

К.П. БЕЗРОДНЫЙ,
 Д.Т.Н.,
 М.О. ЛЕБЕДЕВ,
 К.Т.Н.,
 ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Subway construction in St. Petersburg is being carried out under complicated geotechnical conditions. Additional difficulties experienced by metro builders in the course of the "Sportivnaya" station second lobby construction were caused by the site location in one of the city historic areas, in close proximity to the Neva river. The article presents an excavation and environmental monitoring system that has helped to reduce the negative impact of technological processes on the environment.



О ВЫПОЛНЕНИИ МОНИТОРИНГА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВТОРОГО ВЕСТИБЮЛЯ СТАНЦИИ МЕТРО «СПОРТИВНАЯ»



191002, г. Санкт-Петербург,
 Большая Московская ул., д. 2
 Тел.: +7 (812) 316-20-22
www.lenmgt.ru

Строительство метрополитена Санкт-Петербурга в четвертичных отложениях осуществляется в очень сложных инженерно-геологических условиях. Особенно это касается сооружений, обеспечивающих связь подземных объектов с дневной поверхностью в исторической части города, когда строительство ведется в условиях существующей застройки. Для обеспечения безопасности проходческих работ и исключения больших осадок дневной поверхности в неустойчивых водоносных грунтах требуется создание надежного противодиффузионного и прочностного ограждения.

Опыт строительства метрополитена свидетельствует о том, что наибольшее влияние на величину осадок дневной поверхности, при использовании традиционных технологий, основанных на методе контурного рассольного замораживания, оказывало строительство эскалаторных тоннелей. Причем эта технология приводила к деструктуризации грунта, что обычно сказывалось на увеличении осадок при его оттаивании уже после завершения проходки. Максимальные величины деформаций дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей по рассмотренной технологии достигали 550 мм и более. Следствием этого являлись значительные повреждения и разрушения существующих зданий и сооружений.

При развитии малоосадочных технологий сооружения эскалаторных тоннелей была разработана так называемая комбинированная технология, сочетающая струйную технологию и рассольное замораживание грунта, реализованная при строительстве эскалаторного тоннеля станции «Звенигородская». Закрепление массива Jet-сваями осуществлено рядами вертикальных скважин, пробуриваемых вдоль оси наклонного хода. Цементация производилась зонально, обеспечивая создание грунтоцементного ограждения необходимой толщины.

Для обеспечения безопасности проходки наряду с цементацией было выполнено страховочное контурное замораживание наклонными скважинами, перекрывающее возможные «окна» в цементном камне. Замораживание было выполнено из расчета недопущения выхода контура заморозки за пределы закрепленного массива для обеспечения минимальных деформаций в процессе замораживания и последующего оттаивания.

Данные измерений деформаций дневной поверхности с классической технологией показали, что при использовании комбинированной технологии смещения земной поверхности были в пять раз меньше (90–100 мм).

Наиболее эффективным решением для минимизации деформаций дневной поверхности показала себя схема строительства подземного вестибюля и эскалаторного тоннеля под защитой стены в грунте и закрепления грунтов методом струйной цементации. Данные методы обеспечения устойчивости массива и противодиффузионной завесы не новы и применялись при строительстве объектов метрополитена с 1990-х годов. Но к настоящему времени применяемая механизация и отработанная технология ведения работ позволили, на примере строительства второго выхода со станции «Спортивная», получить действительно функциональные ограждающие конструкции.

По периметру подземного вестибюля выполняется стена в грунте из монолитного железобетона (рис. 1). Внутри контура, ограниченного стеной в грунте выше горизонтального диаметра сооружаемого тоннеля, выполняется закрепление грунтов методом «струйной цементации».

Проходка эскалаторного тоннеля выполняется с механизированной разработкой выкола экскаватором и возведением временной аркобетонной крепи (установка колец из двутавра и заполнение межрамного пространства набрызг-бетоном). Возведение постоянной обделки начинается после проходки тоннеля с временной крепью на всю длину. По внутренней поверхности

