

УКРЕПЛЕНИЕ СЛАБЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ НАСЫПИ

Лебешев И.М., ГИП ОАО «ГИПРОТРАНСМОСТ»,
Львович Ю.М. зав.лабораторией ФГУП СОЮЗДОРНИИ,
Малинин А.Г., технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой»,
Фельдман А.П., начальник Мостоотряда №123 ЗАО «Уралмостострой»

В статье рассмотрены вопросы проектирования и производства работ по струйной цементации пластичных глин при строительстве подходов к путепроводу.

В 2005 году в Перми закончено строительство первой очереди нового мостового перехода через р.Кама. Правобережный подход к мосту на ПК-135 пересекает подъездные железнодорожные пути одного из пермских предприятий. Проектным институтом «ГИПРОТРАНСМОСТ» (Москва) было принято решение пересечь железную дорогу путепроводом, расположенным на шести опорах.

Площадка строительства в зоне подходной насыпи к опорам №1 и №6 (устоям) по материалам геологических изысканий сложена следующими грунтами:

Основным несущим слоем для устройства фундаментов опор путепровода является слой глины аргиллитоподобной палеогенового периода твердой консистенции, кровля которой расположена на глубине 16-18 м.

Твердые глины покрывает слой гравия мощностью 1-3 м, выше которого залегают аллювиальные глины от мягкопластичной до текучей консистенции мощностью 10 -12 м.

Таким образом, сложилась ситуация, при которой свайные фундаменты опор путепровода опираются на устойчивые грунты, а подходная насыпь, высота которой достигает 10,5 м, - на неустойчивые глины текучей консистенции. В этом случае на контакте насыпи с конструкциями путепровода неизбежно возникла бы разность осадок, которая могла привести к деформированию переходных плит устоев, разгерметизации деформационных швов и разрушению дорожной одежды.

Институтом ГИПРОТРАНСМОСТ было принято решение о предотвращении осадок насыпи за счет повышения деформативных и прочностных свойств слабых грунтов в ее основании. В качестве технологии укрепления грунтов была выбрана технология струйной цементации грунтов.

Проектирование и выполнение работ было поручено предприятию ЗАО «ИнжПроектСтрой», обладающему опытом применения этой технологии при решении различных задач подземного строительства.

Сущность технического решения.

Технология струйной цементации грунтов заключается в разрушении и одновременном перемешивании грунта струей цементного раствора, выходящей из монитора, установленного на нижнем конце буровой колонны.

Цементация грунта выполняется в два этапа. На первом этапе бурят скважину до проектной отметки низа грунтоцементных свай. На втором этапе в процессе подъема и одновременного вращения буровой колонны производят размыв (разрушение) грунта струей цементного раствора под давлением 400-500 атм. В результате в грунте формируется грунтоцементная свая. Диаметр колонн в зависимости от типа грунта и выбранного режима струйной цементации составляет от 0,6 до 2,0 м. После твердения грунтоцемента его прочность на сжатие в глинистых грунтах составляет 0,5-4,0 МПа, а в песчаных грунтах – до 20 МПа [1,2].

2. Расчет и проектирование.

Расчет устойчивости и осадки насыпей на слабых основаниях с использованием в слабой толще свайных элементов из цементогрунта был выполнен Институтом СОЮЗДОРНИИ (Москва).

Расчёты выполнены для однокомпонентной технологии Jet1 и двухкомпонентной технологии Jet2 (с дополнительным применением сжатого воздуха) с параметрами, приведенными в табл.1.

Таблица 1.

Параметры	Jet1	Jet2
Диаметр сваи (колонны), мм	600	1200
Давление подачи цементного раствора, атм.	450	450
Диаметр форсунок	Ø2,2 мм	Ø3,0 мм
Время подъема монитора на ступень 4 см	6 сек	10-15 сек
расход цемента, кг/м ³	800	900
Параметры подачи сжатого воздуха	Не используется	7÷8 л/мин при давлении 7 атм.

