

№2, 2000

Исследование прочностных свойств грунтов, закрепленных цементными растворами по струйной технологии.

Некоторый опыт строительства на слабых грунтах

С.Г.Богов

1. Введение

Исследования по укреплению грунтов различными методами ведутся достаточно давно отечественными и зарубежными учеными (С.Д. Безрук, Л.М. Гончарова, Б.А. Ржаницын, П.А. Ребиндер, В.Е. Соколович, А.Н. Токин и др.). Первый опыт применения цементогрунта в фундаментостроении в нашей стране относится к середине 50^{-х} - началу 60^{-х} годов. Использование методов искусственного улучшения свойств грунтов позволило получить фактически новый строительный материал. В дорожном строительстве, технической мелиорации, и в фундаментостроении при буросмесительном способе устройства свай применялся цементогрунт с содержанием цемента до 20-25%. Новый этап использования цементогрунта начался в последние десятилетия в связи с развитием струйной технологии, при которой содержание цемента доходит до 50% и более.

Практически уже тридцать лет струйная технология широко применяется в ряде стран для решения различных геотехнических задач, возникающих как при новом строительстве так и реконструкции. За рубежом этот метод получил название High Pressure Injection (HPI), в нашей стране эта технология больше известна как струйная.

Усиление фундаментов зданий, устройство котлованов вблизи существующих зданий, устройство свай повышенной несущей способности, закрепление грунтов, создание противofильтрационных завес может быть решено с использованием струйной технологии. По струйной технологии могут выполняться как цилиндрические сваи, анкера, колонны закрепленного грунта диаметром до 5м, так и плоские горизонтальные и вертикальные элементы в грунте при подъеме монитора без вращения (панельные, щелевые).

При выполнении работ по струйному закреплению практически всех типов грунтов применяются та или иная из трех технологических схем устройства конструкций в грунтах:

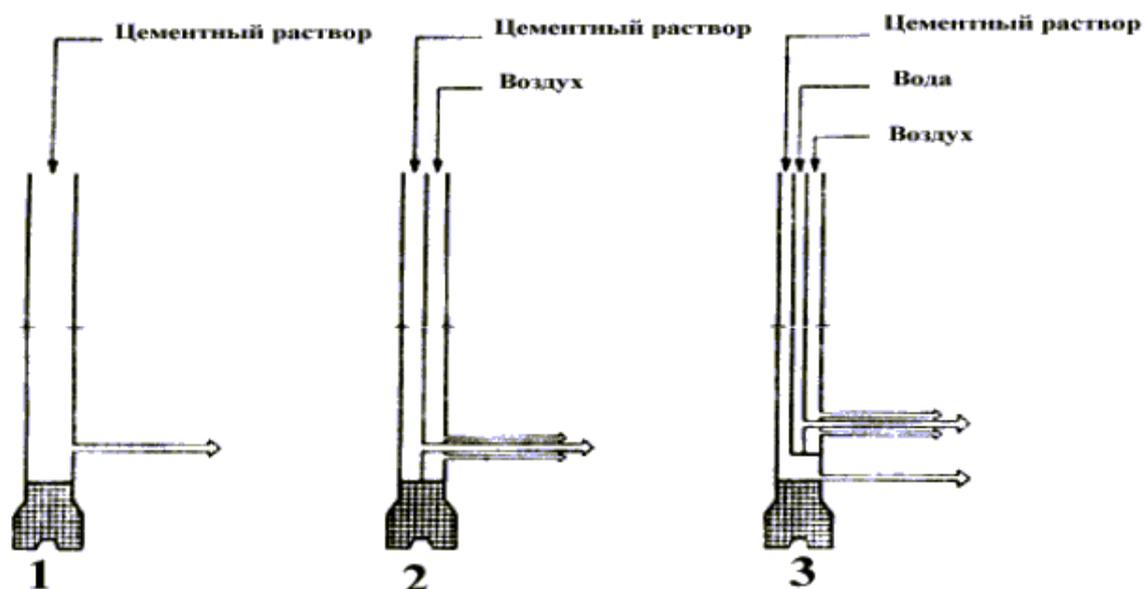


Рис. 1. 1-однокомпонентная технология; 2- двухкомпонентная технология;

3- трехкомпонентная технология.

