

Реализация безосадочных технологий при строительстве Петербургского метрополитена

К. П. БЕЗРОДНЫЙ, докт. техн. наук, зам. гендиректора ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» по научной работе, А. И САЛАН, главный инженер ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», В. А. МАСЛАК, генеральный директор ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», М. О. ЛЕБЕДЕВ, канд. тех. наук, зав. лабораторией геомеханических исследований ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», А. Ю. СТАРКОВ, главный инженер ОАО «Метрострой», А. В. МОРОЗОВ, генеральный директор ЗАО «СМУ-11 Метрострой», А. В. УХАНОВ, главный инженер ЗАО «СМУ-11 Метрострой»

Сложные условия строительства объектов Санкт-Петербургского метрополитена в центральной части города заставляют искать и внедрять новые технологии для обеспечения сохранности зданий и наземных сооружений. Ранее были разработаны технологии и конструкции, снижающие осадку поверхности земли: обжатые в породе сборные обделки станций и перегонных тоннелей и опережающая забой монолитная бетонная арочная крепь в предварительно созданной прорези.

Опыт строительства свидетельствует, что наибольшее влияние на величину осадки поверхности оказывало строительство эскалаторных тоннелей, пересекающих на большей своей протяженности водонасыщенные и совершенно неустойчивые грунты. Традиционно применяемая технология контурного рассольного замораживания грунтов обеспечивает необходимые условия для проходки тоннелей протяженностью более 100 м. Однако процесс замораживания вызывает деструктуризацию грунта, что приводит к значительной осадке при последующем оттаивании.

Была разработана двухстадийная технология создания контурного ограждения эскалаторного тоннеля: закрепление грунтов методом струйной цементации через вертикальные скважины с поверхности до границы кембрийских глин. Если на поверхности имеются инженерные сети, капитальные строения и т. п., возможно использование наклонных скважин под углом до 60°: на второй стадии осуществляется рассольное замораживание закрепленного грунтоцементного массива с целью создания противодиффузионного ограждения.

Для формирования контурного грунтоцементного ограждения эскалаторного тоннеля станции «Звенигородская» диаметром 10,5 м и длиной около 100 м было задействовано почти 1800 вертикальных скважин. Вначале установкой «Jet Grouting» каждую скважину диаметром 151 мм пробуривали на проектную глубину, затем, в процессе обратного хода на проектных отметках,

проводили гидравлическое смещение грунта и раствора на цементной основе. Данная технология обеспечивает создание грунтоцементной сваи диаметром 800–1000 мм.

На рис. 1 представлена схема грунтоцементного ограждения эскалаторного тоннеля толщиной 1 м.

Рассольное замораживание — вторая стадия комбинированной технологии — осуществлялось после полного отвердевания и стабилизации температуры грунтоцементного ограждения тоннеля. 40 наклонных замораживающих скважин диаметром 114 мм бурили с поверхности после завершения работ

по струйному закреплению. После прохождения грунтоцементного массива нужно было попасть в слой твердых глин на глубину не менее 3 м. Схема рассольного замораживания эскалаторного тоннеля приведена на рис. 2.

Были разработаны конструкции крепи и обделки, а также технологии их сооружения и проходки, практически исключающие применение ручного труда. Арочно-бетонная крепь предусмотрена с межрамным заполнением набрызг-бетоном либо бетоном. По внутреннему контуру крепи выполняется гидроизоляция, затем сооружается монолитная железобетонная обделка.

Эти конструкции и технологии были использованы при строительстве наклонного хода станции «Звенигородская». Во время проходки наклонного хода вели геотехнический мониторинг, который включал оценку качества стабилизации грунтов устойчивости призабойной части тоннеля осадки дневной поверхности, а также определение