Методика расчета, разработанная специалистами СОЮЗДОРНИИ, включала три типа расчетов, а именно, расчет общей устойчивости насыпи, расчет стабильности основания насыпи и расчет величины осадки насыпи.

Расчеты были выполнены с помощью разработанной в СОЮЗДОРНИИ компьютерной программы «Расчёт дорожных грунтовых сооружений».

Все расчеты выполняли в сравнении двух вариантов – без учета свайных элементов и с устройством свайных элементов в слабой толще при различных параметрах свай, таких как диаметр свай, межсвайное расстояние и прочность на сжатие материала свай.

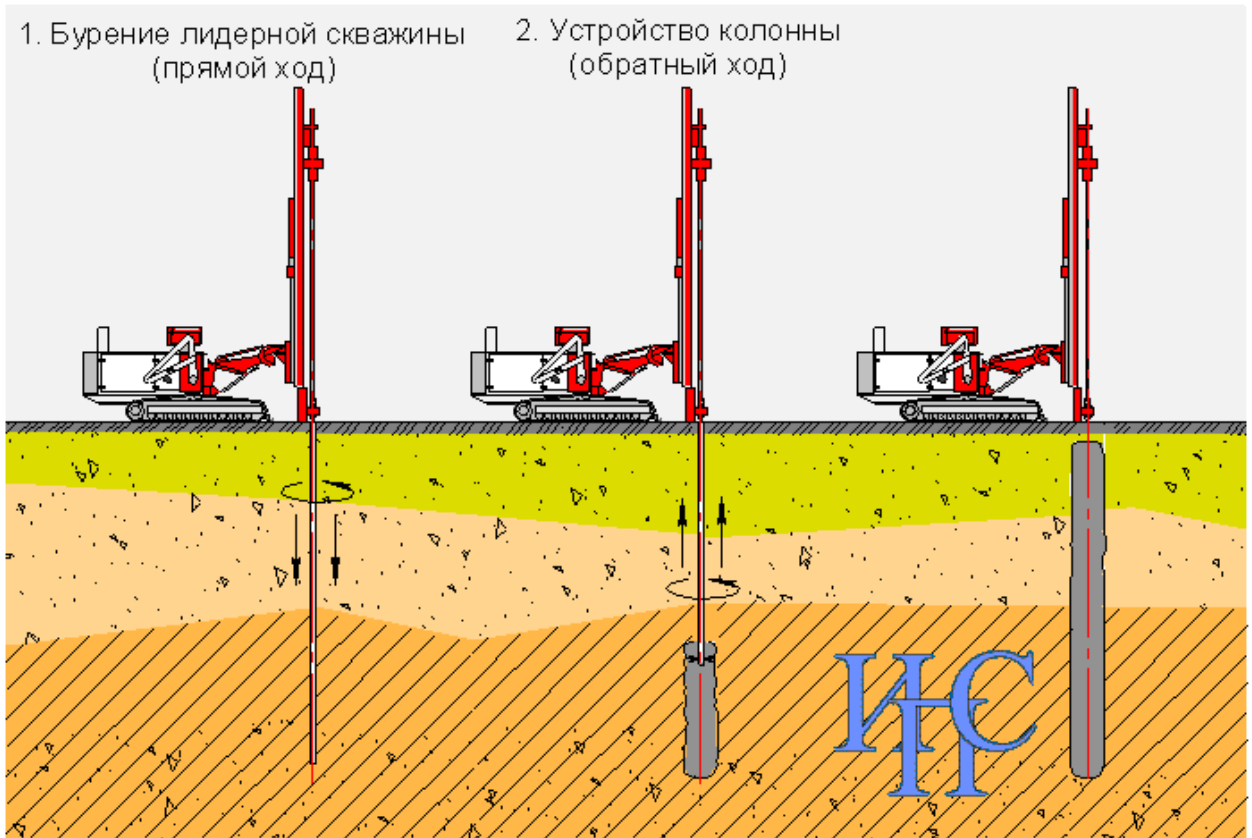


Рис.1. Схема производства грунтоцементных колонн

В соответствии с материалами изысканий, представленными Институтом ГИПРОТРАСМОСТ, инженерно-геологические условия в зоне подходной насыпи высотой 10,5 м характеризуются наличием с поверхности земли насыпного грунта (ИГЭ-1) средней мощностью 4,0 м (рис.2). Ниже по разрезу располагаются аллювиальные глины текучепластичной консистенции (ИГЭ-2) мощностью 2,2 м. Далее залегают аллювиальные глины мягкопластичной консистенции (ИГЭ-7) мощностью до 7,4 м и гравийный грунт (ИГЭ-12) мощностью 2,8-3,4 м с песчаным заполнителем до 20%. Толща коренных пород представлена аргиллитоподобными глинами палеогенового периода твёрдой консистенции (ИГЭ-13).