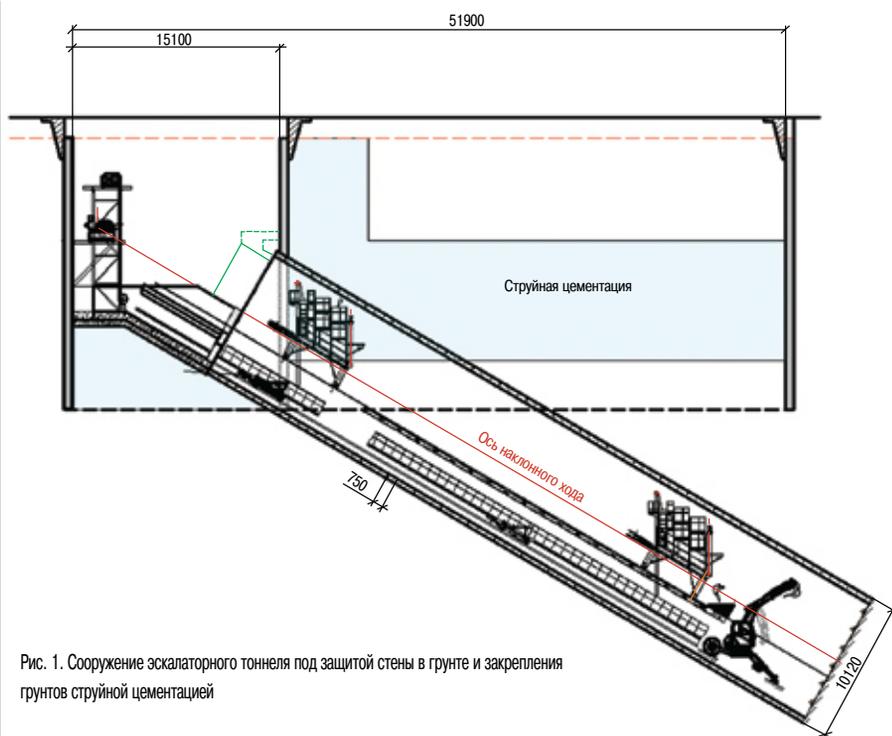


Рис. 1. Сооружение эскалаторного тоннеля под защитой стены в грунте и закрепления грунтов струйной цементацией

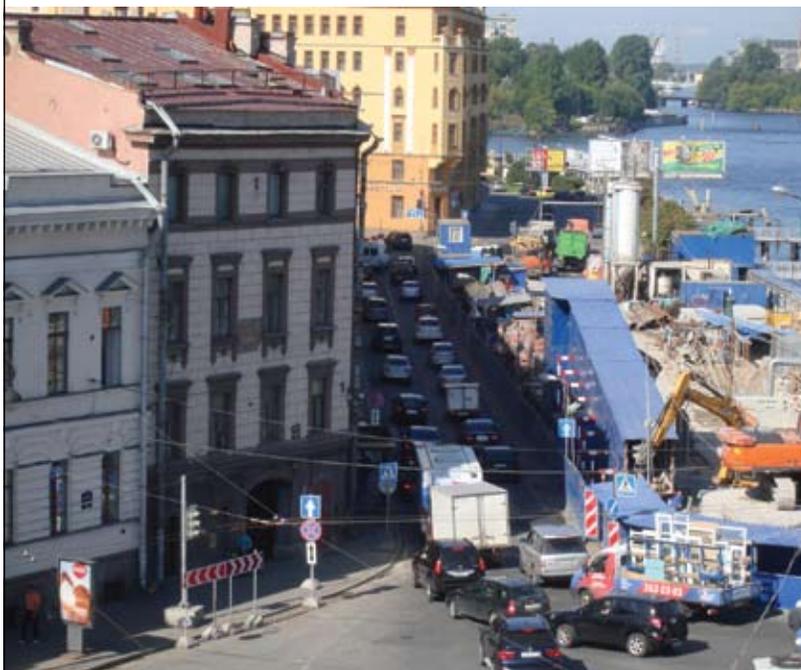


Рис. 2. Расположение строительной площадки относительно окружающей инфраструктуры

временной крепи наносится обмазочная гидроизоляция. Возведение постоянной обделки начинается с монтажа арматурных каркасов с последующей укладкой бетона сначала в нижнюю часть сечения тоннеля, а затем в верхнюю. Отставание бетонирования верхней части регламентируется условиями размещения и обслуживания опалубочного оборудования. Такая схема горнопроходческих работ была применена и при проходке эскалаторного тоннеля на станции «Звенигородская».

Строительство второго вестибюля станции «Спортивная» осложнено расположением строительных площадок в исторической части города. С одной стороны расположены здания XIX века, а с другой — р. Нева (рис. 2).