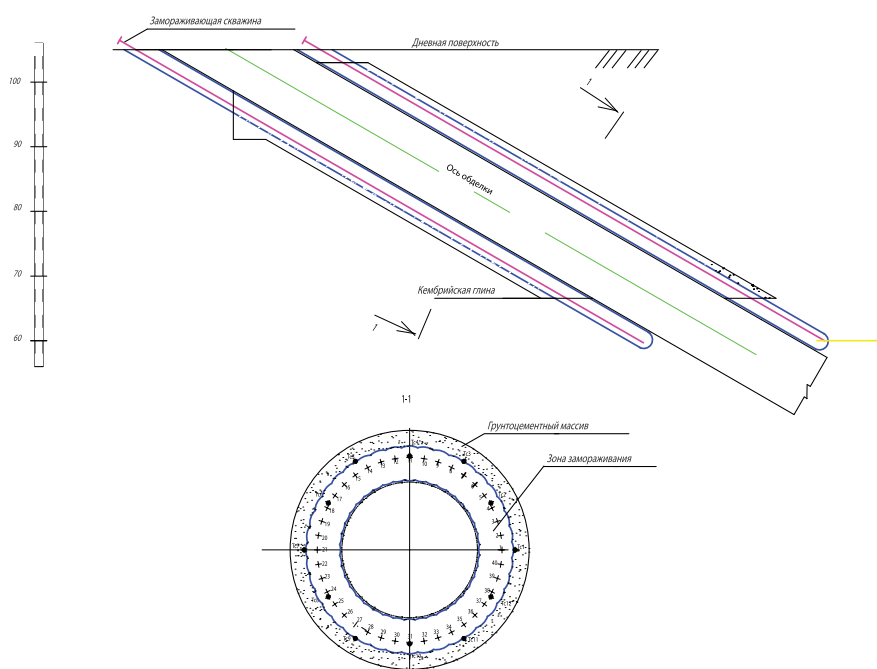


Рис. 1. Струйная цементация массива

напряженно-деформированного состояния крепи и обделки тоннеля, конвергенции внутреннего контура выработки и фактических деформационно-прочностных свойств вмещающих грунтов.

Оценку устойчивости призабойной части тоннеля осуществляли с помощью регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли. Напряженно-деформированное состояние крепи и обделки определяли по размещенным в них струнным датчикам и последующей обработке показаний по специальным методикам. Конвергенцию контура выработки устанавливали лазерными дальномерами. Фактические деформационно-прочностные свойства вмещающих грунтов вычисляли, зная скорости продольных и поперечных волн, полученных при сейсмопрофилеировании. Осадку дневной поверхности и цоколей зданий измеряли по реперам геодезическими приборами.

В результате натурных исследований напряженно-деформированного состояния системы массив — крепь — обделка получены зависимости величины нормальных тангенциальных напряжений в аркобетонной крепи от глубины заложения наклонного хода. Напряжения в обделке на сегодняшний день малы. На начальном этапе, в период гидратации цемента, отмечалась экзотермическая реакция и нормальные тангенциальные напряжения несколько повышались.

Конвергенция на горизонтальном диаметре зависит от глубины заложения наклонного хода (рис. 3).

Таким образом, создана комбинированная технология стабилизации водонасыщенных совершенно неустойчивых грунтов, позволяющая минимизи-

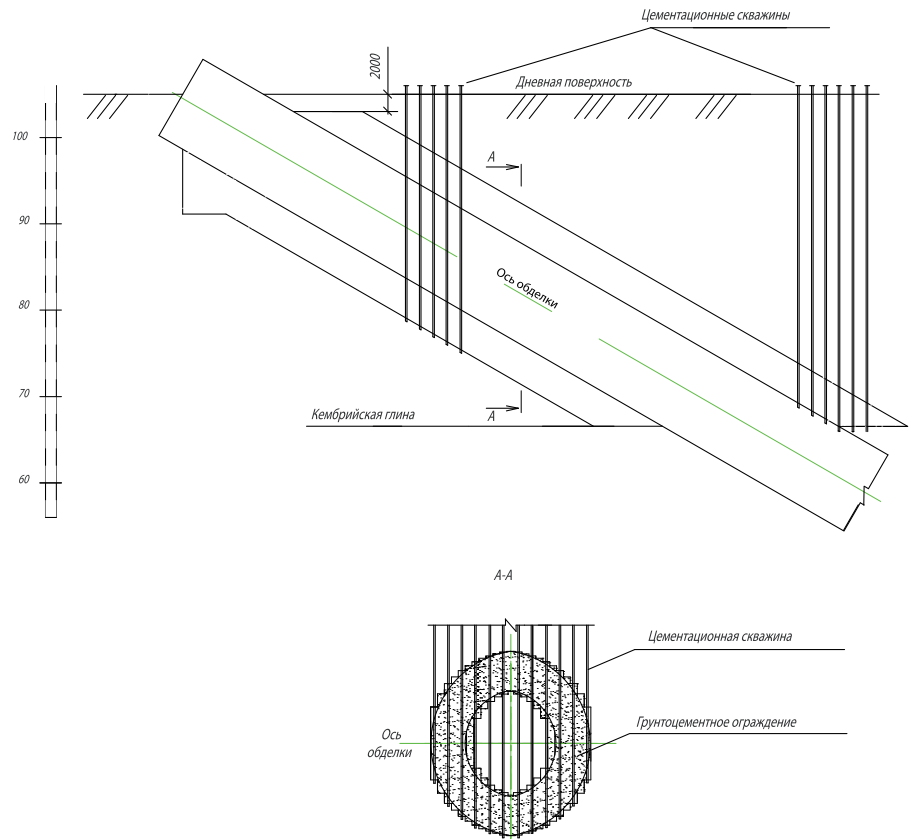
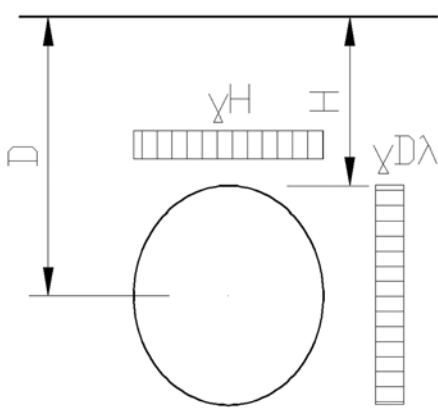


