

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИНЪЕКЦИОННОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ В ПЕРМИ

А.Г. Малинин, канд. техн. наук,
технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой»,
член Правления Тоннельной ассоциации России

1. Введение.

Для решения транспортных проблем в г. Перми городской администрацией принято решение о строительстве двух автодорожных тоннелей в песчаной насыпи под главными железнодорожными путями направления ст. Пермь-II – ст. Свердловск [1-4].

Строящиеся тоннели по многим причинам уникальны. Во-первых, строительство ведется без остановки движения железнодорожного транспорта на загруженной Транссибирской магистрали. Во-вторых, площадка строительства характеризуется особо сложными горно-геологическими условиями. Железнодорожная насыпь сложена из пылеватых и мелкозернистых песков. Кроме того, грунты в основании насыпи находятся в обводненном состоянии, так как в районе строительства расположены русла трех подземных рек – Данилихи, Светлушки и Пермьки. В довершение ко всему в основании насыпи на глубине 2.5-3.0 м обнаружен слой сильно сжимаемого торфа мощностью от 1.5 до 2.5 м с пористостью 90-95 процентов. Торф подстилается суглинками текучей консистенции, ниже которых находится слой гравия. Коренные отложения в виде аргиллита встречены только на глубине от 9 до 13 м.

Основным инженерным решением строительства тоннеля является сооружение по контуру будущего тоннеля экрана из труб диаметром 1020 мм, под защитой которого производят разработку грунта и возведение монолитной железобетонной обделки.



Фото 1. Внешний вид тоннеля в процессе проходки верхнего уступа.

Очевидно, что для успешной реализации предложенного решения при строительстве объекта повышенной ответственности в существующих сложных горно-геологических

условиях в первую очередь было необходимо выполнить инъекционное закрепление неустойчивых грунтов в теле насыпи, а также слабых грунтов в ее основании.

Анализ существующего отечественного и зарубежного опыта строительства тоннелей показывает, что подобное сочетание проходки тоннеля под защитным экраном и специальных технологий укрепления грунта было применено в мире впервые.

2. Закрепление основания технологических площадок.

Сооружение экрана из труб диаметром 1020 мм с замковым соединением производилось микрощитовым комплексом HERRENKNECHT AVN-800 из стартового котлована, расположенного со стороны Южного портала. Прием труб осуществлялся со стороны Северного портала.

Между тем, в процессе проектирования было установлено, что проектная отметка дна котлована практически совпала с отметкой кровли слоя обводненного торфа мощностью 1.5-2.0 м, залегающего в основании насыпи и технологических площадок. Поэтому установка микрощита на слабое грунтовое основание без проведения специальных мероприятий была практически не возможна.

С целью повышения устойчивости основания было выполнено инъецирование торфа цементным раствором. В связи с тем, что произвести инъецирование торфа цементным составом в режиме пропитки не представлялось возможным, было принято решение о нагнетании состава в режиме гидроразрыва, т.е. под давлением, превышающем прочность грунтового массива. Известно, что такой режим приводит к отжиму грунта от стенок инъекционных скважин с последующим разрывом грунта по ослабленным плоскостям.

Для проведения специальных работ на Северной и Южной технологических площадках бурили скважины, в которые опускали металлические перфорированные трубы диаметром 57 мм с резиновыми манжетами. Через инъекционные трубы в несколько этапов нагнетали цементный раствор с В:Ц = 1.0. Для ускорения твердения в раствор добавляли жидкое стекло.

Общее количество скважин, пробуренных на двух технологических площадках по сетке 1.5 x 1.5 м, составило 880 штук, общая длина бурения – 4880 м, количество цементного раствора, инъецированного в грунт, составило 1600 м³.

В процессе работ проводили дополнительное мероприятие – ликвидацию верхней части инъекционных труб длиной 2.5 м. Это было сделано для того, чтобы не повредить режцы и шарошечные долота режущей головки микрощита при продавливании труб защитного экрана в пределах площадки проведения инъекционных работ.