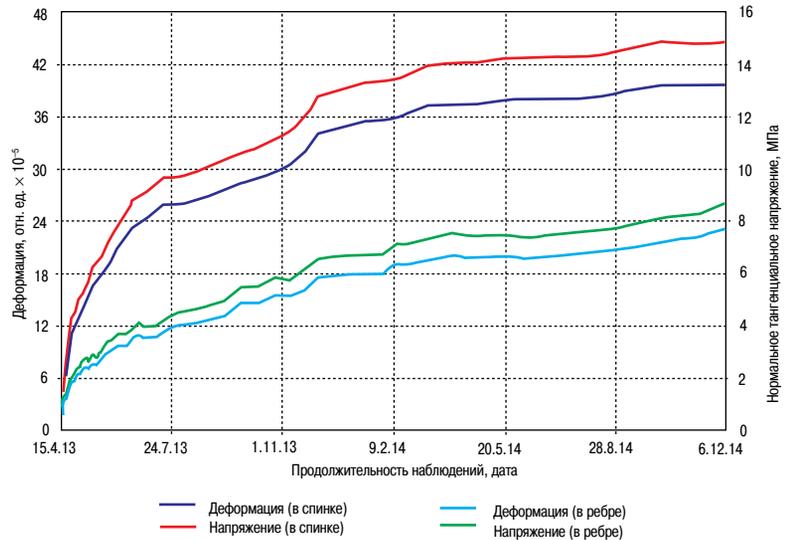
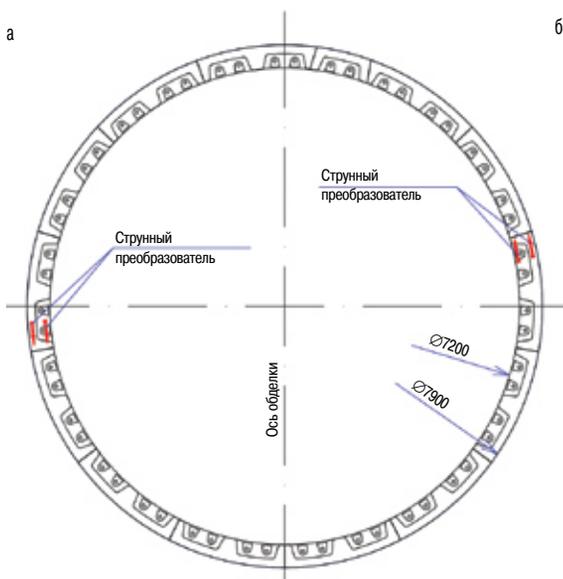


Рис. 3. Схема размещения датчиков в обделке переходного коридора (а) и характерный график формирования усилий в обделке (б)

Для контроля над состоянием системы «вмещающий массив — обделка» строящихся сооружений в данных условиях необходим комплекс работ, который позволит получать информацию и при своевременных мероприятиях минимизировать влияние горных работ на окружающую среду и повысить безопасность горнопроходческих работ.

Для снижения негативного влияния техногенных процессов при строительстве комплекса подземных инженерных сооружений на окружающую среду был разработан проект горно-экологического мониторинга, который включал:

- определение напряженно-деформированного состояния массива и крепей (обделок) эскалаторного тоннеля, переходного коридора под р. Невой и расстрельной системы котлованов;
- определение фактических деформационно-прочностных свойств вмещающих грунтов;
- контроль качества работ по закреплению грунтов и устройству стены в грунте;
- контроль внутрипластового давления во вмещающем массиве;
- определение деформации грунтового массива глубинными экстензометрами;
- мониторинг зданий, попадающих в зону возможной деформации при строительстве комплекса сооружений;
- контроль экологических показателей воздействия на окружающую среду;
- определение осадок дневной поверхности.

Запроектированный комплекс линии глубокого заложения состоит из системы переходных коридоров разного диаметра, связывающих нижний зал станции «Спортивная» с эскалаторным тоннелем второго выхода и подземным вестибюлем около Тучкова моста.

Все основные сооружения участка (коридоры, натяжная камера и камера металлоконструкций, а также нижняя часть эскалаторного тоннеля) расположены в плотных протерозойских глинах с большим перекрытием в своде.

Исключением являются сооружения, соединяющие подземные объекты с поверхностью. К таким сооружениям относятся верхняя часть эскалаторного тоннеля

и котлован вестибюля. Их верхняя часть (до глубины 20–22 м) расположена в совершенно неустойчивых грунтах — от водонасыщенных пылеватых песков до текучих суглинков и глин. Проектом предусмотрено применение специальных способов работ, таких как ограждающая «стена в грунте», металлический шпунт и закрепление грунтов по технологии Jet-свай.

