.

Учитывая сложные горно-геологические условия и плотность городской застройки в центральных районах, можно утверждать, что струйная цементация грунтов представляет собой технологию, эффективно решающую вышеперечисленные задачи освоения подземного пространства, преимуществами которой, по сравнению с аналогами, являются:

- отсутствие ударных нагрузок, позволяющих производить работы вблизи зданий и сооружений;
- высокая скорость производства работ за счет параллельного выполнения ряда операций (разрушения естественного массива грунта, выноса разрушенного массива на поверхность земли, перемешивания подаваемого раствора с грунтовым массивом);
- отсутствие необходимости бурить значительные по диаметру скважины через фундаменты, при укреплении оснований;
- выполнение работ в стесненных условиях, подвалах зданий, на больших глубинах, при том что оборудование может располагаться на стройплощадке в удалении от места непосредственного производства работ;
- полная механизация работ и контроль основных параметров технологии.

Яркими примерами выполнения струйной цементации, вошедшими в программу освоения подземного пространства г. Москвы, стали:

- укрепление грунтов при проходке Серебряноборского тоннеля;
- возведение ограждающих конструкций при строительстве Алабяно-Балтийских тоннелей;
- укрепление фундаментов при реконструкции универсама «Детский мир» и т.д.

На данном этапе развития метод струйной цементации подразделяют на три основные разновидности: одно-, двух- и трехкомпонентную технологию.

Анализ накопленного опыта производства работ в России показывает, что наиболее востребованной разновидностью струйной цементации применительно к глинистым грунтам является однокомпонентная технология. Это объясняется несколькими факторами:

- однокомпонентная технология позволяет получать наибольшие прочностные характеристики грунтоцемента и наилучшие противодиффузионные свойства конструкции;

- производство работ по однокомпонентной технологии является более простой инженерной задачей по сравнению с двух- и трехкомпонентной - с точки зрения отсутствия дополнительных трудозатрат и оборудования.

- отсутствует опыт использования импортного оборудования по двух- и трехкомпонентной технологии струйной цементации на территории России.

Следует отметить, что глубина производства работ по струйной цементации достигает 30 м, глины и суглинки различного механического состава широко представлены в геологическом строении, при отличных глубинах (от 2-х до 30-ти м) и мощностях.

Выбор технологических параметров струйной цементации грунтов, как правило, осуществляется эмпирическим путем на основе ранее выполненных работ на сходных объектах. Поэтому технологические параметры не всегда оказываются оптимальными, вследствие чего возникает необходимость в создании и расширении расчетной базы, позволяющей проектировать струйную цементацию в различных горно- и гидрогеологических условиях. Динамическое давление струи, диаметр насадки, частота



вращения, скорость подъема монитора, расход цемента – параметры, оказывающие большое влияние на проектируемые характеристики грунтоцемента. Важнейшим технологическим параметром, влияющим на прочность грунтоцементных колонн и их противифльтрационные свойства, является расход цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта. Этот параметр напрямую связан с экономической оценкой струйной технологии, так как от него зависят продолжительность работ, затраты труда, энергии, работы механизмов. На основании практики определены эмпирические зависимости по расчету количества цемента на единицу объема песчаных, гравийно-галечниковых и гравийно-песчаных грунтов. Для глинистых грунтов сегодня отсутствует объем информации, позволяющий даже приблизительно определить основные параметры производства работ. По данным технической литературы при закреплении глинистых грунтов прочность грунтоцемента может изменяться от 1 до 8 МПа, в зависимости от гидрогеологических условий массива и технологических параметров струйной цементации, а проектирование можно выполнять только на основании лабораторного эксперимента с учетом близких аналогов. На практике выбор основных технологических параметров струйной цементации при работе в глинистых грунтах требует особого внимания, что связано с их физическими свойствами.

Вследствие этого при производстве работ в глинистых грунтах возникают определенные сложности:

- непредсказуемость пробоя;
- определение расстояний между скважинами и их диаметрами;
- определение прочности грунтоцемента на стадии проектирования;
- дополнительные работы по предварительному размыву грунта;
- необходимость введения в размывающий состав специальных добавок.

Анализ мирового и отечественного опыта показывает, что диапазон прочности на сжатие суглинков составляет 2,4 – 10,5 МПа, а для глин варьируется от 0,8 – 7,1 МПа в зависимости от их физических свойств и параметров технологии.