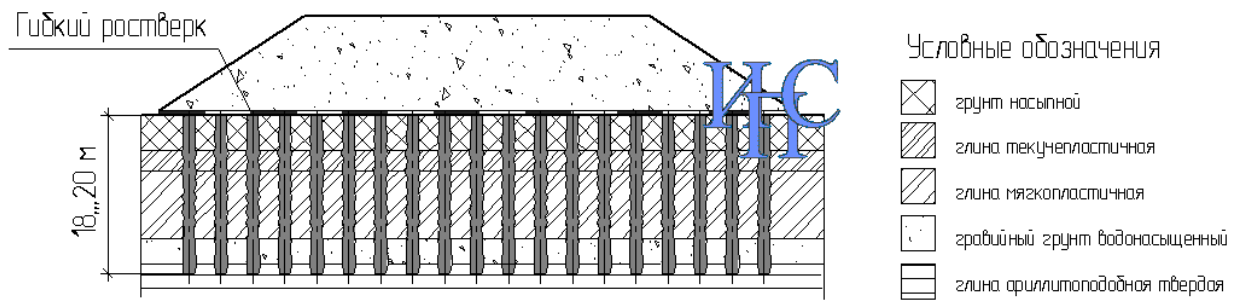


Рис.2. Схема укрепления основания насыпи

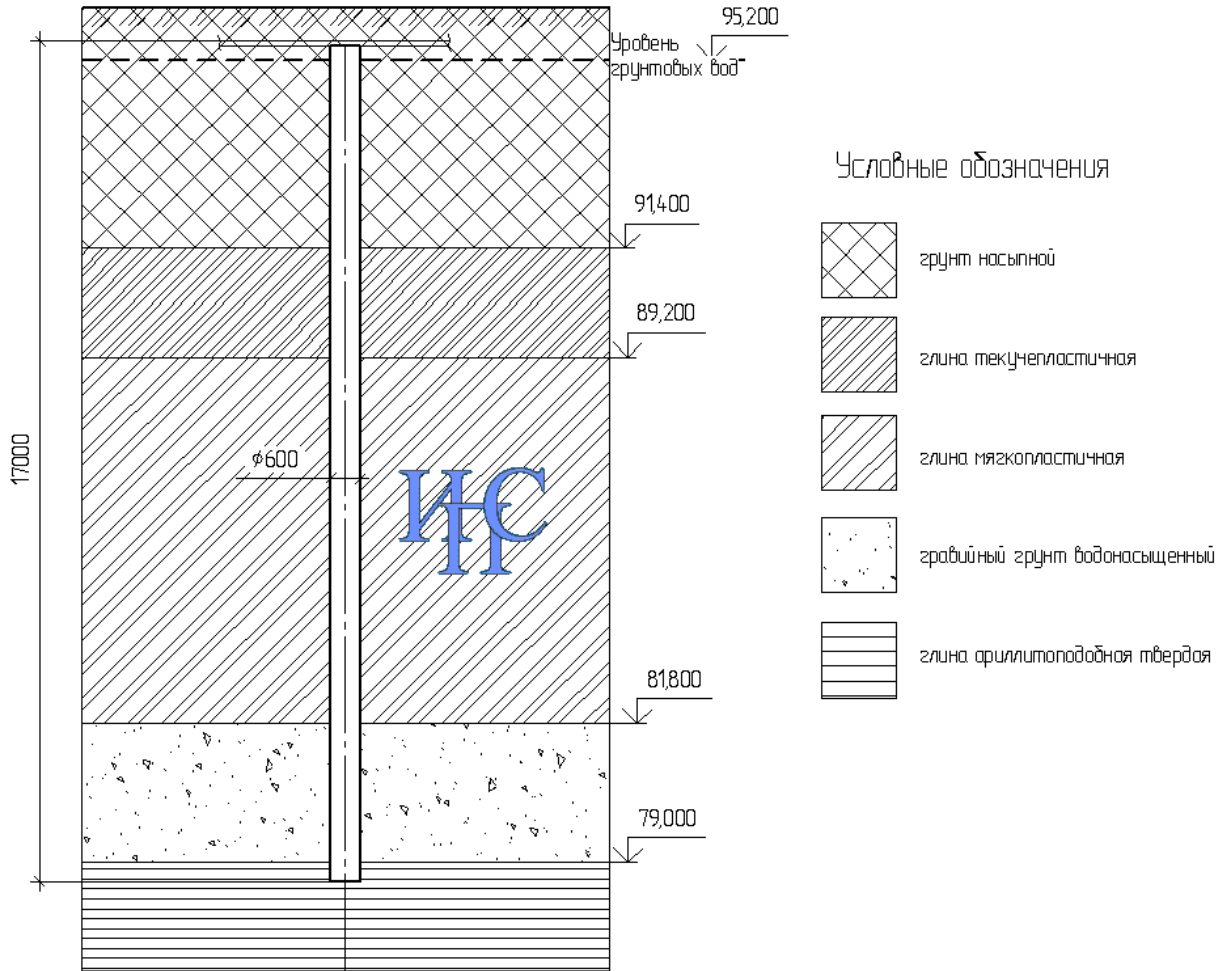


Рис.2-1. Схема укрепления основания насыпи

Уровень грунтовых вод располагается на глубине 0,2 м от поверхности. Расчётные характеристики грунтов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

ИГЭ	Наименование грунта по ГОСТ-25100-95	Плотность грунта, т/м ³	Угол внутреннего трения, Градус	Сцепление, т/м ²	Модуль общей деформации, т/м ²
1	Насыпной грунт	1,75	25	0,5	800
7	Глина мягкопластичная	1,71	4	0,4	641
8	Глина текучепластичная	1,80	4	0,2	262
12	Гравийный грунт	1,51	27	0,1	3000
13	Глина аргиллитоподобная	1,95	17	1,3	1400

Подходная к путепроводу насыпь высотой 10,5 м имеет трапецеидальную форму сечения с шириной насыпи поверху 38 м и откосы с заложением 1:1,5. Транспортная нагрузка принята 3,0 т/кв.м.

На первом этапе расчетов для определения общей устойчивости насыпи применяли метод моментов для круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС). Расчётная схема соответствовала механизму обрушения со срезом и вращением при прохождении кривой скольжения в слабой толще.

В качестве механизма определения минимального коэффициента устойчивости откоса насыпи был использован метод перебора вариантов расположения поверхностей скольжения в теле откоса насыпи с заходом в слабое основание, который отличается от классической методики нахождения критической поверхности скольжения, принятой для метода КЦПС.

В случае необходимости алгоритм расчётов предусматривает армирование слабого основания сваями и изменение грунтовых характеристик массива слабых грунтов при прохождении КЦПС через зону расположения свай. Если до подхода к этой зоне и после прохождения через неё используются прочностные характеристики j и C соответствующего слоя грунта основания, то непосредственно в указанной зоне используются j_k и C_k . Эти значения рассчитываются как интегральные значения, исходя из характеристик прочности на сдвиг грунта и материала свай с учетом относительной площади свай и грунта в рассматриваемой зоне. Таким образом, предполагается, что зона расположения свай заполнена некоторым композитным материалом. Естественно, что в подобной ситуации j_k и C_k в значительной степени определяются диаметром свай, расстоянием между сваями и прочностью материала свай, что позволяет выбрать такие параметры свайного поля, при которых устойчивость насыпи считается обеспеченной.