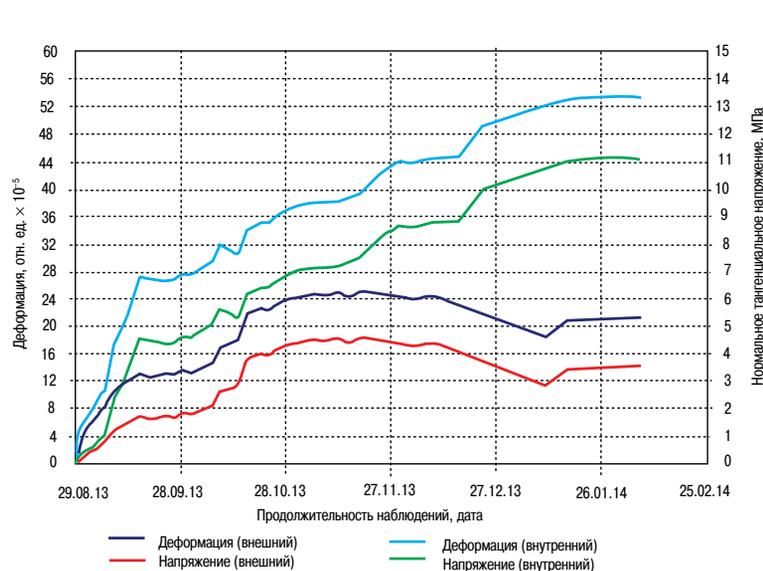
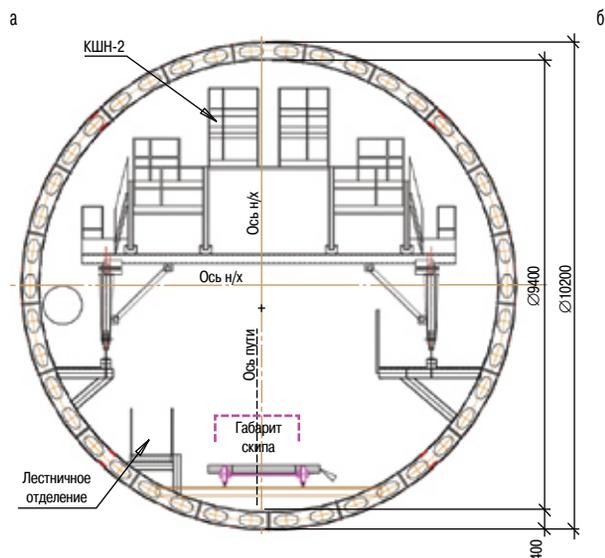
Практически все сооружаемые подземные конструкции (переходные коридоры, эскалаторный тоннель) имеют круглые очертания разного диаметра. Проходка осуществляется тьюбингоукладчиками с разработкой грунта отбойными молотками и монтажом обделки Ø 7,9; 8,5; 9,8 м из железобетонных тьюбингов. Сооружение камер большого сечения и части притоннельных сооружений выполняется горным способом в монолитных и сборно-монолитных обделках.

По периметру машинного зала ограждающие конструкции подземного вестибюля и пешеходных переходов, расположенные в непосредственной близости от зданий, выполняются методом «стена в грунте», в остальных случаях используется металлический шпунт.

Последовательно сооружается верхняя часть наклонного хода, машинный зал, пешеходные переходы, выполняемые в монолитных конструкциях. Крепление котлованов производится металлическими поясами с расстрелами из труб.

Определение напряженно-деформированного состояния обделки переходного коридора

Переходной коридор, соединяющий нижний зал станции «Спортивная» с эскалаторным тоннелем второго вестибюля станции, располагается в протерозойских глинах. В качестве основной несущей конструкции принята обделка из железобетонных блоков с наружным диаметром 7,9 м, внутренним — 7,2 м. Напряженно-деформированное состояние массива и обделки



Нормальные тангенциальные напряжения в обделке переходного коридора

№ кольца	Напряжения, МПа			
	Левая сторона		Правая сторона	
	В спинке	В ребре	В спинке	В ребре
Участок №1				
146	14,9	8,7	12,1	22,1
147	12,8	9,9	10,4	11,4
148	7,1	13,3	6,3	10,7
$\sigma_{\max} = 22,1$ МПа; $\sigma_{\text{сред}} = 11,6$ МПа				
Участок №2				
234	18,5	12,6	13,8	10,1
235	13,4	12,6	8,9	9,6
236	12,4	10,7	13,5	4,1
$\sigma_{\max} = 18,5$ МПа; $\sigma_{\text{сред}} = 11,7$ МПа				
Участок №3				
262	9,3	9,5	4,6	15,1
263	8,7	11,8	4,3	16,7
264	11,6	11,9	17,9	6,6
$\sigma_{\max} = 17,9$ МПа; $\sigma_{\text{сред}} = 10,7$ МПа				