В настоящее время отсутствуют регламентированные методики и сертифицированные программные средства по проектированию конструкций,

возводимых по технологии струйной цементации грунтов. При отсутствии нормативной документации разработаны рекомендации по проектированию конструкций, выполненных с помощью струйной технологии. Выбор параметров технологического процесса струйной цементации грунтов, как правило, осуществляется эмпирическим путем, на основе ранее выполненных работ на сходных объектах. Зачастую это приводит к некачественному выполнению струйной цементации, следствием чего являются дорогостоящие работы по ремонту полученной конструкции из грунтоцемента. Особо актуальной является проблема выполнения струйной цементации глинистых грунтов, что связано с их физическими свойствами, такими как число пластичности, предел текучести и др. На сегодняшний день для обеспечения необходимых прочностных характеристик грунтоцемента работы в глинистых грунтах выполняются с заведомо повышенным расходом цемента на 1м<sup>3</sup> укрепленного грунта. Это приводит к необоснованной стоимости и экономической нецелесообразности работ в целом.

На практике опыт струйной цементации в глинистых грунтах показывает, что обоснованный расчет основных технологических параметров позволяет заблаговременно снизить стоимость работ, тем самым обеспечить конкурентоспособность с инженерными способами, позволяющими решать аналогичные задачи. Точное прогнозирование конечных результатов работ (диаметр свай, прочность грунтоцемента, противодиффузионные свойства грунтоцемента) на этапе проектирования позволит подобрать конкретную технологию производства работ (одно-, двух-, трехкомпонентная), а также использовать различные пластификаторы и добавки, позволяющие улучшать процессы струйной цементации.

В связи с отсутствием нормативной базы по обоснованию технологических параметров и проектированию конструкций из грунтоцемента расчеты необходимо выполнять, руководствуясь:

- экспериментальными работами непосредственно на объекте, выполненными с целью определения основных технологических параметров, при проектировании противодиффузионных завес;

- СНиП 2.03.01-84 при проектировании ограждения котлованов;

- СНиП 2.02.03-85 при проектировании свайных фундаментов.

Хотелось бы отметить, что в процессе проектирования устанавливается минимальная возможная прочность материала свай в соответствии с имеющимся практическим опытом производства в аналогичных горно-геологических условиях. Затем на объекте выполняют устройство опытных свай, отбирают образцы грунтоцемента с последующим определением его прочности лабораторными или экспресс-методами. На основании полученных результатов корректируются технологические параметры устройства свай.

Таблица 1

Характеристики грунтоцементных колонн в зависимости от горно-геологических условий массива

Тип грунта	Диаметр грунтоцементной колонны, мм	Модуль деформации грунтоцемента, МПа	Предел прочности грунтоцемента R <sub>b</sub> , МПа
Глина	500	500	2,0
Суглинок	600	1000	6,0
Супесь	700	2000	10,0
Песок	800	3500	14,0
Гравий	900	5500	19,0

В табл. 1 представлены характеристики грунтоцементных колонн в зависимости от горно-геологических условий массива. Как видно из таблицы, глинистые грунты относятся к наиболее сложным грунтам с точки зрения производства работ по струйной цементации. Как отмечалось выше, такой подход не всегда экономически обоснован, поэтому необходимость получения зависимостей прочностных характеристик полученного грунтоцемента от физических свойств массива является актуальной задачей. Следует отметить, что в иностранной литературе, в том числе в регламентах и нормативах, также отсутствуют зависимости, позволяющие определять основные параметры производства работ с учетом конкретных горно-геологических условий. Так, в табл. 2 представлены рекомендуемые технологические параметры по Британскому Стандарту BS EN 12716:2001.