- однокомпонентная, предусматривающая размыв грунта струей твердеющего раствора (цементного, глинистого, глиноцементного) давлением порядка 70 МПа;
- двухкомпонентная, в которой размыв грунта осуществляется струей твердеющего раствора под защитой струи воздуха;
- трехкомпонентная схема, заключающаяся в размыве грунта струей воды под защитой струи воздуха, и заполнение размывной полости твердеющим цементно-песчаным раствором.



Рис. 2. Реализация струйной технологии в Санкт-Петербурге. Устройство

противофильтрационной завесы вдоль подземного пространства на пл. Труда.

Перспективность струйной технологии закрепления грунтов заключается в возможности полной механизации работ, экологической чистоте, возможности ведения работ в стесненных условиях, сокращении сроков и конечной стоимости строительства. Нами разрабатывается комплексная методика модификации грунтов оснований посредством струйной технологии при реконструкции городской застройки Санкт-Петербурга (Пример работы установки показан на рис.2). Для успешного применения технологии необходимы, прежде всего, исследования свойств закрепленного грунта.

В исследованиях Л.М. Гончаровой [3], посвященных модификации грунтов отмечается, что продукты гидратации и гидролиза портландцементов, взаимодействуя с поверхностью минеральных частиц, коагулируют и агрегируют наиболее дисперсную его часть, в процессе роста и кристаллизации образуют прочную коагуляционную и кристаллизационную структуру цементогрунта. На основе анализа многочисленных работ по определению прочности цементогрунта при сжатии М.Т. Кострико (1950г.) принимая плотность грунта постоянной, установил зависимость:

$$R_{сж} = \frac{Ц \cdot R_{ц}}{B} \cdot k, \quad (1)$$

где $R_{ц}$ - предел прочности цементного камня при сжатии;

Ц- дозировка цемента; $R_{ц}$ - активность цемента; В- количество воды затворения;

к- коэффициент стабилизации, зависящий от гранулометрического состава грунта и изменяющийся в зависимости от содержания глинистых частиц (0,3 до 1,8). Качество получаемого модифицированного грунта зависит от свойств исходного грунта и от свойств инъецируемого цементного раствора. В.М.Безрук [1] отмечал, что формула (1) справедлива лишь при условии неизменности качественного состава и коллоидно-химического состояния тонкодисперсной части грунта.

Закрепление песчаных грунтов цементами производится достаточно хорошо. При закреплении цементами глинистых грунтов, насыщенных ионами Na^+ (с повышенным содержанием глинисто-колоидных частиц), обладающих гидрофильными свойствами, для получения материала с необходимыми прочностными свойствами требуется повышенный расход цемента.

На прочностные свойства цементогрунта существенное влияние оказывает прочность цемента. По данным А.Н. Адамовича (1967г.) исходная прочность цементного камня зависит от удельной поверхности цемента (рис.3).



Рис. 3. Зависимость прочности цементного камня от удельной поверхности цемента.

2. Лабораторные исследования закрепления пылеватых грунтов цементами

Хорошо известными преимуществами струйной технологии являются высокая прочность закрепленного грунта, достигаемая практически во всех типах грунтов, высокая производительность, минимальные динамические воздействия на конструкции здания.