тоннеля оценивается по нормальным тангенциальным напряжениям в тунингах обделки. По длине переходного коридора датчиками оснащены три опытных участка. Каждый опытный участок состоит из трех следом идущих колец, включающих в себя тунинги, в которых были размещены струнные деформометры (рис. 3). Датчики для определения нормальных тангенциальных напряжений располагаются на внешнем и внутреннем контурах.

Анализ формирования напряженно-деформированного состояния обделки переходного коридора показал, что 60% усилий в обделке реализуется в те-

Рис. 4. Схема размещения датчиков в обделке эскалаторного тоннеля (а) и характерный график формирования усилий во временной крепи (б).

чение одного месяца после возведения обделки. Рост напряжений продолжается в течение всего периода наблюдений (20 месяцев), но при этом, даже в условиях взаимного влияния с другими подземными сооружениями (в отдельных случаях), по всем опытным участкам напряжения на внешнем и внутреннем контурах являются сжимающими (см. таблицу), что свидетельствует о качественном заполнении заобделочного пространства по всему периметру.

Определение напряженно-деформированного состояния обделки эскалаторного тоннеля

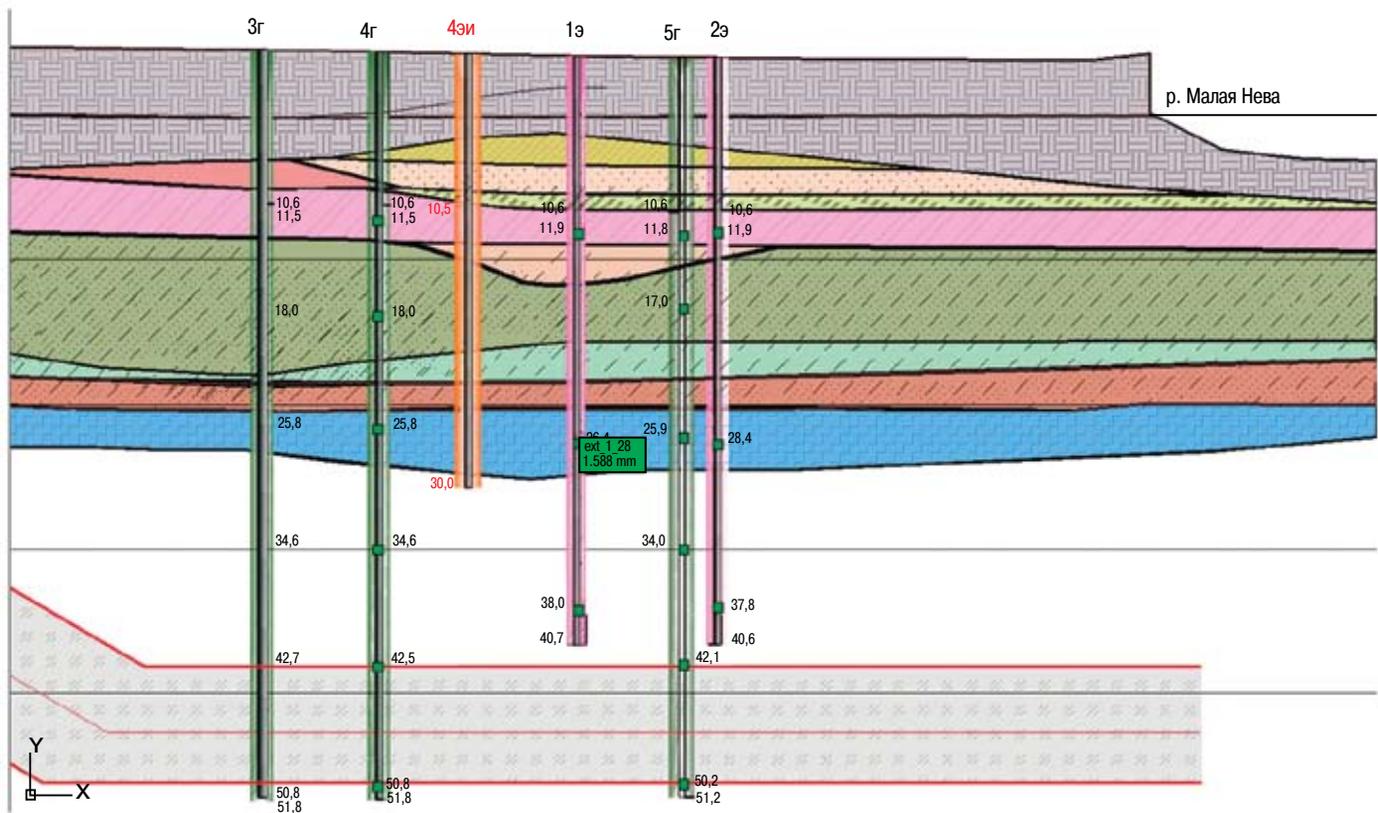
В геологическом строении по трассе эскалаторного тоннеля принимают участие четвертичные и коренные породы.

