

СТРОИТЕЛЬСТВО ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

К. П. Безродный, М. О. Лебедев, Г. Д. Егоров, ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург



Тоннели и станции Санкт-Петербургского метрополитена располагаются в плотных протерозойских и кембрийских глинах. Выше находятся водонасыщенные четвертичные отложения. Эскалаторные тоннели пересекают эти грунты. На сегодняшний день реализовано несколько способов сооружения этих тоннелей и конструкций обделок для снижения деформаций дневной поверхности. Классическим способом строительства эскалаторных тоннелей для Санкт-Петербурга является способ замораживания водонасыщенных грунтов для их стабилизации. Крепление выполняется сборной тубинговой обделкой. Разработка малоосадочных технологий строительства позволила реализовать метод комплексной стабилизации грунтов с закреплением грунта методом струйной технологии и замораживания в пределах закрепленных грунтов, проходку эскалаторных тоннелей при помощи тоннелепроходческого механизированного щита с грунтовым пригрузом забоя, а также строительство под защитой «стены в грунте» в сочетании с методом струйной цементации.

Инженерно-геологические условия строительства Петербургского метрополитена считаются сложными. С поверхности мощностью до 40 м расположена толща четвертичных водонасыщенных отложений. Грунты чрезвычайно неустойчивы. Под четвертичными отложениями находится мощный слой плотных сухих протерозойских глин, в которых строятся перегонные тоннели и станционные узлы.

Существующие в XX в. технологии строительства станционных узлов метрополитена и наклонных эскалаторных тоннелей приводили к значительным деформациям вышележащей толщи грунта и расположенных на ней зданий и сооружений, приводящим иногда к нарушению конструкций и к полному выводу сооружений из эксплуатации.

Осадки земной поверхности над тоннелями

Рассмотрим особенности решения проблем, связанных с технологией строительства эскалаторных тоннелей, для такого мегаполиса, которым является Санкт-Петербург. Опыт строительства метрополитена свидетельствует о том, что наибольшее влияние на величину осадок дневной поверхности при использовании традиционной («классической») технологии, основанной на методе контурного рассольного замораживания, оказывало строительство эскалаторных тоннелей с разработкой забоя вручную (отбойными молотками) и креплением сборной обделкой из чугунных тубингов. Эта технология (замораживание грунта) приводила к деструктуризации грунта, что обычно сказывалось на увеличении осадок при его оттаивании уже после завершения проходки. В

процессе пассивного замораживания наблюдались значительные деформации обделки пройденного участка тоннеля и поднятие поверхности над ним на величину до 40–60 мм (рис. 1). После завершения работ по первичному и контрольному нагнетанию за обделку процесс замораживания прекращался. Во время оттаивания ледопородного цилиндра, сформировавшегося при замораживании, происходили значительные деформации обделки тоннеля и осадки земной поверхности. Максимальные величины деформаций дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей по рассмотренной технологии составляют 550 мм. В отдельных случаях деформации достигали 900–1000 мм. Следствием этого являлись значительные повреждения и разрушения существующих зданий и сооружений.

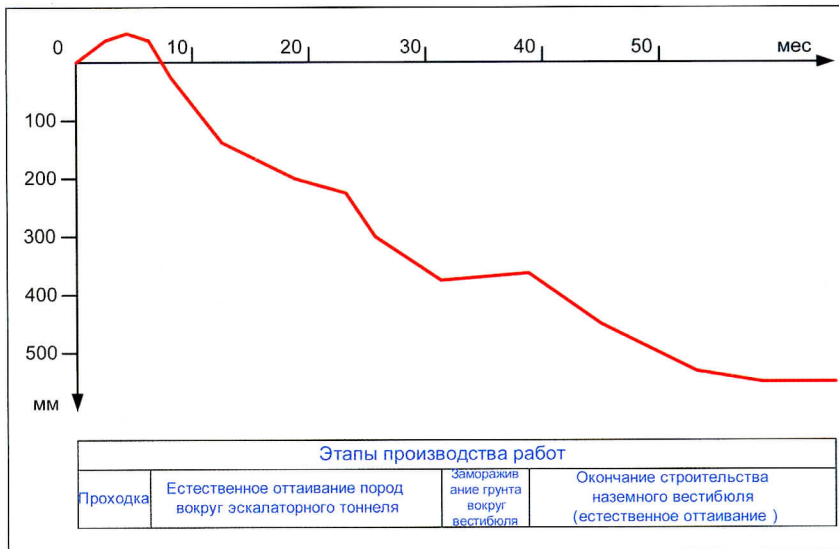


Рис. 1. Динамика деформаций дневной поверхности при строительстве эскалаторного тоннеля с заморозкой всей толщи четвертичных отложений. Обделка тоннеля сборная из чугунных тубингов