Таблица 2

Рекомендуемые технологические параметры по BS EN 12716:2001

Параметры струйной цементации	Одно-компонентная	Двух-компонентная (воздух)	Двух-компонентная (вода)	Трех-компонентная
Давление пульпы, МПа	30 до 50	30 до 50	>2	>2
Расход пульпы, л/мин.	50 до 450	50 до 450	50 до 200	50 до 200
Давление воды, МПа	отсутствует	отсутствует	30 до 60	30 до 60
Расход воды, л/мин.	отсутствует	отсутствует	50 до 150	50 до 150
Давления воздуха, МПа	отсутствует	0,2 до 1,7	отсутствует	0,2 до 1,7
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин.	отсутствует	3 до 12	отсутствует	3 до 12

Проведенный анализ публикаций отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации позволяет отметить следующее:

- зарубежные и отечественные исследования и имеющийся опыт применения технологии струйной цементации подтверждают высокую эффективность способа, в том числе в связных грунтах;

- на сегодняшний день отсутствуют регламентированные методики и сертифицированные программные средства по проектированию конструкций, возводимых по технологии струйной цементации грунтов;

- для глинистых грунтов отсутствуют зависимости, позволяющие определять основные технологические параметры струйной цементации;

- в настоящее время отсутствуют данные по укреплению и исследованию прочностных характеристик глин и суглинков, подвергнутых струйной цементации;

- при отсутствии норм и правил проектирование конструкции осуществляется на основании опыта ранее выполненных работ на схожих объектах.

В соответствии с целью диссертации в задачу настоящих исследований входит:

- разработка и обоснование параметров струйной цементации глинистых грунтов
- разработка методики проведения лабораторных исследований глинистых грунтов, подвергнутых струйной цементации;
- проведение лабораторных и натурных исследований прочностных характеристик грунтоцемента;
- обработка результатов экспериментальных и натурных исследований;
- разработка методики расчета прочности грунтоцемента в зависимости от физических свойств обработанных глинистых грунтов;
- разработка рекомендаций по применению технологии струйной цементации в глинистых грунтах.

**Вторая глава** посвящена анализу физических свойств глинистых грунтов, представленных в геологическом строении г. Москвы.

По залеганию глинистых грунтов в геологическом строении г. Москвы было рассмотрено 80 участков, в которых выделены наименование пород, их краткая характеристика с указанием периода, ориентировочная мощность и глубина залегания кровли пласта в метрах. На основании выполненного анализа составлена карта с классификацией глинистых грунтов, представленных в геологическом строении г. Москвы.

Выполненный теоретический анализ геологического строения г. Москвы на предмет залегания глин и суглинков позволил составить стратиграфическую колонку наиболее характерных грунтов, классифицировать их по объемам, глубине, мощности, расположению на карте и свойствам (табл.3).

С целью определения прочностных характеристик грунтоцементных образцов автором были отобраны глинистые породы со строительных участков г. Москвы с учетом данных стратиграфической колонки (табл.4). Задачей анализа физических и химических свойств отобранных грунтов было определение: гранулометрического

состава (содержания крупнообломочных, песчаных, пылеватых и глинистых частиц); плотности частиц грунта; характеристики пластичности грунта (числа пластичности, показателя текучести); коэффициента фильтрации (в твердом и рыхлом состоянии) и влажности (природной, на границе текучести и раскатывания).

Таблица 3

Стратиграфическая колонка наиболее характерных глинистых грунтов, представленных в геологическом строении г. Москвы

№ п/п	Индекс	Глубина залегания кровли пласта, м	Мощность, м	Характеристика пород
1	Q <sub>2</sub>	2 - 5	до 3 м	Пески с прослоями суглинков и супесей, суглинки преимущественно песчаные с числом пластичности до 8 %, суглинки покровные, прикрытые маломощными и непостоянными слоями песка мощностью от 1 до 3 м
2	Q <sub>2</sub> ; Q <sub>1</sub>	5 - 10	от 2 до 5	Суглинки легкие, в основном пылеватые мощностью от 2 до 5 м, с включениями мелких песчаных частиц от 35 - 45 %, числом пластичности от 7 до 12 %
3	Q <sub>1</sub>	10 - 15	от 4 до 7	Суглинки тяжелые четвертичного периода с содержанием пылеватых частиц от 40 - 60 %, числом пластичности от 14 до 17 %
4	J <sub>3</sub>	15 - 20	от 5 до 10	Волжские глины юрского периода менее плотные, чем оксфордские, но более неоднородные, число пластичности от 15 - 38 %
5	J <sub>3</sub>	20 - 30	от 10 до 15	Оксфордские глины, преимущественно плотные, характеризующиеся высоким числом пластичности, достигающим 55%, естественная влажность достигает 72%.