Четвертичные образования представлены современными, верхнечетвертичными, верхнесреднечетвертичными и среднечетвертичными осадками, коренные отложения — верхнепротерозойские глины.

Разработка грунта выполнялась отбойными молотками с технологической тележки. Погрузка разработанного грунта осуществлялась экскаватором KAISER на скреповый конвейер, по которому он выдавался на поверхность. После разработки всей породы заходки выполняли монтаж кольца временного крепления из двутавра №36 (шаг между кольцами составляет 0,75 м). Набрызгбетонирование на всю высоту двутавра в межрамном пространстве выполняли послойно в несколько этапов.

По длине эскалаторного тоннеля датчиками оснащены три опытных участка временной крепи в различных инженерно-геологических условиях. На каждом опытном участке датчики для определения нормальных тангенциальных напряжений расположены в четырех узлах (рис. 4) на внешнем и внутреннем контуре.

В соответствии с полученными измерениями изменение напряженного состояния временной крепи



происходит до возведения постоянной обделки. Максимальные величины напряжений составили 11,0 МПа в набрызг-бетоне и 113 МПа в стальной арке.

Постоянную монолитную железобетонную обделку выполняли после проходки тоннеля на всю длину. Контрольно-измерительная аппаратура показала, что усилия в обделке являются весьма незначительными, не более 2 МПа. Горное давление воспринимается аркобетонной крепью.

Определение деформации грунтового массива глубинными экстензометрами и контроль гидростатического давления

Оценить влияние технологии строительства комплекса подземных инженерных сооружений на деформации вмещающего массива, начиная от непосредственной близости к контуру тоннеля и заканчивая дневной поверхностью, позволяет система глубинных реперов — экстензометров, устанавливаемых в предварительно пробуренные скважины (рис. 5). Получаемые величины деформаций в непосредственной близости к контуру тоннеля дают возможность внести корректировку в технологию ведения подземных работ или применить дополнительные мероприятия по уменьшениям деформаций для сохранения существующей застройки.

Проходка подземных сооружений, над которыми расположены экстензометры, вызвала вертикальные деформации массива приконтурной зоны тоннеля, составившие 50 мм. Но уже на глубине 11 м от дневной поверхности они составляли только 5 мм. Процесс пере-

Схема расположения скважин с экстензометрами (1э и 2э) и датчиками гидростатического давления (3г, 4г и 5г)

распределения осадок грунтового массива от нижних слоев грунтового массива к верхним стабилизировался уже через 1 месяц после проходки.

За весь период наблюдений (август 2013 — декабрь 2014 года) гидростатические давления и соответствующие им уровни приповерхностного водоносного горизонта, приуроченного к озерно-морским отложениям, практически не изменялись. Воды этого горизонта разгружаются в Малую Неву, поэтому колебания уровней определяются режимом ежесуточных колебаний уровней реки при среднегодовом положении на отметке, близкой к ± 0 м. Зафиксированная стабильность гидродинамического режима приповерхностного водоносного горизонта позволяет сделать важный вывод о том, что выполненные горные работы не повлияли на условия эксплуатации зданий на земной поверхности и инженерных коммуникаций.

Мониторинг зданий, попадающих в зону возможной деформации при строительстве комплекса сооружений

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций зданий используется стационарная система мониторинга строительных конструкций. Места установки измерительных датчиков (трещиномеров и наклономеров) были приняты после выполнения первого цикла визуального мониторинга всех зданий, попадающих в зону влияния строительства. Трещиномеры были установлены, как правило, на существующие трещины, имеющие распространение не только

по отделочному слою, а и на несущие конструкции, что определялось при помощи тепловизора. Высокоточные измерители углов наклона (наклономеры), предназначенные для измерения наклона и прогиба конструкций сооружения относительно вертикальной оси (отвесной линии) в двух направлениях, были установлены на крышах зданий. Измерения по датчикам выполнялись в автоматизированном режиме с передачей данных на удаленный интернет-портал.