Снижение влияния технологических процессов, сопровождающих строительство метрополитена, на состояние земной поверхности и связанную с этим сохранность зданий и сооружений имеет уникальное культурно-историческое значение. В некоторых случаях отсутствие технологического решения для снижения деформаций дневной поверхности откладывало на десятилетия строительство объектов метрополитена в исторической части Санкт-Петербурга.

Комбинированная технология с малой осадкой

Наиболее перспективным направлением решения этих проблем следует считать разработку малоосадочных технологий строительства выработок метрополитенов и внедрение конструктивных параметров их крепления, обеспечивающих минимизацию воздействия процессов строительства на деформации дневной поверхности.

Значительные смещения земной поверхности при использовании рассольного замораживания инициировали поиск и проверку новых технологий закрепления грунтового массива при сооружении эскалаторных тоннелей. Одной из таких технологий является 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 (рис. 2) наклонными скважинами, перекрывающее возможные «окна» в цементном камне. Замораживание выполнялось из расчета недопущения выхода контура заморозки за

пределы закрепленного массива для обеспечения минимальных деформаций в процессе замораживания и последующего оттаивания. Разработка забоя осуществлялась экскаватором и отбойными молотками. Крепление тоннеля выполнялось в два этапа. При проходке возводилась временная обделка, представленная стальными арками из двутавра и заполнением межрамного пространства тяжелым бетоном. После проходки на всю длину, на временную обделку наносилась обмазочная гидроизоляция и возводилась постоянная монолитная железобетонная обделка.

Эффективность использования предлагаемой комбинированной технологии была подтверждена сопоставлением данных экспериментальных исследований деформаций дневной поверхности с «классической» технологией. Данные измерений (рис. 3) пока-

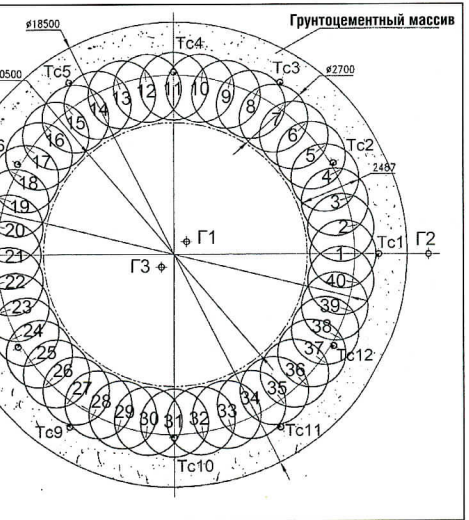


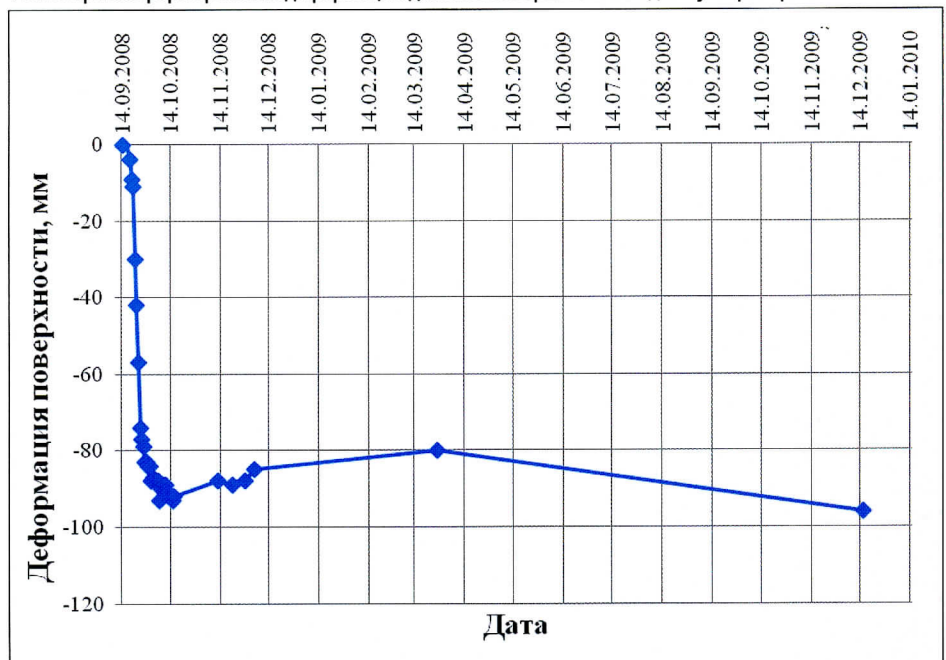
Рис. 2. Проектное закрепление вмещающего тоннель массива: 1–40 – замораживающие скважины; Тс1–Тс12 – наблюдательные термометрические скважины; Г1–Г4 – гидрогеологические скважины