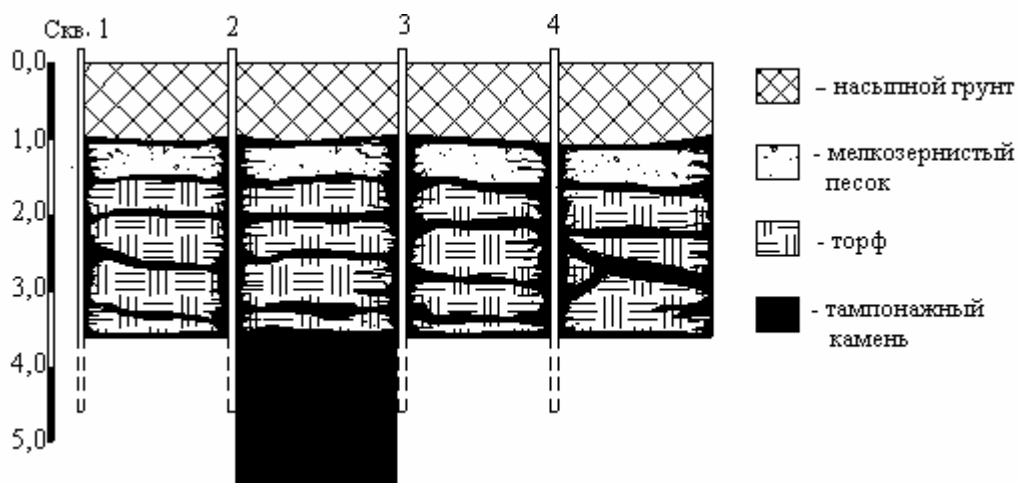


Рис.1. Развертка шурфа.

После окончания работ был проведен контроль качества инъекционного закрепления грунта с помощью проходки четырех контрольных шурфов. Визуальный осмотр стен шурфов показал (рис.1), что в грунте сформированы цементные сваи диаметром 200-300 мм, грушеобразные тела, а также многочисленные взаимно пересекающиеся слои и прослойки из отвердевшего цементного раствора тампонажного камня мощностью до 400 мм. При проходке шурфов были отобраны монолиты грунта и цементного камня. Лабораторными испытаниями установлено, что прочность образцов тампонажного камня достигает 50 МПа. При этом торф, обжатый между слоями тампонажного, перешел в более плотное состояние со значительным повышением плотностных и прочностных характеристик. В таблице 1 приведены основные характеристики слабого грунта до и после инъекционного закрепления.

Образование в грунте микросвай и прослоев из прочного тампонажного камня привело к формированию в грунте армированной структуры с высокими прочностными характеристиками. В последнем столбце таблицы 1 приведены значения прочности армированного грунта, полученные математическим расчетом с использованием правила смеси для двухкомпонентных сред при объемной доле тампонажного камня $m=16,0\%$.

Таблица 1.

Физико-механические свойства	Свойства торфа		Эффективные характеристики двухкомпонентного армированного грунта
	В естественном состоянии (до закрепления)	В обжатом состоянии (после закрепления)	
Влажность	379	309	-
Плотность, г/см ³	1.00	1.02	
Сцепление, МПа	0.001	0.028	0.615
Угол внутреннего трения, град	12.0	15.6	18.1

Выполненные работы позволили успешно разработать стартовый котлован. В котловане был установлен микрощитовой комплекс, с помощью которого пройдено 14 труб лотковой части защитного экрана. В процессе проходки не было зафиксировано никаких подвижек основания, что позволило обеспечить надежную проходку труб с точностью в несколько миллиметров.

3. Закрепление тела песчаной насыпи.

По данным инженерных изысканий насыпь сложена из мелкозернистого и пылеватого песка. Основные физико-механические характеристики грунта представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Характеристика грунта	Песок	
	Пылеватый	Мелкозернистый
Плотность частиц грунта, г/см ³	2.66	2.64
Плотность грунта, г/см ³	1.87	1.69
Коэффициент пористости	0.560	0.578
Влажность, %	0.13	0.13
Угол внутреннего трения, град.	26	25
Сцепление, кПа	0.001	0.001

Предварительные расчеты показали, что грунт с такими низкими прочностными характеристиками будет находиться в неустойчивом состоянии. В процессе проходки тоннеля возможно обрушение песчаного грунта в забое тоннеля с образованием

протяженных незакрепленных участков в своде защитного экрана, и возникновение деформаций поверхности насыпи, превышающие допустимую величину.