Наблюдения в течение почти двух лет показали, что величины раскрытия трещин в целом зависят лишь от изменения температурного режима. Амплитуда раскрытия — закрытия трещин достигает 2 мм. При этом возврата к первоначальному состоянию не происходит. Накопленная за все время измерений величина раскрытия трещин без учета температурных факторов составляет до 0,5 мм. При этом по фасадам зданий и по внутренним конструкциям раскрытия трещин, связанного с производством работ, не наблюдается. Углы наклона зданий относительно вертикальной оси стабильные, изменение угла наклона зданий не превышает точности измерений установленной аппаратуры.

Экологический мониторинг при строительстве решал следующие задачи:

- оценку воздействия на атмосферный воздух вредных выбросов от работы машин и оборудования, а также от различных технологических процессов, используемых при строительстве;

- оценку шумового воздействия технологических процессов на окружающую среду;
- оценку вибрационного воздействия на здания и сооружения на границе зоны жилой застройки;
- определение химического состава стоков воды с площади строительной площадки и воды, направленной в канализационные сети;
- определение химического состава почв и грунтов, образующихся при ведении земляных и проходческих работ.

Ежемесячный контроль перечисленных показателей свидетельствует об отсутствии негативного влияния строительства. При замерах шумового и вибрационного воздействия было определено, что превышение относительно допустимых величин происходит только за счет транспортного потока.

После проходки подземных сооружений по рассмотренной технологии деформации поверхности составили 15–20 мм. Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют с уверенностью говорить о том, что даже в крайне неблагоприятных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга осадки земной поверхности и нарушения зданий, попадающих в зону мульды сдвижения, могут быть минимизированы с помощью современных технологий строительства и крепления подземных сооружений, а горно-экологический мониторинг должен быть элементом технологического процесса строительства подземных сооружений.



проектировщики и специализированная мониторинговая геодезическая компания. К чести метростроителей, за все время работ не произошло ни одной просадки.

Чтобы не допустить обводнения грунтов в зоне проведения работ и обеспечить сохранность зданий по всему периметру будущего котлована, был выполнен комплекс ограждающих конструкций «стена в грунте». Железобетонная конструкция толщиной 650 мм сооружалась на глубину 23 м. Параллельно шли работы по закреплению грунта методом струйной цементации. И только когда были проведены защитные мероприятия, строители приступили к разработке грунта котлована.

— Для решения поставленной задачи нам приходилось четко придерживаться технологического процесса, — комментирует наш собеседник. — Постепенно опускаясь вниз, мы фиксировали стенки конструкции поясами временных металлических креплений, которые распирала трубами большого диаметра. Затем, по мере выполнения работ по бетонированию, временные конструкции демонтировались.

В процессе работы выяснилось, что этот участок территории еще царские инженеры когда-то отводили у реки — в грунте обнаружилось большое количество деревянных свай диаметром 300–400 мм, которыми был укреплен невский берег. Несмотря на минувшие столетия, бревна хорошо сохранились, и это существенно осложняло разработку грунта.

По наклонной плоскости

Наш «гид», Роман Орел, продолжает техническую экскурсию. Мы пересекаем строительную площадку и спускаемся под землю. Здесь полным ходом идет отделка вестибюля. Проходим дальше, и перед нами ярким пятном высвечивается громадная мозаика с изображением греческих богов — второй вестибюль будет выполнен в том же стиле, что и первый. Из-под мозаичной картины

вниз по косой уходят лестницы эскалаторов, растворяясь в темноте провала.

Технология сооружения наклонного хода на этом объекте — новая для Петербурга. И хотя монолитную обделку строители уже однажды применяли при сооружении станции «Звенигородская», метод набрызг-бетонирования для устройства временной крепи применяется метростроителями впервые. Арка временного крепления состояла из 21 сегмента двутаврового очертания, которые собирались на болтовых соединениях, а в продольном направлении стыковались металлическими уголками. После монтажа межарочное пространство бетонировалось в несколько этапов с тележки КШН (комплекс шахтный наклонный), с помощью которой велась проходка. Сначала, чтобы прихватить грунт, выполнялся первичный набрызг толщиной 60 мм. Бетонный состав подавался под давлением сквозь затяжку, выполненную из арматурных стальных стержней и металлической сетки, заполняя все пустоты между грунтом и обделкой. Следом шла вторая технологическая телега с установленной телескопической стрелой «Олива», с помощью которой тем же методом поэтапно наращивалась толщина временной обделки до 360 мм, соответствующих сечению двутавровой балки.