зали, что при использовании комбинированной технологии смещения земной поверхности были в 5 раз меньше.

Наиболее эффективной для минимизации деформаций дневной поверхности показала себя схема строительства 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 90-х гг. XX в. 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 эскалаторного тоннеля выполняется «стена в грунте» из монолитного

Рис. 3. Кривая формирования деформаций дневной поверхности по одному из реперов



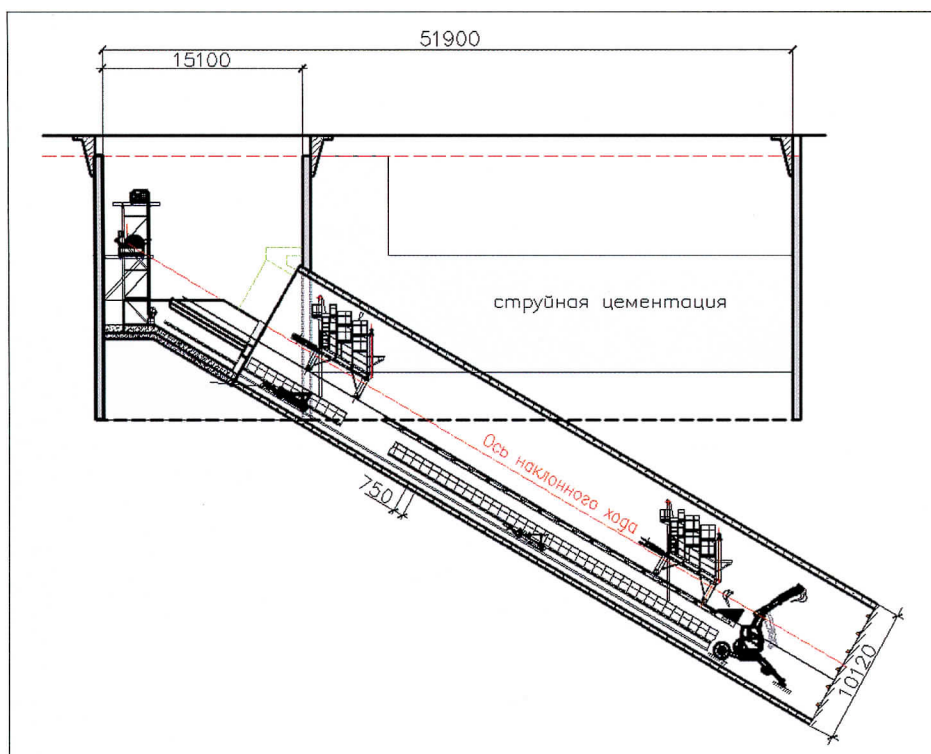


Рис. 4. Сооружение эскалаторного тоннеля под защитой «стены в грунте» и закрепления грунтов струйной цементацией

железобетона (рис. 4). Внутри контура, ограниченного «стеной в грунте» ниже горизонтального диаметра сооружаемого тоннеля, выполняется закрепление грунтов методом струйной цементации.

Проходка эскалаторного тоннеля ведется с механизированной разработкой забоя экскаватором и возведением временной аркобетонной крепи (установка кольцевых арок из двутавра и заполнением межарочного пространства набрызг-бетоном). Возведение постоянной обделки начинается после проходки тоннеля с временной крепью на всю длину. По внутренней поверхности временной крепи наносится обмазочная гидроизоляция. Возведение постоянной обделки начинается с монтажа арматур-

ных 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».