В третьей главе приведены результаты лабораторных и натурных исследований зависимости прочностных характеристик грунтоцемента от технологических параметров производства работ.

Методика исследования прочностных характеристик грунта, закрепленного по технологии струйной цементации, состояла в следующем. На первом этапе были выполнены работы в натуральных условиях с целью подбора технологических параметров струйной цементации, в том числе определения грунтоцементного и водоцементного соотношения, непроизводительных потерь раствора при производстве работ. Струйная цементация выполнялась на полигоне по однокомпонентной технологии, с использованием бурового станка «СБГ-ПМ 2 Стерх».

Таблица 4

Результаты физических свойств грунтов по участкам

№	Участок отбора пробы	Наименование грунта по ГОСТ 25100-95	Число пластичности, %	Влажность на границе текучести, %	Природная влажность, %	Показатель текучести
1	ул. Рождественка, Кузнецкий мост	Глина тяжелая, мягкопластичная	51,68	85,50	62,70	0,56
2	ул. Никулинская Востряковское ш..	Глина тяжелая, текучепластичная	35,59	61,86	54,03	0,78
3	ул. Мясницкая, Фуркасовский пер.	Суглинок пылеватый, тяжелый, полутвердый	16,67	42,18	27,6	0,13
4	ул. Байкальская, Бирусинка	Суглинок пылеватый, легкий, полутвердый	8,18	17,37	10,13	0,11
5	Коломенская набережная, шлюз № 10	Суглинок песчанистый, легкий, текучепластичный	7,27	17,18	16,61	0,92

При производстве работ были приняты следующие технологические параметры:

- водоцементные соотношения раствора  $В/Ц=0,9$ ;
- давление нагнетания раствора 40 МПа;

- количество форсунок диаметром 3,5 мм - 2 шт.;
- скорость вращения монитора 20 об/мин;
- скорость подъема монитора 0,8 м/мин.

Подача рабочей жидкости осуществлялась по буровым рукавам от насоса высокого давления «TECNIWELL TW 351».

В ходе производства работ по струйной цементации было выполнено четыре грунтоцементные сваи со следующими геометрическими параметрами: диаметр свай составил от 580 до 610 мм, высота свай - 3000 мм. Следует отметить, что для лабораторных испытаний были отобраны глинистые грунты, идентичные грунтам, закрепленным в натуральных условиях. По результатам натуральных исследований были определены грунтоцементные соотношения, расход воды, сухого цемента на 1м<sup>3</sup> свай, а также расход раствора с учетом непроизводительных потерь. Результаты определения прочности отобранных кернов на 14 сутки по бразильской методике представлены в табл. 5.

По результатам выполненных натуральных испытаний была принята концепция исследования образцов грунтоцемента в лабораторных условиях.

На втором этапе были выполнены серии лабораторных испытаний грунтоцементных образцов, полученных путем перемешивания отобранных глинистых грунтов различных физических свойств, цемента марки М500 и воды. В ходе подготовки к испытанию автором были отобраны пять типов глин и суглинков, наиболее распространенных в геологическом строении г. Москвы, с различными физическими и химическими характеристиками, периодами и глубинами залеганий.

На основании проведенных лабораторных исследований построены графические зависимости, устанавливающие взаимосвязь влияния прочности грунтоцемента при одноосном сжатии, растяжении и изгибе и глиноцементного соотношения, характеризующие отличные по механическому составу глинистые грунты.

Анализ выполненных экспериментальных исследований показывает, что прирост прочностных свойств грунтоцемента, полученного посредством струйной цементации глинистых грунтов различного физического состава, с 28 по 70-е сутки составляет до



30 % от набора прочности на 28-е сутки, что является существенным фактором при проектировании технологии.

Таблица 5

Прочность отобранных образцов

№ сваи	Глиноцементное соотношение	Прочность (определенная по бразильской методике), МПа			
		№ керна			
		1	2	3	4
1	10%	0,51	0,59	0,49	0,57
2	15%	0,82	0,82	0,89	0,78
3	20%	1,43	1,72	1,66	1,59
4	25%	2,01	1,85	1,96	1,79

Для сравнительной оценки прочностных характеристик грунтоцемента, полученного в лабораторных условиях, с технологией струйной цементации, проведенной в натурных условиях, автором были выполнены работы непосредственно на строительном объекте г. Москвы. Натурные испытания проводились по адресу: Коломенская набережная, д. 26, шлюз № 10. В ходе работ по струйной цементации грунтов были выполнены три грунтоцементные колонны высотой 3 м, диаметром 0,55 - 0,60 м. На 28-е сутки после изготовления грунтоцементных колонн была произведена разработка грунтового массива до проектной отметки низа свай.