Для закрепления песчаных грунтов хорошо зарекомендовала себя однокомпонентная технологическая схема, когда размыв грунта осуществляется цементным раствором. Для устройства цементогрунтовых конструкций в глинистых грунтах за рубежом применяют, как правило, трехкомпонентную схему. При трехкомпонентной технологии твердеющий цементно-песчаный раствор подается по специальному каналу монитора в предварительно размываемую скважину. При этом может быть произведено практически полное замещение природного грунта цементно-песчаным раствором. Трехкомпонентная технологическая схема существенно сложнее в техническом исполнении. Применение одно- или двух-компонентной технологий снижает возможность регулирования прочностных свойств цементогрунта в условиях пылеватых-глинистых грунтов, но не требует для реализации сложного оборудования (рис.1). В этом случае увеличение прочностных и деформационных характеристик получаемого материала возможно путем снижения водоцементного отношения цементного раствора, увеличения активности и дисперсности вяжущего материала и введением в раствор специальных химических добавок (рис.4). Для снижения интенсивности перехода частиц размываемого глинистого грунта в цементный раствор и повышения прочности цементного камня, могут применяться ингибирующие добавки, снижающие размокаемость и диспергирование глинистых грунтов в результате уменьшения поверхностной гидратации за счет замены катионов обменного комплекса на менее гидратирующие, уменьшения межплоскостной гидратации и др. В качестве ингибирующих добавок могут быть применены нейтральные соли одновалентных KCl, NaCl, двухвалентных CaSO₄, CaCl₂ и трехвалентных Al₂(SO₄)₃, AlCl₃ металлов или их силикаты, гидроокиси, а также кремнеорганические соединения. Широко применяемой ингибирующей добавкой является силикат натрия Na₂SiO₃.

В большинстве публикаций [2] по струйной технологии указывается что размыв проводится цементным раствором с В/Ц=0,9-1. Информация о применяемых химических добавках, как правило, отсутствует.

Проведенные нами исследования показывают, что введение специальных добавок в инъекционные цементные растворы повышают прочностные свойства цементного камня. Влияние химических добавок на прочностные свойства цементного камня определялось на

цементных растворах различных водоцементных соотношений с добавками: жидкого стекла Na_2SiO_3 , хлористого кальция CaCl_2 и суперпластификатора СЗ.

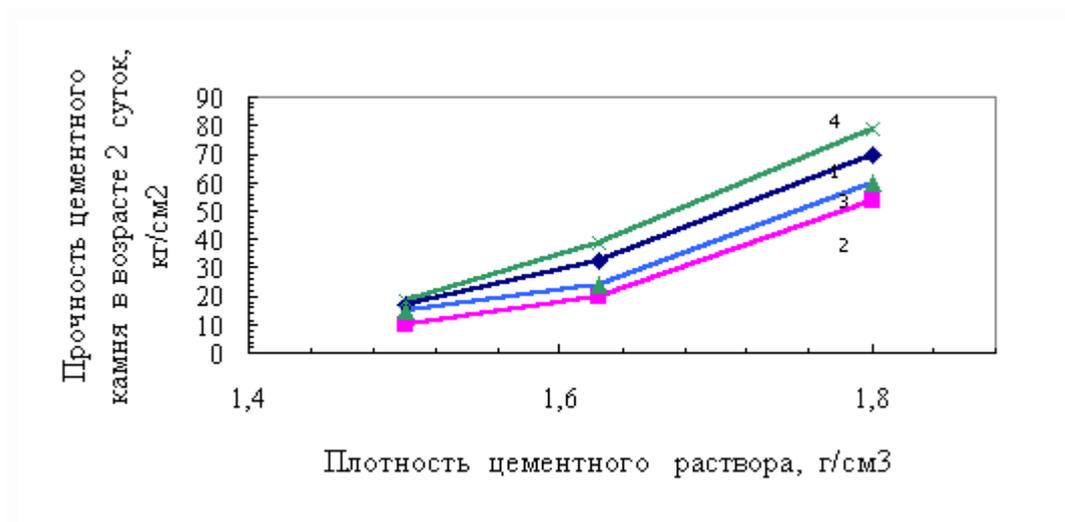


Рис.4. Прочность цементного камня в возрасте 2^х суток.

1-цементный раствор без добавок; 2-цементный раствор с добавкой Na_2SiO_3 ; 3-цементный раствор с комплексной добавкой $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{СЗ}$; 4-цементный раствор с добавкой CaCl_2 .

Типичные значения прочности, которые могут быть достигнуты в различных грунтах (МПа) [4,5] приведены в табл. №1. Эти данные получены для размывающего раствора на основе портландцемента М300-400.

Прочность грунтов закрепленных по струйной технологии цементными растворами.