Проходка эскалаторного тоннеля по рассмотренной технологии закончена в декабре 2013 г., при этом деформации поверхности составили 15–20 мм.

К сожалению, данная схема строительства имеет ограниченное применение в условиях Санкт-Петербурга – сравнительно незначительной мощностью четвертичных отложе-

ний. Для рассмотренных условий мощность четвертичных отложений составила 20 м при средней величине по Санкт-Петербургу 40 м.

Механизированная технология с ТПМК

Другое направление снижения осадок дневной поверхности при сооружении эскалаторных тоннелей связано с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), представляющих собой комплекс с системой грунтопригруза, способной поддерживать забой, уравнивая давление грунта и воды, а также воздействовать на грунт посредством нагнетания химических реагентов. ТПМК производства немецкой фирмы «Херренкнехт АГ» были применены для строительства эскалаторных тоннелей станции «Обводный канал» (рис. 5), «Адмиралтейская» и «Спасская».

Эскалаторный тоннель выполнен в сборной железобетонной обделке диаметром 10,4 м (см. рис. 5), толщина блоков 500 мм. Блочная железобетонная обделка – из водонепроницаемого бетона с резиновым уплотнением стыков. Для монтажа обделки использовался эректор. Соединение элементов кольца между собой и с ранее установленным кольцом осуществлено болтами. Заобделочное пространство заполнялось специальным водонепроницаемым двухкомпонентным быстротвердеющим раствором, смешивание которого осуществлялось в момент его нагнетания.

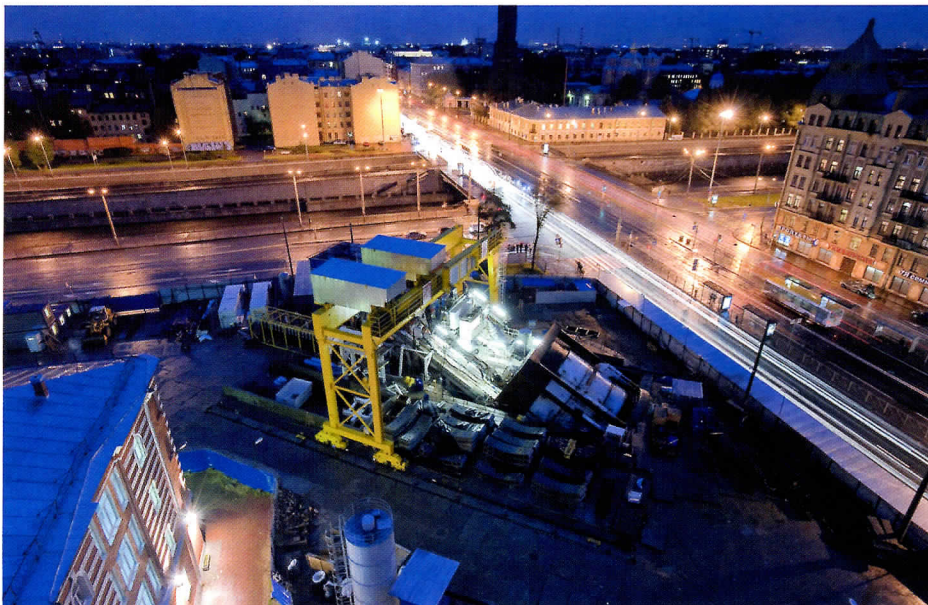
Совершенствование технологии сооружения эскалаторных тоннелей с помощью ТПМК позволило добиться значительного снижения величины осадок дневной поверхности с 95 мм на станции «Обводный канал» до 46 мм на станции «Адмиралтейская» и 25 мм на станции «Спасская» (рис. 6).

Результаты выполненных исследований показывают, что даже в крайне неблагоприятных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга негативное воздействие на осадки земной поверхности и связанный с этим процесс разрушения зданий, попадающих в зону мутьды сдвига, может быть снижено с помощью предлагаемых технологий сооружения и конструкций обделок наклонных эскалаторных тоннелей.