На следующем этапе выполнялся отбор кернов с использованием установки алмазного бурения с целью дальнейшего лабораторного исследования прочностных характеристик.

Лабораторные испытания заключались в определении прочности отобранных кернов при одноосном сжатии в соответствии с ГОСТ 28570-90. Испытания проводились с использованием ручного гидравлического прессы ПРГ-1-70 (7т), по 4 образца на сваю (табл. 6). Также были определены диаметры полученных свай, которые составили 600 мм.

Достоверность полученных натуральных и лабораторных результатов подтверждает статистическая обработка, выполненная автором путем проверки гипотезы однородности двух выборок по критерию Вилкоксона.

Проведенные автором исследования показали, что существенное влияние на прочностные характеристики грунтоцемента, полученного посредством струйной цементации связанных грунтов, оказывают их механические свойства.

Таблица 6

Прочность при одноосном сжатии на 28 сутки выбуренных кернов.

Свая №п./п.	Прочность, МПа	Среднее, МПа
1	7,88	8,28
	8,01	
	8,71	
	8,52	
2	7,02	7,24
	7,31	
	7,20	
	7,55	
3	5,18	5,45
	5,32	
	5,44	
	5,88	

По полученным данным экспериментальных исследований построены графики зависимости прочности при одноосном сжатии, растяжении и изгибе от числа пластичности глинистых грунтов ( $I_p$ ) при различном глиноцементном соотношении. Обработка результатов исследования методом регрессионного анализа позволила получить графические зависимости (рис.1 - 3).

Зависимость прочности при одноосном сжатии от числа пластичности глин в аналитическом виде:

$$\sigma_{сж} = 0,9 \sqrt{\frac{k_{2/4}}{I_p}}, \quad (1)$$

где  $I_p$  – число пластичности глинистых грунтов, %;  $k_{2/4}$  – коэффициент, зависящий от глиноцементного соотношения, который выражается показательной функцией:

$$k_{2/4} = 19,83 * 1,04^n \quad (2)$$

где  $n$  - глиноцементное соотношение, %.

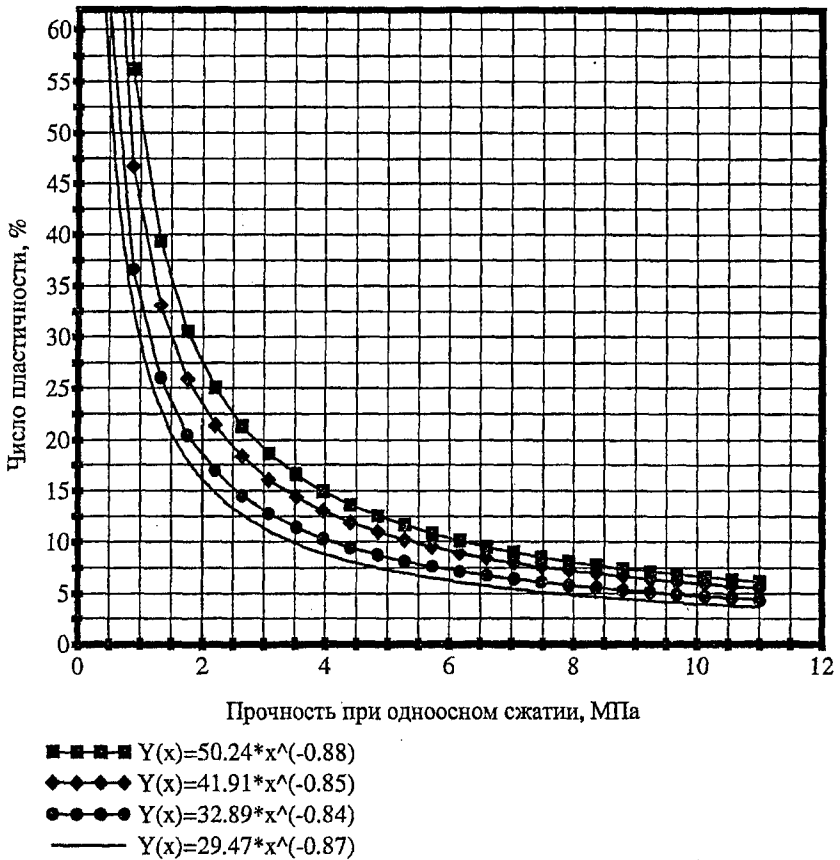


Рис. 1. График зависимости прочности грунтоцемента при одноосном сжатии от числа пластичности глин