Прочностные характеристики нового композиционного материала «грунтоцементная свая - грунт» оценивали путем осреднения прочностных характеристик грунта основания и материала сваи в соответствии с площадью, занимаемой тем или иным элементом композиционного материала. Так, при расположении свай в шахматном порядке выполняли осреднение характеристик в области треугольника, образованного линиями, соединяющими центры ближайших свай. При этом осредненное сцепление композиционного материала рассчитывали как

$$C_{cp} = \frac{C_{грунта} F_{грунта} + C_{сваи} F_{сваи}}{F_{грунта} + F_{сваи}},$$

где общая площадь треугольника будет равна сумме площадей занимаемых грунтом основания и сваями

$$F_{треугольника} = F_{грунта} + F_{сваи}$$

Аналогично находили значение осредненной величины угла внутреннего трения.

Результаты расчёта общей устойчивости насыпи показали, что насыпь, устроенная на слабом основании имеет коэффициент устойчивости $K_y = 0,38$. Как видно, устойчивость насыпи при данном строении основания не обеспечена, что свидетельствует о необходимости специальных мероприятий для повышения устойчивости насыпи. В качестве такого мероприятия было выбрано устройство свайного поля из грунтоцементных свай по технологии струйной цементации с прочностью грунтоцемента на сжатие 200-250 т/м² и диаметром 0,6 или 1,2 м. Проведенные расчёты свидетельствуют, что для свай с прочностью 200 т/м² требуемый $K_y = 1,3$ обеспечивается при диаметре свай 0,6 м при межсвайном расстоянии свай 6,0 м, а при диаметре свай 1,2 м – при межсвайном расстоянии свай 8,0 м (табл.3).

Таблица 3.

Результаты расчётов общей устойчивости насыпи по методу КЦПС

Тип струйной цементации	Диаметр свай, мм	Требуемая прочность свай, т/м ²	Межсвайное расстояние между сваями, м
Jet 1	600	200	6,0
Jet 2	1200	200	8,0