Для предотвращения аварийной ситуации принято решение о предварительном закреплении грунта в теле тоннеля с помощью карбамидной смолы КФ-МТ, отверждаемой щавелевой кислотой.



Фото 2. Песчаный грунт в теле тоннеля, закрепленный синтетической смолой.

Выбор синтетической смолы обусловлен высокой проникающей способностью, что имеет определяющее значение при инъекции скрепляющих составов в мелкозернистые и пылеватые пески.

Для определения необходимой прочности грунта были выполнены расчеты устойчивости забоя высотой 7.5 м и с углом откоса к горизонту 70 градусов. Расчетная схема моделировала случай обрушения забоя по круглоцилиндрической поверхности. Результаты показали, что для коэффициента устойчивости откоса $[k_{st}] = 1.25$ и коэффициента надежности по нагрузке – 1.3 значение сцепления упрочненного грунта должно составлять не менее $C = 0.293$ МПа.

С целью снижения стоимости скрепляющего материала исследовали различные варианты разбавления смолы водой. Для этого были проведены лабораторные исследования цилиндрических образцов грунта, укрепленного композицией "смола + вода" в диапазоне соотношений С:В от 1.0 до 0.5. Образцы приготавливали путем перемешивания грунта естественной влажности (7-11%) с расчетным количеством скрепляющего состава [2].

В связи с тем, что стандартные испытания образцов укрепленного грунта в приборе одноплоскостного среза провести не возможно, образцы испытывали на одноосное сжатие, а величину сцепления рассчитывали исходя из следующей методики.

В многочисленных экспериментах установлено, что соотношении прочности на сжатие и на разрыв (раскол) образцов грунта, укрепленного карбамидными смолами, составляет $\sigma_c/\sigma_p = 6$. Если предположить, что укрепленный грунт подчиняется критерию разрушения Мизеса-Шлейхера, то в этом случае угол внутреннего трения составит $\varphi = 35^\circ$, а величина сцепления укрепленного грунта может быть приближенно определена как $C = \sigma_c / 7$. Т.е. требуемой величине сцепления соответствует прочность образцов на сжатие $\sigma_c = 2.05$ МПа.

Анализ лабораторных испытаний показал, что такой уровень прочности будет иметь грунт, укрепленный скрепляющим составом при соотношении С:В = 80:20 и при общей объемной доле скрепляющего состава в объеме грунта более 20%.

На последнем этапе исследований был выполнен анализ возможности опасных осадок насыпи в случае предварительного инъектирования грунта в теле тоннеля в связи с дополнительным возрастанием объемного веса песчаного грунта. Данный расчет выполняли в связи с возможностью деформаций в основании тоннеля и, в первую очередь, в сильно сжимаемом слое торфа [1,4].

Для оценки напряженно-деформированного состояния насыпи применяли метод конечных элементов, реализующий вариационный принцип Лагранжа для геометрически линейной задачи. Численные решения найдены с применением изопараметрических восьми-узловых элементов с квадратичной аппроксимацией перемещений. Задачу решали в плоско деформированной постановке.

В связи с малой величиной допускаемых дополнительных перемещений поверхности насыпи поведение грунта моделировали с помощью уравнений теории упругости (модель линейно деформируемого тела) без учета деформаций ползучести.



Фото 3. Производство грунтоцементной сваи.

Инъекция скрепляющего состава в грунт является продолжительным во времени процессом, при котором происходит одновременное увеличение модуля деформаций и величины объемного веса грунта. Данная задача требует пошагового решения с учетом изменения упругих свойств и весовых характеристик грунта. С целью упрощения расчетной схемы задачу решали в «мгновенной» постановке, т.е. считали, что в процессе инъекционных работ происходит только увеличение веса грунта без увеличения его деформационных характеристик. Естественно, что в рамках принятой идеализации рассматривается наиболее опасный случай, и определяются соответствующие ему максимально возможные осадки насыпи.

Перемещения определяли из предположения, что дополнительные перемещения возникают только при действии на грунтовый массив дополнительных нагрузок от инъектирования в тело насыпи дополнительной массы скрепляющего состава.