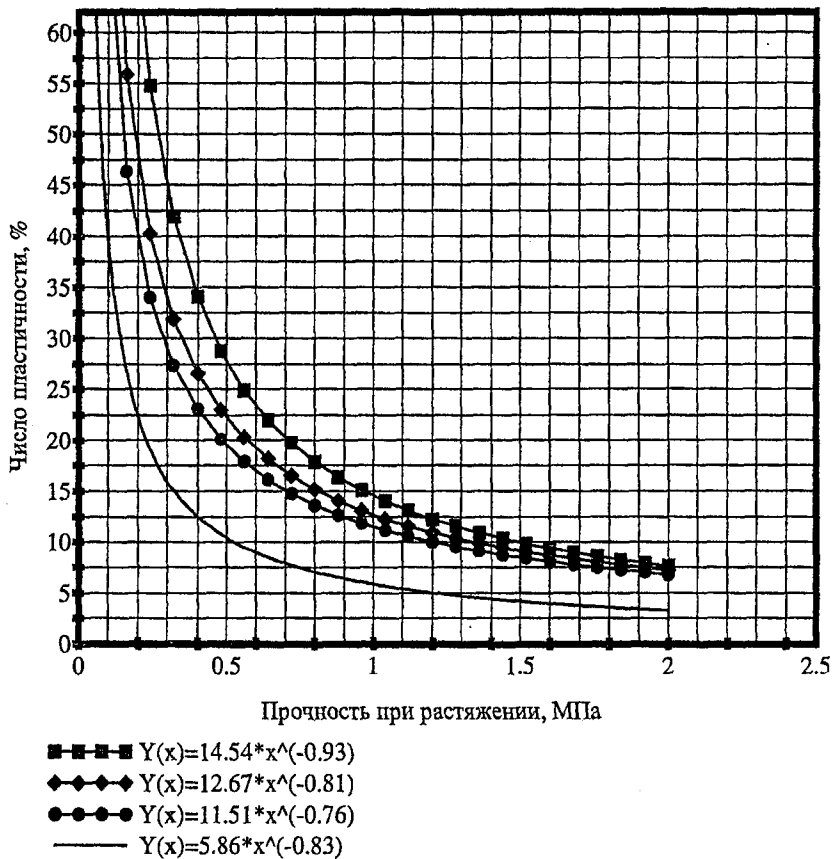


Рис. 2. График зависимости прочности грунтоцемента при растяжении от числа пластичности глин