Рис. 2. Комбинированное закрепление грунтов ограждения эскалаторного тоннеля

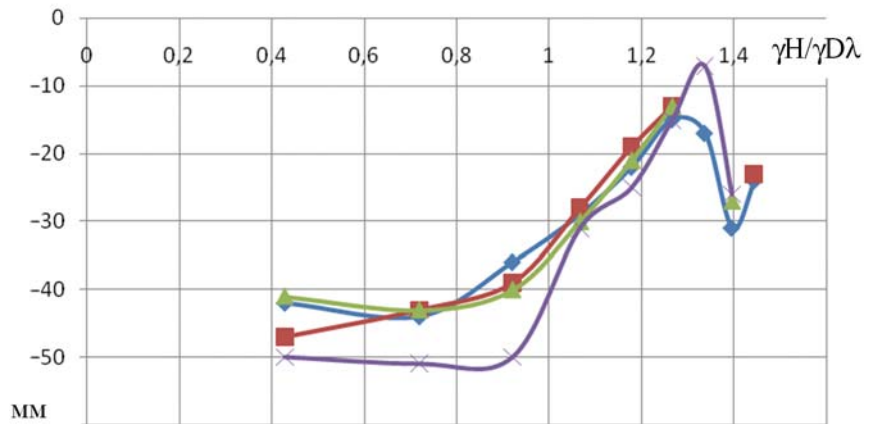
ровать осадку поверхности земли (без усиления и расселения зданий и сооружений). Разработанная технология практически исключает применение ручного труда при сооружении наклонного хода. В результате проведенного геотехнического мониторинга установлен значительный запас несущей способности крепи и обделки.

Фирмой «Herenknext» по заданию «Ленметрогипротранса» и «Метростроя» создан тоннелепроходческий механизированный комплекс с пригру-

зом забоя для сооружения наклонных эскалаторных тоннелей, при использовании которого практически не происходит смещения контура тоннеля, поскольку давление пригрузки равно «сняваемым» напряжениям при проходке. Первый опыт сооружения эскалаторного тоннеля в четвертичных водонасыщенных совершенно неустойчивых грунтах с помощью ТПМК «Herenknext» был получен на станции «Обводный канал», при этом отмечено значительное снижение осадки поверхности.



а)



б) — 05.12.2008 — 08.12.2008 — 18.12.2008 — 08.05.2009

Рис. 3. Конвергенция на горизонтальном диаметре тоннеля: а — расчетная схема, б — зависимость конвергенции от глубины заложения наклонного хода



Рис. 4. Устройство опережающего крепления лба забоя из фиброглассовых анкеров

Как известно, до 40% смещений контура подземной выработки происходит впереди забоя, поэтому новые разработки были направлены на стабилизацию грунтового массива на указанном участке. Это достигалось бурением скважин и установкой в них экрана из труб с инъекцией над сводом будущей выработки, бурением скважин в теле будущего тоннеля и устройством в них инъекционных фиброглассовых анкеров (рис. 4). Экран из труб опережал забой максимально на 7 м, минимально на 3 м, фиброглассовые анкера соответственно на 14 и 6 м.

Был разработан проект конструкций, организации строительства (рис. 5) и геотехнического мониторинга, с помощью которого решались следующие задачи:

- определение напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов крепи и окружающего грунтового массива в натуральных условиях;

- оценка устойчивости массива в призабойной зоне;
- определение деформации поверхности земли.