Анализ результатов расчета показал, что для существующего геологического строения основания наличие слабых грунтов не приводит к опасным последствиям. При принятом модуле деформирования торфа 1.0 МПа максимальные осадки насыпи над сводом тоннеля составят всего приблизительно 7 мм.

Перед проходкой тоннеля были выполнены опытные работы по закреплению песчаной насыпи. В процессе проходки опытной штольни были отобраны образцы грунта, которые показали, что при расходе скрепляющего состава 300 л на 1 п.м. скважины в натуральных условиях прочность образцов составляла 5-7 МПа. Это позволило перейти к полному комплексу работ по укреплению грунта в теле тоннеля (рис.2).

На первом этапе инъекцию скрепляющего состава производили через сеть горизонтальных и наклонных перфорированных труб, забитых в песчаный грунт на глубину 15 м с помощью пневматических ударных машин. Трубы забивали со стороны Южного и Северного портала навстречу друг другу. В связи с ограниченностью длины

труб "мертвую" зону грунта инъецировали с помощью вертикальных труб, которые были забиты после проходки верхнего уступа тоннеля.

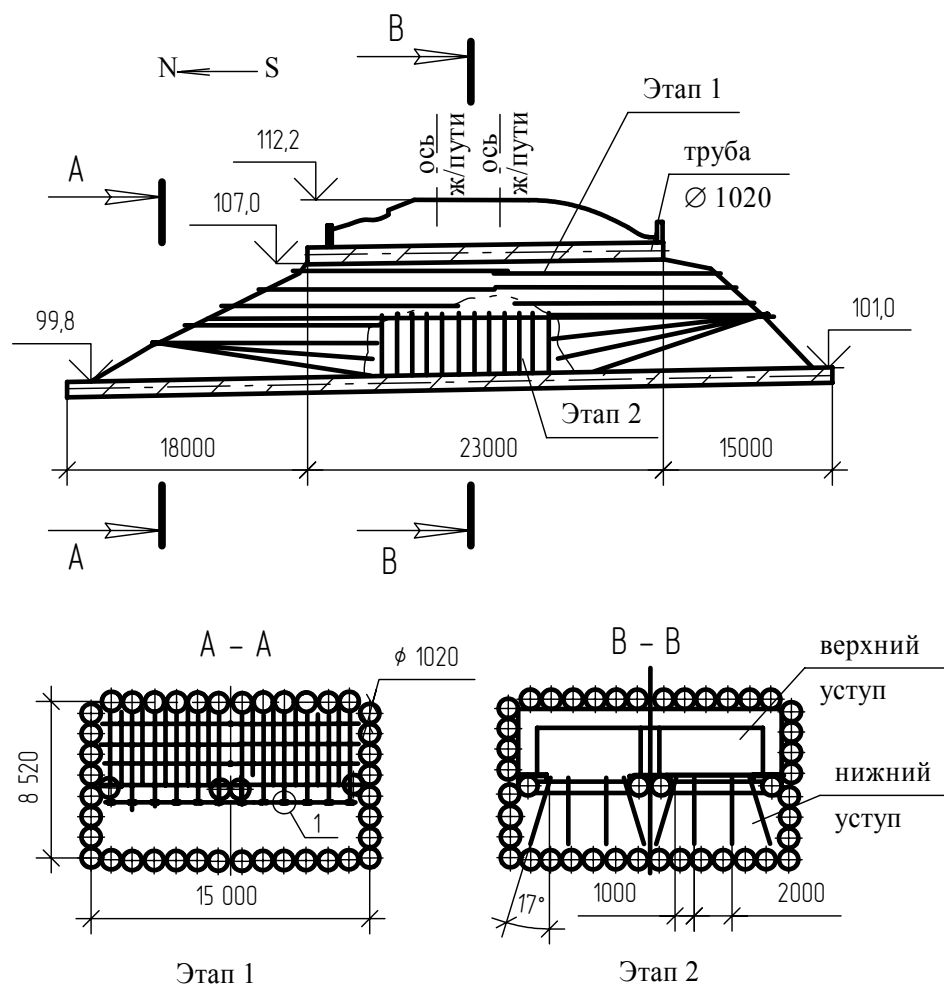


Рис.2. Схема инъекционного закрепления грунта в теле тоннеля.