Таблица 1

№№ п.п	Наименование грунтов	Сопротивление сжатию R закрепленного грунта, МПа	Сопротивление растяжению R _p закрепленного грунта, МПа
1	Гравий, песок	6-12	0,75-2,5
2	Супеси	3-9	0,5-2
3	Суглинки	1,5-5	0,2-1,25
4	Глина	2-10	-----
5	Грунты с растительными остатками	0,1-3,0	-----

Для исследования физико-механических свойств пылевато-глинистых грунтов закрепленных

по струйной технологии цементным раствором, потребуется большой объем экспериментальных работ, как в лабораторных, так и натуральных условиях.

3. Результаты лабораторных исследований по закреплению пылевато-глинистых грунтов

Лабораторные исследования проводились на грунтах северо-западного региона, в СПбГАСУ. В качестве вяжущего применялся портландцемент М400 Пикалевского объединения "Глинозем", характеристики которого приведены в таблице №2.

Таблица 2

Характеристики цемента

Наименование цемента	Плотность цемента, г/см ³	Насыпной объемный вес, кг/м ³	Сроки схватывания, ч		Кол-во цемента прошедшего через сито 0,08, %	Удельная поверхность см ² /г	Нормальная густота, %
			Начало	Конец			
Портландцемент М400	2,97	1180	3,1	7	87	24000-26000	28,5

Минералогический состав использованного цемента: C_3S - 64%; C_2S - 17%; C_3A - 4%; C_4AF - 1,1%.

Прочность при сжатии цементогрунта, полученного в результате твердения приготовленных композиций, определялась испытанием образцов-кубиков. Образцы цементогрунта изготавливались в соответствии с ГОСТ в инвентарных металлических формах размером 7,07x7,07x7,07см, 4x4x4см и 3x3x3см. Кубики формовались методом литья, извлекались из форм на вторые сутки после формования и хранились до испытания в эксикаторе во влажном песке.

3.1 Закрепление суглинков.

Исходный грунт представлял собой пылеватый суглинок с содержанием глинистых частиц - 14,8 %, пылеватых частиц - 65,2 %, песчаных частиц - 20 %. Количество крупнозернистых включений составляло 0,17 %.

В перемешанную смесь (табл.3) добавлялось расчетное количество воды, соответствующее заданному водотвердому отношению Вода:(Цемент+Грунт). Прочностные характеристики определялись по стандартным методикам в возрасте 7 и 28 суток.

Таблица 3

Соотношение цемента и грунта в цементогрунтовой смеси

Номер состава	Состав, %.	
	Цемент	Грунт

1	2	3
1	75	25
2	65	35
3	50	50
4	40	60
5	30	70
6	15	85

Методика изготовления смесей состояла в следующем. К пылеватому суглинку с влажностью 20 % добавлялось требуемое количество цемента в виде цементно-водной суспензии с ВЦ=0,9. Полученная масса перемешивалась до однородного состояния. Далее определялась консистенция пасты с помощью вискозиметра Суттарда, после чего производилось формование образцов. Образцы I серии были получены из смеси разной консистенции. При изготовлении II, III и IV серий консистенция цементогрунтовых смесей внутри каждой серии оставалась постоянной, регулировалась до заданной величины с помощью воды затворения (по распылу на вискозиметре Суттарда). При этом фиксировался расход воды (В) для приготовления массы каждого состава. В таблице №4 приведены характеристики водных цементогрунтовых смесей. Расход воды в данном случае выражается водотвердым отношением (В/Т).

Характеристики исследованных цементогрунтовых смесей

Таблица 4

Номер состава	I серия		II серия		III серия		IV серия	
	В/Т	Распыл по конусу, мм	В/Т	Распыл по конусу, мм	В/Т	Распыл по конусу, мм	В/Т	Распыл по конусу, мм
1	0,30	50	0,35	75-80	0,44	95-100	0,48	108-110
2	0,41	55	0,43	75-80	0,47	95-100	0,50	108-110
3	0,48	70	0,49	75-80	0,55	95-100	0,58	108-110
4	0,55	100	0,51	75-80	0,59	95-100	0,64	108-110
5	0,66	118	0,53	75-80	0,67	95-100	0,66	108-110
6	0,72	125	0,60	75-80	0,68	95-100	0,68	108-110

Результаты испытания опытных образцов на сжатие в возрасте 7 и 28 суток приведены в таблице 5 и рис.3.