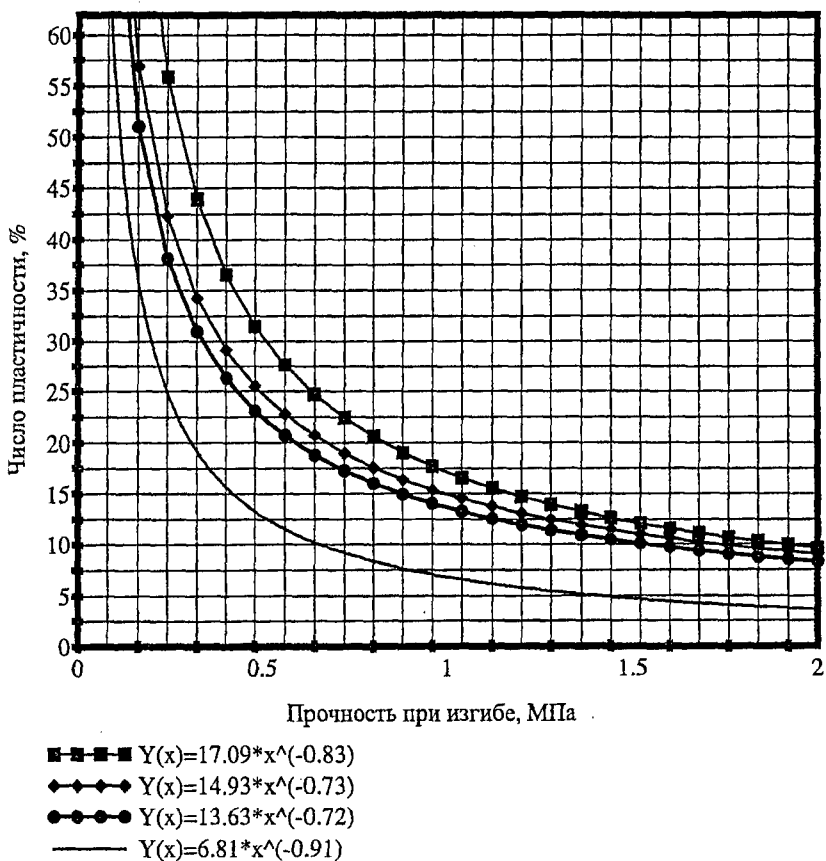


Рис. 3. График зависимости прочности грунтоцемента при изгибе от числа пластичности глин

Проведенный анализ взаимосвязи прочностных характеристик образцов грунтоцемента, полученных в ходе лабораторных исследований, и физических свойств отобранных глинистых грунтов показывает, что наиболее весомым параметром, влияющим на прочностные и противofильтрационные характеристики грунтоцемента, полученного посредством струйной цементации, является число пластичности глинистых грунтов.

**Четвертая глава** диссертации посвящена разработке рекомендаций по проектированию основных технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов.

Основными технологическими параметрами при проектировании работ по струйной цементации являются:

- расход цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта;
- частота вращения монитора;
- скорость подъема монитора;
- давление нагнетания раствора;
- диаметр растворной форсунки струйного монитора.

Основным параметром струйной цементации грунтов, как указывалось выше, является расход цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта, так как от него зависят продолжительность работ, затраты труда, механизмов, экономическая составляющая технологии в целом.

По результатам проведенных теоретических исследований, натурных и лабораторных испытаний была определена методика расчета технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов.

На первом этапе, с использованием данных физических свойств грунтов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, производится расчет прочности грунтоцемента, выполненного по технологии струйной цементации глинистых грунтов в соответствии с зависимостями 1 и 2. Далее производят расчет предельных усилий в сечении свай (при расчете ограждающих конструкций) и несущей способности свай (при проектировании свайных фундаментов). Принятые значения глиноцементного соотношения корректируются с учетом полученных значений. На основании полученных данных производят расчет количества цемента на 1 м<sup>3</sup> сваи с учетом непроизводительных потерь раствора. Основные технологические параметры струйной цементации (частота вращения и скорость подъема монитора, давление подачи цементного раствора, поперечный размер форсунки струйного монитора) определяются согласно приведенным в 4 главе зависимостям, а также исходя из опыта ранее выполненных работ на аналогичных участках. Далее в зависимости от области

применения технологии производят расчет армирования свай, а также необходимых дополнительных мер по увеличению технико-экономических показателей строительства (предварительный размыв грунта; включение специальных добавок, увеличивающих прочностные характеристики грунтоцемента, повышение несущей способности свай с помощью гидроразрыва и т.д.).

Исходя из полученных при расчете технологических параметров, производят выбор следующего основного технологического оборудования:

- буровая установка;
- миксерная станция;
- насосную станцию высокого давления;
- струйный монитор.

Для оценки стоимостных показателей при проектировании струйной цементации глинистых грунтов по предложенной в работе расчетной схеме были рассчитаны стоимостные затраты применительно к двум вариантам ограждающих конструкций. Первый вариант представляет собой оценку стоимостных показателей при проектировании струйной цементации по предложенной автором расчетной схеме. Второй расчетный вариант основывается на определении основных технологических параметров на основании практики производства работ (метод аналогий).

Используя расценки МТСН за июль 2011 г. была выполнена оценка стоимостных показателей для рассматриваемых вариантов (табл. 7).

Таблица 7

Результаты расчетов по оценке экономической эффективности исследований.