Технологический цикл работ по сооружению заходок верхнего уступа

руддвора и венттоннеля включал в себя:

- устройство буровой установкой SM-475-T скважин диаметром 124 мм и длиной 14 м и установка в них опережающих забой фиброглассовых инъекционных анкеров;
- сооружение опережающих забой экранов из труб диаметром 102 мм и длиной 7 м в предварительно пробуренных скважинах диаметром 121 мм с последующим заполнением их инъекционным раствором;
- разработку породы забоя на одну заходку длиной 80 см агрегатом BROKK 180; установку рам крепи из двутавра № 30 осуществляли этим же агрегатом; затем межрамное пространство заполняли набрызг-бетоном либо бетонировали.

На арках устанавливали струнные датчики и динамометрические фрагменты двутавров, оснащенные тензорезисторами. Напряжения в трубах опережающего экрана рассчитывали по измеренным значениям местных деформаций с помощью мерных баз. По смещениям специальных марок, закрепленных в пробуренных впереди забоя горизонтальных скважинах, получали величины горизонтальной деформации массива по мере проходки тоннеля.

Для определения усилий в инъекционных анкерах в них устанавливали струнные датчики. На основе полученных значений вычисляли вертикальные и горизонтальные напряжения в массиве, смещения контура выработки получали с помощью тахеометрической съемки марок, установленных на арках.

Устойчивость системы массив — крепь в призабойной части оценивали, регистрируя естественные импульсы электромагнитного поля Земли (ЭИЭМПЗ). Деформации поверхности

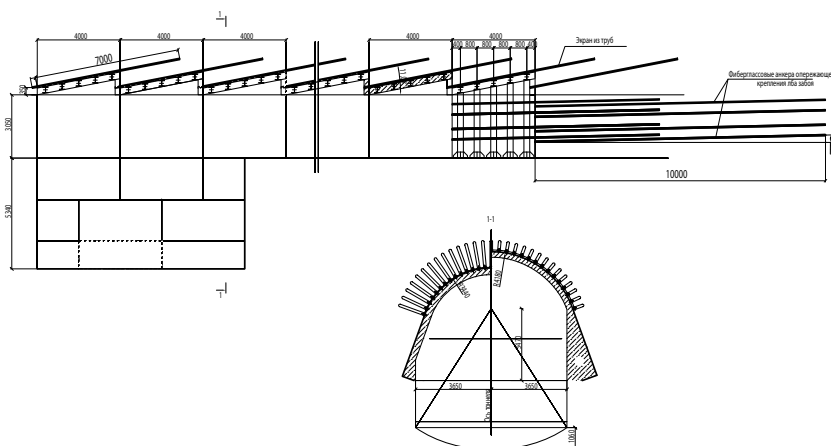


Рис. 5. Конструкция крепи и схема устройства экрана из труб

земли фиксировали по реперам геодезическими методами.

По результатам геотехнического мониторинга сделано следующее заключение. Смещений на дневной поверхности не отмечается, что дает основание говорить о реализации безосадочной технологии строительства. Радиальные напряжения на контакте крепи и массива составляют 20% от N . Напряжения в анкерах достигают 190 МПа, горизонтальные смещения впереди забоя в массиве — 11 мм, они начинаются на расстоянии ~6 м от забоя. Система массив — крепь в призабойной зоне находилась в устойчивом состоянии. При расчетах необходимо учитывать ползучесть протерозойских глин.

Были разработаны рекомендации по совершенствованию крепи и использованию элементов рассмотренной технологии при строительстве стационарных тоннелей.

При строительстве станции «Адмиралтейская» в центре города, где расположены дома постройки XVIII — начала XIX в. — памятники архитектуры местного и федерального значения, стояла сложная задача сохранения исторического облика зданий. Эта задача была решена путем внедрения комплексных мероприятий с применением специальных способов на поверхности и при ведении горнопроходческих работ.

На поверхности был применен способ компенсационного инъецирования в грунты твердеющих составов. Работы разбиваются на два этапа. На первом этапе — до проходки подземных выработок, осуществляется усиление фундаментов и оснований под ними. На втором — компенсация разуплотнения грунта по мере проходки подземной выработки.

Здания, попадающие в зону влияния строительства, имеют бутовый фундамент на лежнях. Со временем раствор фундамента потерял свои связующие качества, а лежни во многих местах сгнили. Поэтому выполнялось инъециционное усиление тела фундаментов с использованием кондуктора-инъектора (рис. 6).