Во всех случаях при строительстве эскалаторных тоннелей проводили геотехнический мониторинг, в состав которого кроме контроля деформаций дневной поверхности входило определение напряженно-деформированного состояния системы «обделка – грунтовый массив». Для этого обделка тоннеля оснащалась контрольно-измерительной аппаратурой для определения усилий в обделке. В грунтовом массиве в предварительно пробуренных вертикальных скважинах размещались датчики контроля гидростатического давления и экстензометры для контроля напряженно-деформированного состояния массива от контура тоннеля до дневной поверхности.

Для оперативного отслеживания процессов, происходящих в контролируемом грунтовом массиве, зданиях на дневной поверхности, попадающих в зону влияния строительства, и

Рис. 5. Начало проходки эскалаторного тоннеля станции «Обводный канал»



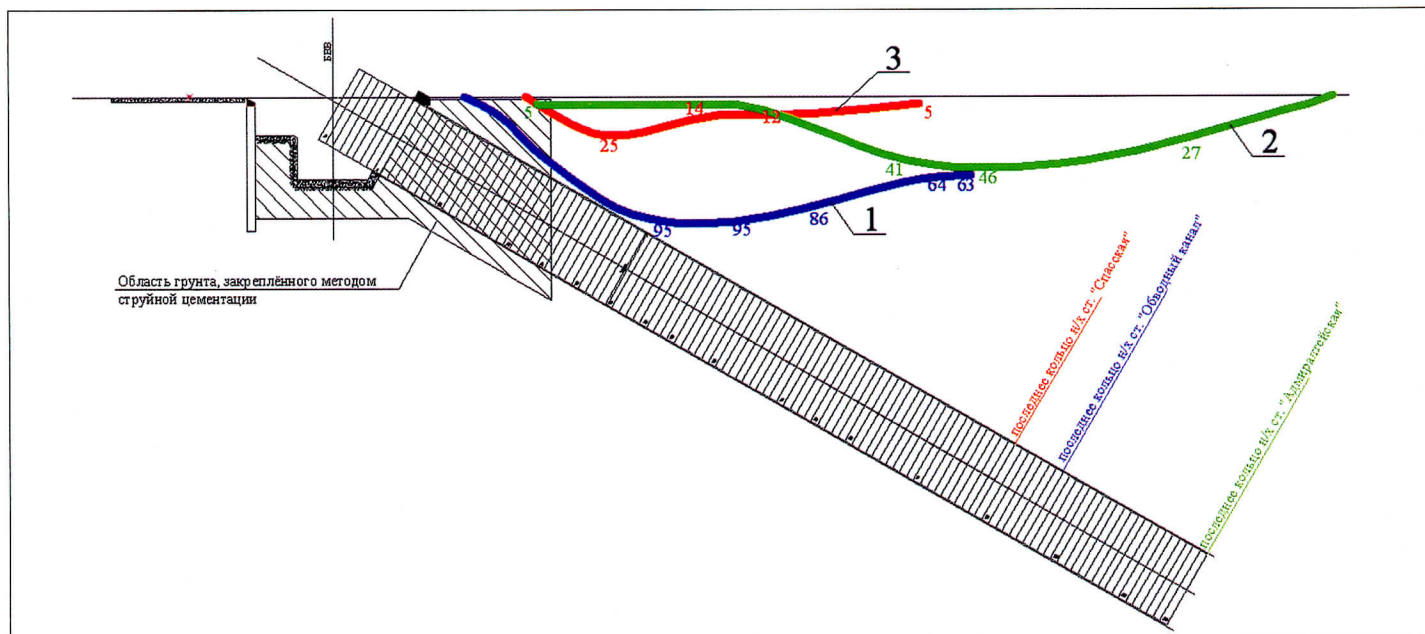


Рис. 6. Деформации дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей щитовым способом, мм: 1 – ст. «Обводный канал», 2 – ст. «Адмиралтейская», 3 – ст. «Спасская»

своевременного учета полученных результатов мониторинга в корректировке технологических параметров проходки подземных сооружений были использованы автоматизированные системы мониторинга.

Применение автоматизированной системы мониторинга грунтового массива позволило полностью контролировать динамику развития деформационных процессов (рис. 7) и изменение его напряженного состояния по датчикам гидростатического давления. Причем одновременное наблюдение за положением стержней экстензометров, установленных на разных глубинах, сделало возможным отследить распространение фронта вертикальных деформаций от контура тоннеля до дневной поверхности. На основе результатов мониторинга принимались решения о проведении работ по компенсационному нагнетанию в основание зданий, попавших в зону влияния строительства эскалаторного тоннеля станции «Адмиралтейская».