Таблица 5

--	--

Номер состава	Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте							
	I серия		II серия		III серия		IV серия	
	7 сут.	28 сут.	7 сут.	28 сут.	7 сут.	28 сут.	7 сут.	28 сут.
1	4,5	7,6	16,4	30,0	12,7	18,5	10,0	16,7
2	4,6	6,7	11,4	18,4	8,1	12,6	7,3	12,2
3	3,5	5,8	5,1	9,0	4,2	7,6	3,7	5,9
4	2,6	5,4	4,4	5,7	2,8	5,3	1,6	4,1
5	2,6	4,6	2,3	4,1	1,3	2,5	1,0	1,8
6	1,2	1,8	0,5	0,8	0,4	0,7	0,3	0,4

Основными факторами, от которых зависит прочность получаемого цементогрунтового камня, являются содержание цемента в композиции "цемент - грунт" и водотвердое отношение в смеси. Прочность повышается при увеличении содержания цемента в цементогрунтовой композиции и при снижении водотвердого отношения в смеси. Такой важный параметр, как водоцементное отношение раствора в реальных условиях производства работ по закреплению грунтов с использованием одно или двухкомпонентной струйной технологии пока трудно использовать: из-за невозможности определения количества воды связываемой суглинком, трудно установить реальные значения В/Ц в смеси. Важно отметить, что изменение значений В/Ц в разных составах имеет такую же закономерность, как и изменение значений В/Т.