Подстилающий фундаменты слой грунтов (1–2 м) укрепляли инъецицией твердеющих растворов в скважины, пробуренные через те же кондукторы. На этом же этапе устанавливали глубинные грунтовые реперы и марки на зданиях, и во время проходки подземных выработок проводили постоянные измерения их положения.

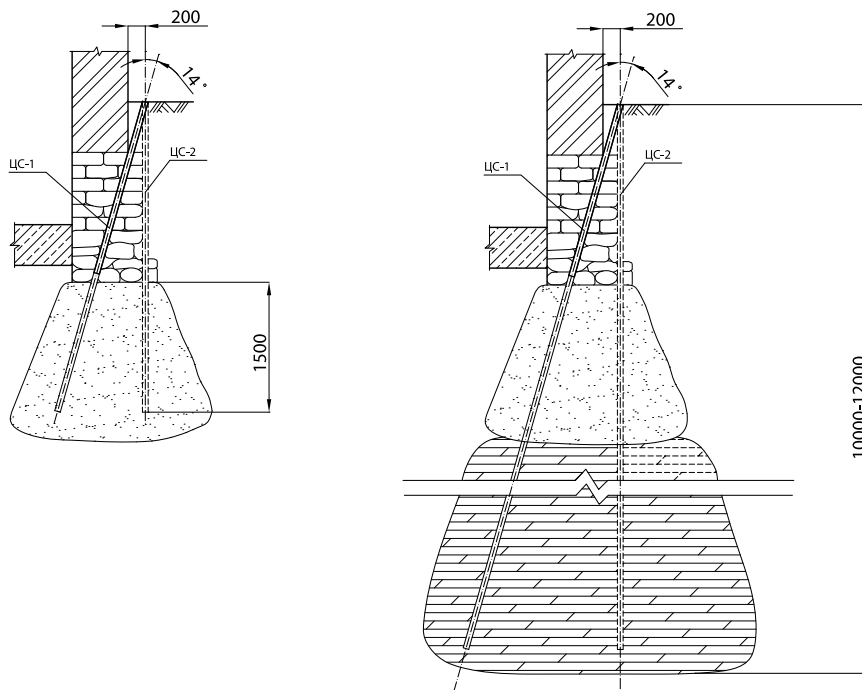


Рис. 6. Инъециционные работы: а — усиление фундаментов и оснований под ними на первом этапе; б — компенсационное инъецирование при развитии осадки

Следующий этап — установка, омоноличивание манжетных колонн обойменным раствором и осуществление компенсационной инъециции в зоны вероятного разуплотнения грунта по мере проходки подземных выработок с помощью двойного тампона — обтюратора (рис. 6). Манжетные колонны устанавливаются в скважины, пробуренные через те же кондукторы. Инъециция осуществляется в массив, расположенный ниже укрепленного ранее подстилающего фундаменты слоя грунта. Место инъециции в плане и по глубине, количество закачиваемого раствора определяли на основе результатов наблюдений за реперами.

Таким образом, предотвращение осадки поверхности, или компенсация осадки достигается нагнетанием твердеющих растворов в массив, расположенный между подземным сооружением и фундаментом зданий. Цель этих работ — не допустить развития осадки, что может привести к деформациям зданий.

Чрезвычайно важно принятие квалифицированного решения на основании результатов измерений по грунтовым реперам и маркам о месте и режиме ведения инъециционных работ. Поэтому неотъемлемую часть технологического процесса составляет мониторинг — постоянный контроль всех параметров инъецирования и смещений с обратной связью.

Таким образом, при реализации безосадочных технологий необходимо

решать комплекс задач, которые разделяются на общие (предварительные) и касающиеся непосредственно мониторинга. Общие (предварительные) задачи:

- расчет осадки поверхности по мере проходки подземной выработки;
- обследование зданий, попадающих в зоны влияния осадки;
- расчет деформаций зданий при ожидаемой осадке во время проходки, определение величин допустимой осадки и установление критериев компенсационной инъециции;
- определение мест и порядка выполнения компенсационной инъециции;
- установка реперов и марок наблюдений за деформациями грунтового массива, зданий и сооружений.

Задачи мониторинга:

- непрерывные замеры перемещений защищаемых строений и грунта;
- оперативная обработка данных; контроль технологических параметров инъецирования;
- оперативная связь между операторами мониторинга и управления технологическими процессами;
- квалифицированная интерпретация полученных данных;
- разработка технологических карт ведения инъециционных работ.

Указанные работы были проведены в Санкт-Петербурге при строительстве станции «Адмиралтейская» под домами 5, 7, 9 по Малой Морской улице.