В процессе проходки тоннеля были выполнены замеры прочности грунта в забоях со стороны Южного и Северного порталов. На рис.3 показано распределение прочности укрепленного грунта в зависимости от удаления точки измерения от инъекционной скважины. Анализ графиков, построенных методом наименьших квадратов, свидетельствует о достаточно хорошей однородности пропитки скрепляющим составом грунтового массива. При этом средние показатели прочности приблизительно в 2 раза превышали минимально допустимую величину.

В общей сложности в тело тоннеля было инъецировано 690 м³ скрепляющего состава через 250 перфорированных труб диаметром 57 мм.

Выполненные мероприятия позволили успешно выполнить проходку тоннеля. Причем в процессе разработки грунта забой находился не только в вертикальном положении, но и в некоторых случаях с отрицательным углом наклона.

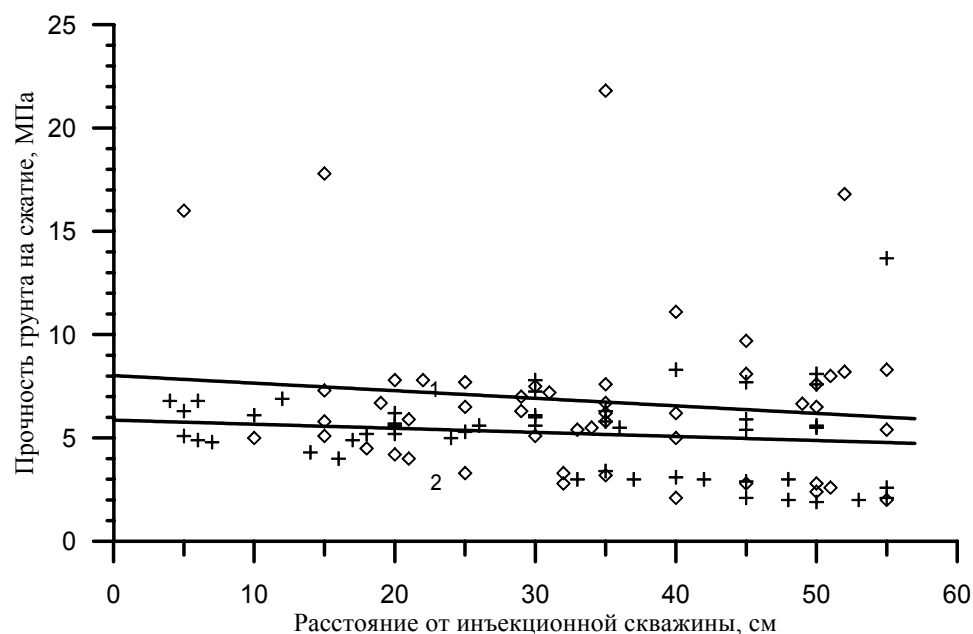


Рис.3. Прочность грунта на удалении от инъекционной скважины: 1 – результаты измерений прочности укрепленного грунта в забое со стороны Южного портала, 2 – со стороны Северного портала.

4. Сооружение грунтоцементных свай в основании тоннеля.

Последний этап строительства тоннеля был связан с необходимостью полного укрепления грунта в основании труб лотковой части тоннеля. С целью получения надежных результатов было принято решение о сооружении грунтоцементных свай с помощью технологии струйной цементации грунта.

Бурение скважин на порталных участках производили буровой установкой УРБ-2А-2 (Россия), а в ограниченном пространстве тела тоннеля с помощью буровой установки РС-950. Цементную смесь с В:Ц= 0.8-1.0 готовили в миксере ТW021 (Италия) и инъецировали высоконапорным насосом ТW351. Давление нагнетания составляло 400-450 атм, расход цементного состава 80-105 л/мин. При этом диаметр свай в песках и суглинках составлял 700 мм, а слое торфа доходил до 850 мм.



Фото 4. Цементируочный насос фирмы ТЕСНИВЕЛ ТW351.



Фото 5. Освоение новой буровой установки РС950 (Италия). Слева направо: техн. директор ЗАО "ИнжПроектСтрой" Малинин А.Г., буровой мастер Казаков А.В., начальник участка Черноусов Н.И.