Вариант, №	Средства на оплату труда, тыс. руб.	Сметная стоимость, тыс. руб.	Стоимость материалов, тыс. руб.
1	1787	11555	3940
2	2100	14931	5840

Анализируя данные таблицы, следует отметить, что при использовании предложенной в работе расчетной схемы по проектированию струйной цементации стоимость материалов в 1,5 раза меньше, чем при расчетной схеме, основанной на

традиционно применяемой схеме, что обеспечивает уменьшение общей сметной стоимости на 30%.

Сравнительный экономический анализ показал, что при проектировании технологических параметров струйной цементации в глинистых грунтах по предложенной автором расчетной схеме снижается величина расхода цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта на 15 - 20% - по сравнению с традиционно применяемыми методами проектирования.

Таким образом, в результате выполненных исследований обоснованы и разработаны рекомендации по выбору и определению параметров технологии струйной цементации глинистых грунтов с использованием предложенной в работе расчетной схемы, позволяющей сократить материальные и стоимостные затраты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по обоснованию технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов в подземном строительстве с целью их оптимизации для конкретных горно-геологических условий, обеспечивающих уменьшение стоимостных показателей, снижение сроков строительства, а также расширение возможностей применения технологии в глинистых грунтах, что вносит существенный вклад в развитие геотехнологии.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработана методика проектирования основных технологических параметров струйной цементации при строительстве подземных сооружений. Даны рекомендации по определению прочностных характеристик грунтоцемента на этапе проектирования, позволяющих определять основные параметры струйной цементации без дополнительных лабораторных и практических испытаний.

2. Установлено, что при проектировании конструкций, выполненных по технологии струйной цементации в глинистых грунтах, необходимо учитывать рост прочностных характеристик с 28 по 70-е сутки, достигающий 30% от набора прочности на 28-е сутки.



3. Разработаны аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь прочности грунтоцемента при одноосном сжатии, растяжении и изгибе и глиноцементного соотношения, характеризующие отличные по механическому составу глинистые грунты, которые позволяют рассчитывать расход цемента на 1 м<sup>3</sup> закрепленного грунта при проектировании струйной цементации, в зависимости от свойств грунтов.

4. На основании выполненного теоретического анализа геологического строения г. Москвы построена стратиграфическая колонка наиболее характерных глинистых грунтов. Классификация перспективы струйной цементации, проведенная в рамках исследования физических свойств глинистых грунтов, а также сравнительный экономический анализ с конкурирующими технологиями показывает значительное превосходство с точки зрения как сроков производства, так и стоимости работ в целом.

5. Анализ составленной карты показывает, что наиболее перспективными зонами проведения струйной цементации в г. Москве являются районы с вмещающими грунтами, представленными песками, супесями, суглинками с числом пластичности ниже 25 %, четвертичного отложения, расположенными на глубине от 2 до 15 м. Из рассмотренных районов к таким следует отнести Западный и Северо-Западный округ г. Москвы. В центральной части города представлены глинистые грунты юрского периода с числом пластичности выше 25 %, глубиной залегания кровли от 5 м и мощностью от 5 до 15 м, что является неблагоприятным фактором для проведения работ.

6. Результаты работы актуальны для городского строительства в г. Москве и в других городах со схожими горно-геологическими условиями, так как глинистые грунты относятся к осадочным горным породам и широко представлены по площади распространения и мощности.

7. Полученные на основе экспериментальных исследований результаты могут быть рекомендованы для применения на практике производства работ, при разработке проектов по струйной цементации глинистых грунтов.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах автора:**

Издания, рекомендованные ВАК Минобрнауки Российской Федерации:

1. **Засорин М.С.** Особенности «Jet grouting» в глинистых грунтах// Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - ОВ№9. - С. 346 - 350.
2. **Засорин М.С.** Исследование влияния физико-механических свойств глинистых грунтов на прочностные свойства грунтобетона// Горный информационно - аналитический бюллетень. - 2011. - №5. - С. 245 - 253.
3. **Засорин М.С.** Исследование технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов// Горный журнал. - 2011. - №8. - С. 80 - 82.

Подписано в печать.  
Объем 1 печ. л.

23 .12.2011г.  
Тираж 100 экз.

Формат 60x90/16  
Заказ № 1091

---

ОИУП Московского государственного горного университета  
Москва, Ленинский проспект, д. 6.

— 24 —