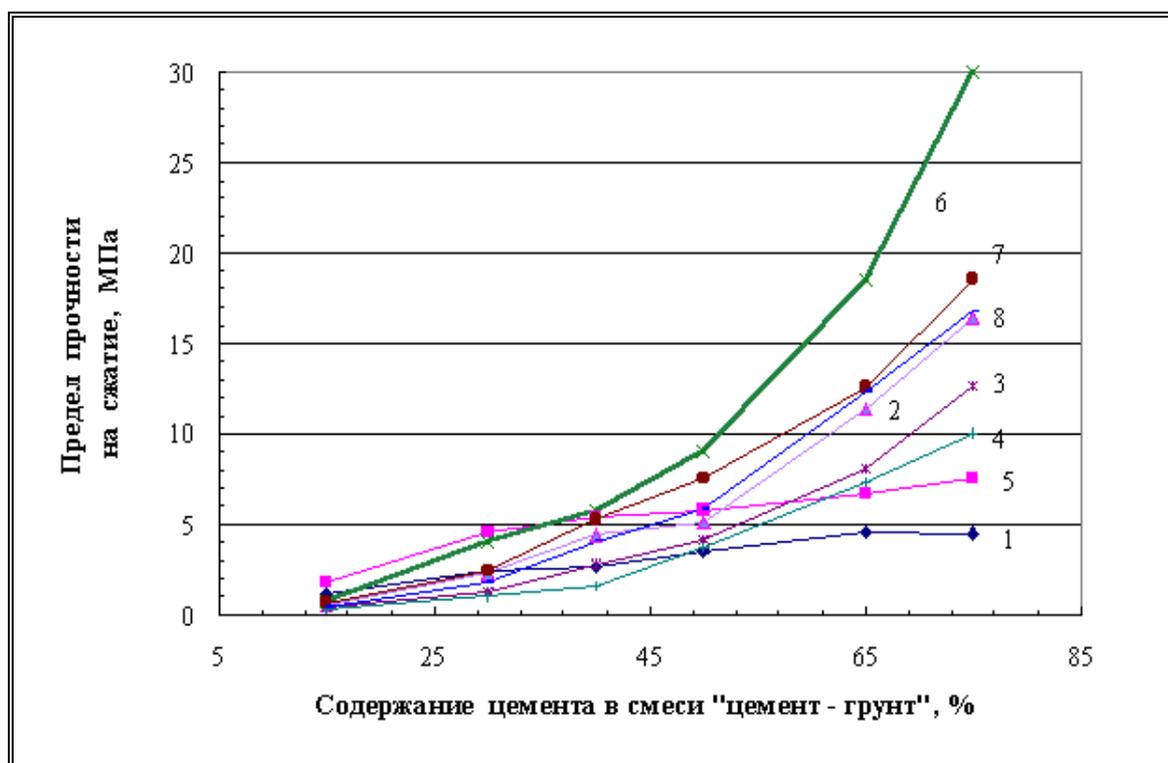


Рис.5. Зависимость предела прочности при сжатии образцов цементогрунта от содержания в них цемента. 1- прочность образцов I серии в возрасте 7суток; 2- прочность образцов II серии в возрасте 7суток; 3- прочность образцов III серии в

возрасте 7суток; 4- прочность образцов IV серии в возрасте 7суток; 5- прочность образцов I серии в возрасте 28суток; 6- прочность образцов II серии в возрасте 28суток; 7- прочность образцов III серии в возрасте 28суток; 8- прочность образцов IV серии в возрасте 28суток.

При устройстве свай в обводненных пылевато-глинистых грунтах для получения гарантированной прочности материала потребуется повышенный расход цемента. В таких случаях должны применяться цементные растворы, имеющие низкие В/Ц. В рамках данных исследований не учитывался тот факт, что в процессе размыва грунта в скважине происходит постоянный процесс разрушения и выноса размывого и перемешенного грунта с цементным раствором.

3.2 Влияние содержания песчаных частиц в пылевато-глинистых грунтах на их закрепление

В пылеватый суглинок было добавлено 5, 15 и 25 % песка с размером зерен менее 1,5 мм. Таким образом, искусственно были приготовлены грунты с разным содержанием песчаных фракций (табл.№6).

Таблица 6

Номер искусственной смеси	Содержание фракций, %		
	Глинистых	Пылеватых	Песчаных
1	14,06	61,94	24,0
2	12,58	55,42	32,0
3	10,10	48,90	41,0

Цементогрунтовые смеси характеризовались распływом 75-80 мм. Контрольными для данных образцов являлись образцы 3 состава II серии. Результаты испытания образцов в возрасте 7 суток приведены в таблице 8.

Таблица 7

Добавка песка к суглинку, %	Водотвердое отношение в пасте	Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте 7 сут.
5	0,51	6,1
15	0,48	9,0
25	0,45	10,4

Сравнивая полученные результаты табл.№ 7с полученными результатами прочности цементогрунта в таблице № 6, виден почти двукратный прирост прочности для грунтов с добавлением песчаных частиц. Следовательно, при устройстве свай с использованием растворов с теми же В/Ц, но в супесчаных и песчаных грунтах, прочность цементогрунта может быть существенно выше.

Для использования цементопесчаных растворов в качестве размывающего и заполняющего материала были проведены работы по дезинтеграторной обработке цементопесчаных смесей (табл.№8). Сравнительные испытания цементопесчаных смесей проводились на лабораторной дезинтеграторной установке ДЕЗИ-11 со скоростью 100с^{-1} . Сравнение показателей производилось при одинаковой растекаемости раствора. Лабораторный дезинтегратор ДЕЗИ-11 имеет следующую техническую характеристику: плавно регулируемая скорость ударов- 10-200м/с; производительность- 1,0-3кг/час; наибольшая величина частиц продукта 2мм.