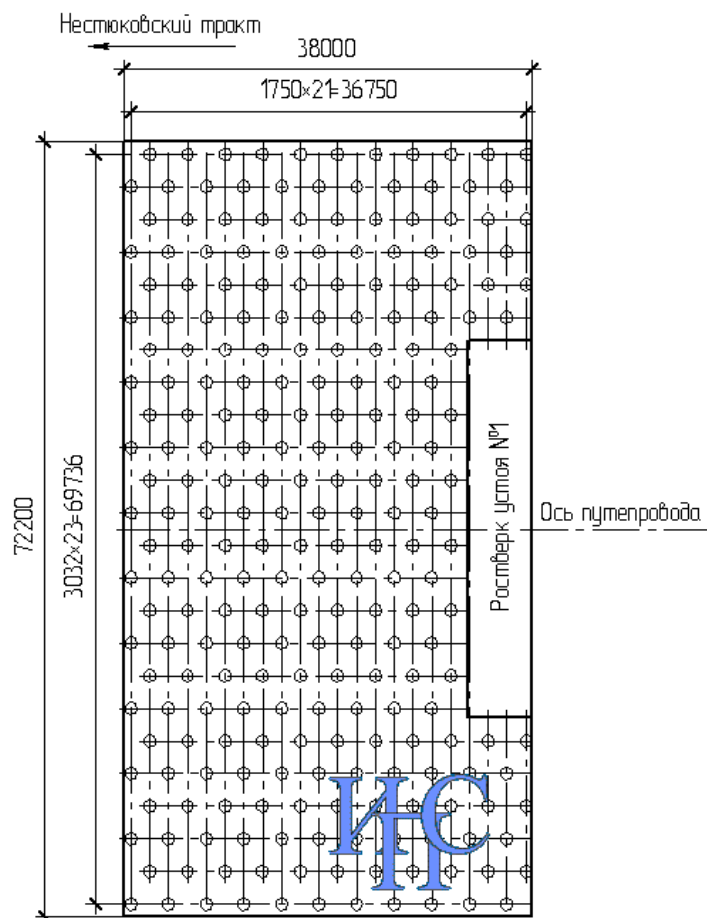


Рис.3. План расположения грунтоцементных колонн

Второй этап расчётов предусматривал оценку стабильности основания насыпи по методу СОЮЗДОРНИИ. Как показали расчёты, без дополнительных мероприятий минимальный коэффициент стабильности грунтов основания составил $K_{cm} = 0,12$ при допустимом $K_{cm} = 0,49$, что свидетельствует о необходимости проведения специальных мероприятий (устройство свайного поля) для повышения стабильности основания насыпи. Проведённые расчёты (табл.3) свидетельствуют, что для свай с прочностью 200 т/м^2 требуемый K_{cm} обеспечивается при диаметре свай 0,6 м при межсвайном расстоянии свай 3,0 м, а при диаметре свай 1,2 м межсвайное расстояние должно составлять 4,0 м.

Таблица 3

Результаты оценки устойчивости (стабильности) грунтов основания насыпи

Тип струйной цементации	Диаметр свай, мм	Требуемая прочность материала свай, т/м^2	Межсвайное расстояние между сваями, м
Jet 1	600	200	3,0
Jet 2	1200	200	4,0



Фото 1. Производство работ по струйной цементации грунтов

Третий этап расчетов был посвящен определению осадки насыпи.

При расчёте осадки насыпи учитывалось требование, что ожидаемая осадка поверхности насыпи не должна превышать 2 см. Для этого в основании насыпи предусматривалось устройство гибкой ростверка, который обеспечивает равномерное распределение нагрузки от насыпи

между сваями и грунтом основания. В процессе расчёта производили корректировку межсваяного расстояния, исходя из нагрузки на сваю и ее несущей способности. Одновременно производили подбор материала гибкого ростверка, обеспечивающего заданную величину осадки 2,0 см.

Осадку межсваяного пространства рассчитывали исходя из теории сводообразования проф. В.Д.Козарновского. Алгоритм компьютерной программы разработан специалистами СОЮЗДОНИИ.

Для расчета осадки насыпи и подбора типа гибкого ростверка первоначально оценивали давление грунта на основание в межсваяном пространстве с учётом возникающего в высоких насыпях арочного эффекта. Геометрические параметры свода определяли в соответствии с теорией Кемпферта в зависимости высоты насыпи, диаметра свай D , межсваяного расстояния L и угла внутреннего трения грунта насыпи.

Затем определяется давление грунта насыпи в межсваяном пространстве $s_{МП}$ и противодействие слабой толщи $R_{СТ} = \frac{\Delta \cdot E_0}{H}$,

где Δ – осадка насыпи, E_0 – модуль деформации слабого грунта, H – мощность слабой толщи.

Суммарное силовое воздействие на гибкий ростверк в этом случае определяется, как $F_{сум} = s_{МП} - R_{СТ}$, а с учётом коэффициента поправки на приближённость формул $F_{сум} = 1.3 \cdot s_{МП} - \frac{R_{СТ}}{1.3}$.

Силовое воздействие на ростверк должно полностью компенсироваться за счёт его упругой деформации $F_{сум} = l \cdot G$, где $\lambda = \Delta/l$ – относительная деформация гибкого ростверка, l – длина деформирующейся части гибкого ростверка в межсваяном пространстве, G – модуль упругости материала гибкого ростверка.

После преобразования получим в окончательном виде $G = \frac{(1.3 \cdot s_{МП} - R_{СТ} / 1.3)}{2 \cdot \Delta} \cdot (L - D)$.

В соответствии с расчетной величиной модуля упругости материала гибкого ростверка выбирали его марку, дополнительно оценивая его прочность и величину относительного удлинения.

В результате расчетов, выполненных в соответствии с вышеприведенной методикой, установлено, что полная осадка без специальных мероприятий по усилению грунтов основания может составить 74,06 см.

Так как максимально допустимая осадка насыпи не может быть более 2,0 см, в дальнейшем были выполнены несколько вариантов расчета осадки насыпи с дополнительным устройством гибкого ростверка из одного слоя материала FORTRAG 400/50-50А.