Глубина свай в зависимости от геологического строения участка составляла 9.5-11.5 м. Подошва свай опиралась на плотные аргилитоподобные глины.

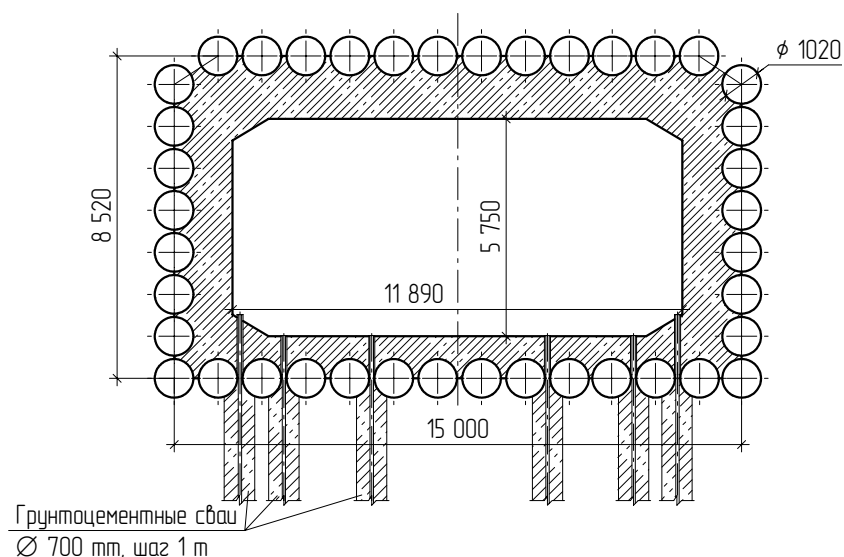


Рис. 4. Грунтоцементные сваи в основании лотка тоннеля.

Сваи сооружали после разработки всего объема грунта. Для этого в замках труб вырезали отверстия, на которые устанавливали кондуктора в виде труб диаметром 159 мм. Трубы соединяли с арматурным каркасом лотка. После бетонирования лотка через трубы производили бурение лидирующих скважин и сооружение грунтоцементных свай. Всего на площадке строительства тоннеля было выполнено 250 свай.

Расположение и шаг свай в теле тоннеля показан на рис.4.

5. Заключение.

Проведение специалистами предприятия специальных мероприятий по укреплению основания стартовых площадок, грунта в теле тоннеля, а также сооружение в основании тоннеля грунтоцементных свай позволило успешно завершить строительство тоннеля в железнодорожной насыпи.

За время проходки тоннеля общие осадки поверхности насыпи не превысили опасного уровня. Движение поездов не было остановлено ни разу. Сочетание правильных инженерных решений, использование современной техники и оборудования, а также полученный практический опыт позволяет в ближайшем будущем надеяться, что строительство второго автодорожного тоннеля будет выполнено в более короткие сроки и с меньшими экономическими затратами.



Фото 6. Вид грунтоцементной сваи.



Фото 7. Визит полномочного представителя Президента РФ Кириенко С.В. на стройку в день сбойки.



Фото 8. Сбойка – праздник всех строителей.



Фото 9. ГИБДД открывает движение в тоннеле.

Литература

1. Малинин А.Г. Строительство автодорожных тоннелей в Перми. Предварительный прогноз осадок поверхности железнодорожной насыпи // Подземное пространство мира. 1999. №5. С.23-25.
2. Малинин А.Г. Строительство автодорожных тоннелей в Перми. Укрепление торфа в основании технологических площадок // РОБТ. 2000. №3. С9-10.
3. Малинин А.Г. Опытно-промышленные испытания технологии предварительного закрепления песчаной насыпи при строительстве автодорожных тоннелей в Перми // РОБТ. 2000. №5. С.18-20.
4. Malinin A.G. Prediction of the settlement of the railway dam at the tunnel construction // Proceedings of the Third International conference on advances of computer methods in geotechnical and geoenvironmental engineering. Moscow. 2000. Rotterdam: Balkema. P.321-322.

Контактные телефоны: (3422) 196-103, 196-361
Официальный сайт в Интернете: www.jet-grouting.ru