Таблица 8

Влияние дезинтеграторной обработки цементных и цементопесчаных
растворов на их прочностные свойства

№№ п.п	Исходный состав	Режим обработки исходного состава	Параметры смеси				Прочность в возрасте 14 суток, МПа	
			В/Ц	Растекаемость по конусу АзНИИ, см	Отстой, мм	Стабиль- ность, г/см ³	На одноосное сжатие	На изгиб
1	Портланд- цемент М400	-----	0,5	15	3	0,2	17,0	6,0
2	Портланд- цемент М400	Дезинтегратор 100с^{-1}	0,6	14	1	0,05	23,0	8,0
3	Портланд- цемент М400 + Песок (1:1)	Дезинтегратор 100с^{-1}	0,65	14	1,5	0,1	24,1	8,5
4	Портланд- цемент М400 + Песок (1:2)	Дезинтегратор 100с^{-1}	0,7	14	1,5	0,1	25,0	9,0
5	Портланд- цемент М400 + Песок (1:3)	Дезинтегратор 100с^{-1}	0,75	14	1,5	0,1	23,0	8,0

4. Исследование прочностных свойств цементогрунта в натуральных условиях

На площадке по адресу: Рижский пр., д.6 с помощью струйной технологии были устроены цементогрунтовые сваи. Сваи были испытаны статической вдавливающей по ГОСТ 5686-94 [7] и был проведен комплекс работ по определению прочности сформированного цементогрунтового материала. На данной площадке размыву подвергался водонасыщенный пылеватый песок в интервале глубин -2-5м от дневной поверхности. Пылеватый песок размывался по двухкомпонентной технологической схеме струей цементного раствора с добавкой суперпластификатора СЗ. Прочность цементогрунта изготовленных свай определялась отбором смеси из размытой скважины с глубины 2,5-3м герметически закрываемым батометром в инвентарные металлические формы размером 7,07x7,07x7,07см. В таблице №9 и №10 приведены значения прочности цементного камня исходного раствора и

прочность полученного цементогрунтового материала.

Таблица 9

Прочность цементного камня исходного раствора на опытной площадке Рижский пр.д.6

№ образца	Прочность цементного камня на одноосное сжатие в возрасте 28сут, МПа	Усадка, %	В/Ц раствора
1	16	15	0,8-0,9
2	18	13	0,8-0,9
3	18,9	6,6	0,8-0,9
4	19,1	7	0,8-0,9
5	18,3	13	0,8-0,9

Таблица 10

Прочность цементогрунтового материала свай на опытной площадке Рижский пр.д.6

№ образца	Средняя прочность серий образцов на одноосное сжатие, МПа	Усадка, %	Распływ смеси по конусу Сутгарда, мм
1	8,8	6	105
2	8,3	5	95
3	6,9	11,4	100
4	7,1	8,5	95

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Высокое значение В/Т исходной цементогрунтовой смеси препятствует получению требуемой прочности камня даже при высоком расходе цемента. В то же время уменьшение воды затворения в исходном цементном растворе обеспечивает существенный прирост прочности получаемого цементогрунтового камня.
2. Прочность цементогрунтового материала в возрасте 28 суток, равная 10 МПа, может быть достигнута при содержании цемента (для суглинистого грунта) в количестве не менее 50-55 % и начальном содержании воды в твердеющей смеси в количестве не более 50 %.
3. При устройстве конструкций по одно- и двухкомпонентной технологическим схемам наиболее высокими прочностными характеристиками будет обладать цементогрунтовый материал с исходным содержанием песчаных частиц не менее 25%.

Литература:

1. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов цеменами. М.: Автостройиздат, 1956. 241с.
2. Бройд И.И. Струйная технология строительства подземных сооружений. Современное состояние и направления развития. // ВНИИТПИ. Обз. инф. Арх-ра и стр-во. Вып. №2. Тех-ия, механи-зация и автоматизация в строительстве. М. 1995. 69 с.
3. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов (техническая мелиорация). М.: Моск. ун-т. 1973. 373с., ил.
4. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М.: Стройиздат, 1989. 136 с.
5. Рекомендации по струйной технологии сооружения противодиффузионных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов. ВНИИОСП, М. 1989. 89 с.
6. Токин А.Н. Фундаменты из цементогрунта. М.: Стройиздат. 1984. 184 с.
7. Улицкий В.М., Богов С.Г. Комплексное использование струйной технологии для целей реконструкции на слабых грунтах. Реконструкция Санкт-Петербурга - 2005. Материалы 3го международного симпозиума 16-20 мая 1994.