Результаты расчётов для различных типов струйной технологии, диаметра свай и межсваяного расстояния, обеспечивающих безопасную осадку насыпи, приведены в табл. 4.

Результаты оценки осадки насыпи

Тип Струйной технологии	Диаметр свай, мм	Требуемая прочность свай, т/м ²	Межсвайное расстояние между сваями, м	Допустимая величина осадки насыпи, см
Jet 1	600	200	2,0	2
Jet 1	600	250	2,1	2
Jet 2	1200	200	3,5	2
Jet 2	1200	250	3,75	2



Фото 2. Внешний вид грунтоцементной колонны

Сравнение всех трех вариантов расчета показывает (табл.2-4), что наиболее важным и ответственным является расчет на допустимую осадку поверхности насыпи, так как при всех равных параметрах свай (диаметр, прочность) межсвайное расстояние в этом варианте принимает минимальное значение.

Учитывая опыт применения струйной цементации в аналогичных геологических условиях, было принято решение, что в текучепластичных глинах гарантированная прочность грунтоцемента составит не более 200 т/м².

В этом случае к окончательному выбору было предложено два варианта – сваи диаметром 600 мм, устраиваемые по однокомпонентной технологии Jet1 с шагом 2,0 м и сваи диаметром 1200 мм, устраиваемые по двухкомпонентной технологии Jet2 с шагом 3,5 м.

Для выбора окончательного варианта было выполнено сопоставление общего количества скважин и расход цемента на укрепление 1000 м² основания насыпи. Расчеты приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Вариант	Диаметр свай, м	Межосевое расстояние, м	Объем свай на 1 п.м. скважины, м ³	Количество скважин на 1000 м ² площади основания, Шт.	Средний расход цемента на 1 м ³ грунтового массива, кг
Jet 1	0,6	2,0	0,28	289	72,8
Jet 2	1,2	3,5	1,13	94	95,9

Сопоставление вариантов показывает, что в случае применения технологии Jet2 при укреплении 1 м³ грунтового массива требуется цемента приблизительно на 32% больше, чем по технологии Jet1, однако при этом количество скважин будет в 3 раза меньше, чем при технологии Jet1. Последнее обстоятельство сыграло решающую роль – был выбран тип двухкомпонентной струйной цементации Jet2.



Фото 3. Строительство путепровода завершено

3.Производство работ.

Работы по струйной цементации были выполнены предприятием ЗАО «ИнжПроектСтрой».

Технологический комплекс включал буровую установку RAPTOR TWS1400 с высотой мачты 18 м, цементировочный насос TW315, развивающий давление до 500 атм. и миксерную станцию TWM20

производительностью приготовления раствора 20 м^3 в час. Все технологическое оборудование произведено в фирме TECNIWELL (Италия).

Цемент на площадку доставляли автоцементовозами и перегружали в силос объемом 30 м^3 с последующей его засыпкой в миксерную станцию шнековым транспортером.

Приведем основные технологические характеристики струйной цементации грунтов:

- водоцементной отношение 0,8 : 1,
- давление нагнетания 500 атм.
- количество форсунок в мониторе – 2 шт.,
- скорость вращения монитора – 10...30 об/мин.,
- скорость подъема монитора – 13 сек / 4 см.

Известно, что струйная цементация грунтов дает устойчивые и хорошие результаты при закреплении песчаных и гравелистых грунтов, поэтому достижение высокой прочности свай в верхнем слое насыпного грунта из ПГС (ИГЭ 1) и в нижнем гравийном слое (ИГЭ 12) сомнений не вызывала.

Наибольшую сложность представляла цементация глин текучепластичной и мягкопластичной консистенции (ИГЭ 2, ИГЭ 7).

С целью подтверждения возможности достижения проектной прочности в этих слоях, а также выбора наиболее рационального режима цементации были проведены предварительные работы по устройству опытных свай.