Использование современных автоматизированных систем геотехнического мониторинга грунтового массива (в комплексе с традиционными методами контроля) при проходке подземных сооружений различного назначения, особенно в условиях городской застройки, является эффективным элементом технологического процесса, позволяющим значительно снизить риски возникновения аварийных ситуаций и повысить эффективность защитных геотехнических мероприятий.

Измерение усилий в сборной железобетонной обделке эскалаторных тоннелей показало, что в среднем нормальные тангенциальные напряжения составляют около 5,3 МПа при максимальных значениях 15,3 МПа. По всему периметру обделки на внешнем и внутреннем контуре напряжения, как правило, сжимающие. Напряжения вдоль оси тоннеля незначительны – 0,8–0,9 МПа.

Применение временной кольцевой крепи из двутавра с заполнением межрамного про-

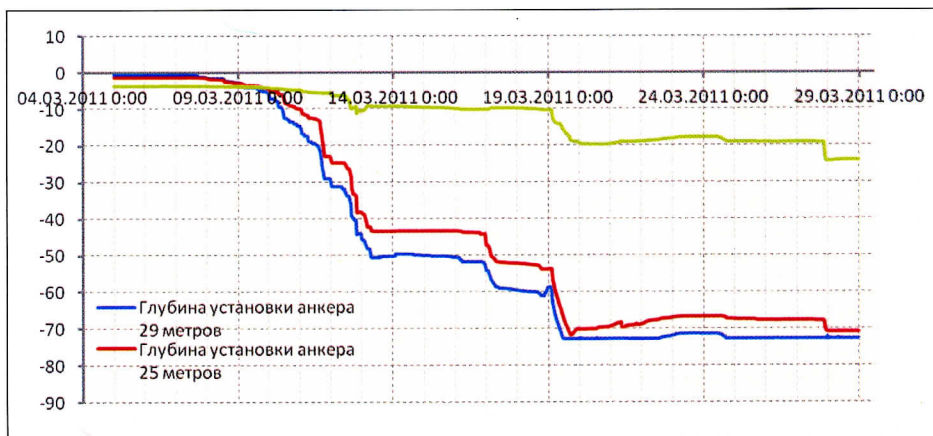


Рис. 7. Кривые формирования деформаций массива по одной из скважин, отражающие все операции технологического цикла

странства бетоном или набрызг-бетоном исключает из работы постоянную монолитную железобетонную обделку. Исследования формирования напряженно-деформированного состояния обделок при строительстве эскалаторных тоннелей на станциях «Звенигородская» и «Спортивная-2» показали, что постоянная обделка воспринимает усилия только от собственного веса.

Заключение

Полученные результаты напряженно-деформированного состояния системы «обделка – грунтовый массив» были сопоставлены с расчетными величинами, вычисленными методами механики сплошной среды. Сопоставление показало, что при применяемых технологиях и конструкциях в данных инженерно-геологических условиях расчеты методами механики сплошной среды отражают реальную работу обделок подземных сооружений с вмещающим массивом. Внедряемые малоосадочные технологии строительства метрополитена позволили на порядок и более снизить осадки дневной поверхности по сравнению с класси-

ческой технологией строительства эскалаторных тоннелей методом замораживания.

Литература

1. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю., Лаптев Н. А., Морозов А. В., Уханов А. В. Геотехнический мониторинг сопровождения строительства эскалаторных тоннелей с помощью ТПМК // Метро и тоннели. – 2012. – № 1.
2. Маслак В. А., Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Захаров Г. Р., Ледаев А. П., Старков А. Ю. Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга // Метро и тоннели. – 2012. – № 6.
3. Безродный К. П., Маслак В. А., Марков В. А., Лебедев М. О., Старков А. Ю., Морозов А. В., Уханов А. В. Комбинированная технология стабилизации грунтов при сооружении эскалаторных тоннелей станций Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. – 2009. – № 5.
4. Старков А. Ю., Лаптев Н. А. Итоги проходки наклонного хода станции «Обводный канал» в Санкт-Петербурге // Метро и тоннели. – 2010. – № 1.