Чтобы отгружать разработанный в наклонном ходе грунт, инженеры предложили сложную технологическую цепочку. Из забоя порода отгружалась в скребковый конвейер, который монтировался по ходу продвижения проходки вдоль временной обделки наклонного хода. Далее первичный грунт переносился в перегрузочный бункер, находящийся в стартовом котловане. Из этого промежуточного отвала грейферный экскаватор с телескопической стрелой с 19-метровой глубины поднимал землю в верхний скребковый конвейер, который уже доставлял породу в зону погрузки автотранспорта.

После бетонирования плоскость временной крепи затиралась водонепроницаемым штукатурным слоем, поверх которого напылялась двухкомпонентная битумно-



латексная эмульсия с солевым составом. Для сооружения постоянной обделки из стержней сечением 32 мм длиной по 8,5 м необходимо было смонтировать металлический каркас. Чтобы при монтаже не повредить гидроизоляционный ковер, имеющий толщину всего 8 мм, необходимо было выполнить защитный слой. С этой целью лотковую часть покрыли нетканым иглоупорным материалом, после чего закрыли стяжкой цементного раствора. Однако на своде тоннеля такой материал закрепить не представлялось возможным, поэтому был устроен еще один слой гидроизоляционной штукатурки.

Сбойка между веерной частью наклонного хода и натяжной камерой, где теперь установлен затвор для герметизации тоннеля на случай подтопления, произошла год назад. 3 февраля 2014 года Петроградская сторона и Васильевский остров соединились подземным, а точнее, подводным тоннелем.

Проходка вручную

Финские и датские коллеги, посетившие стройку летом 2014 года, были изрядно удивлены, обнаружив, что проходка тоннеля под Малой Невой осуществлялась без применения щита. Однако этому есть объяснение — такое техническое решение помогло сэкономить время и сократить стоимость работ. Так, например, только процесс монтажа и демонтажа проходческого щита мог бы занять порядка шести месяцев, а с учетом крайней ограниченности пространства он попросту был невозможен. К тому же диаметр тоннеля не постоянен: на участке между траволаторами и в зонах электрощитовых камер сечение увеличивается с 7,9 до 9,8 м. Щит бы здесь не справился. В этой связи было решено отказаться от механизированной проходки, и тоннель, протяженностью 300 м, всего за год был пройден практически вручную, с применением средств малой механизации.

ПОДЗЕМНЫЕ ГОРИЗОНТЫ №4. Март/2015

Сооружение горизонтальной части перехода началось на правом берегу реки, со стороны действующей станции. Крепление тоннеля осуществлялось железобетонными тубингами. Лоб забоя фиксировался деревянной крепью, после чего при помощи отбойных молотков выработывался грунт, а затем тубингоукладчик приступал к монтажу кольца. Для обделки одного сегмента тоннеля диаметром 7,9 м строители выкладывали 14 тубингов, при диаметре 9,8 м их число увеличилось до 17. В среднем на установку одного кольца требовалось около суток. После закрепления кольца шпильками выполнялось первичное нагнетание — заполнение пустот цементно-песчаной смесью. Затем для герметизации и заполнения мелких пор шло контрольное нагнетание водным раствором цемента.

Немецкие эскалаторы для петербургских пассажиров

Когда строители рассказывают о ходе реализации проекта «Спортивная-2», часто повторяют слово «впервые». Впервые в петербургском метрополитене установлено немецкое эскалаторное оборудование. Впервые смонтирован траволатор. Впервые эскалаторами оборудованы выходы из вестибюля, ведущие на поверхность.

В проекте, разработанном ОАО НИПИИ «Ленметро-гипротранс», учтены актуализированные нормативные требования, одно из которых предписывает устанавливать в эскалаторном тоннеле четыре нитки эскалаторов, а не три, как это было ранее. Эскалаторное оборудование с заданными параметрами производит всего несколько заводов в мире, и один из них, концерн ThyssenKrupp Elevator, был выбран по результатам исследования этого рынка.

Всего на объекте будет установлено 6 траволаторов — два участка по три нитки в каждом, 4 эскалатора наклонного хода и 4 малых эскалатора для двух пешеходных переходов.