В первую очередь проверили эффективность предварительного размыва скважины струей чистой воды (без цемента). Подобная операция позволяет в глинах значительно увеличить диаметр свай до 1200-1300 мм, а, кроме того, удалить с пульпой часть глины из скважины и тем самым повысить прочность грунтоцементной сваи.

Второе направление опытных работ заключалось в подборе химической добавки для создания подходящего ионообменного процесса в глинах, а также для повышения диспергации глин, что в целом так же приводит к повышению прочности грунтоцемента. Добавки применяли при выполнении операции размыва грунта водой, а также непосредственно при цементации. В некоторых случаях химические добавки одновременно применяли при размыве и цементации.

В табл.6 приведены сведения о режиме цементации, включая данные по предварительному размыву грунта (ПРГ), содержанию химических добавок при ПРГ и цементации.

№	Наименование химического реагента	ПРГ	Концентрация добавки в процессе водного размыва, %	Количество добавки при цементации, в % от сухого веса цемента	Экспертная оценка по шкале в 10 баллов
1	Нитрит натрия	+	2,6	1,0	10
2	Без добавки	+	-	-	4
3	Поташ	+	1,3	-	8
4	Углекислый калий	+	-	0,5	9
5	Углекислый калий	-	-	0,5	10
6	Техническая сода (кальцинированная)	+	1,3	-	8
7	Техническая сода	+	-	0,4	3
8	Техническая сода	-	-	0,4	3
9	Селитра калиевая	+	1,3	-	9
10	Селитра калиевая	+	-	0,5	9
11	Селитра калиевая	-	-	0,5	5
12	Селитра калиевая	+	1,3	0,5	3

Для сопоставления режимов струйной цементации произвели экспертную оценку полученных результатов по шкале 10 баллов. Экспертная оценка включала анализ прочности образцов керна, однородность грунтоцемента по выходу керна при колонковом бурении, устойчивость работы технологического оборудования и стоимость расходуемых добавок на 1 п.м. скважины.

Безусловно, такая оценка носит достаточно субъективный характер, однако в условиях анализа действия многочисленных и разноплановых факторов, да еще при значительном разбросе выходных параметров (прочность образцов, выход керна), сопровождающем, как правило, натурные опыты, это было единственным выходом.

Результаты показали, что практически все высокие баллы были поставлены режимам, включающим предварительный размыв грунта (ПРГ).

Наиболее низкие баллы соответствовали режимам, в которых добавку вводили непосредственно в цементный раствор. В этих случаях возникали проблемы не только по предварительному растворению добавки в воде, организации дополнительной дозировочной линии, которую необходимо было включить в автоматизированный процесс приготовления цементного раствора в миксерной станции, но и, самое главное, по появлению биений в плунжерных блоках высоконапорного насоса.

Как правило, введение добавки в процессе ПРГ всегда приводило к повышению прочности грунтоцемента и его однородности, поэтому

предпочтение было отдано технической соде, как наиболее дешевой и доступной добавке.

Таким образом, окончательно был выбран режим с применением предварительного размыва грунта 1,3% раствором технической соды.

При производстве работ в среднем в сутки расходовали 60 т цемента. Такой высокий показатель был достигнут, благодаря полной компьютеризации всего технологического процесса – от автоматизированного приготовления цементного раствора до управляемой бортовым компьютером буровой установки скоростью подъема струйного монитора.

Работы устройству свай в количестве 405 шт. длиной от 18 до 20 м были закончены приблизительно за 2,5 мес.

Контрольное бурение свай показало, что прочность грунтоцемента составляла от 2,5 МПа в глинистых породах до 8-10 МПа в насыпных грунтах и гравийном слое.

Работы по цементации грунтов были выполнены летом 2004 г., а в 2005 г. путепровод был введен в эксплуатацию. К настоящему времени насыпь находится в устойчивом состоянии, что подтверждает правильность технических решений, в том числе применение струйной цементации для укрепления слабых грунтов.

Литература

1. Малинин А.Г. Применение струйной цементации в подземном строительстве // Подземное пространство мира, 2000, №2.
2. Малинин А.Г. Применение технологии струйной цементации грунтов в транспортном строительстве // Метро и тоннели. 2001, №6.