

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ СООРУЖЕНИИ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ

М.О. Лебедев¹, Г.Д. Егоров¹

¹ ОАО «Научно-исследовательский, проектно изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Аннотация: При строительстве эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена используется «классическая» технология с искусственным замораживанием грунтового массива. Максимальные осадки дневной поверхности при таком способе строительства наблюдались в процессе оттаивания грунтового массива и достигали 550 мм, а в отдельных случаях и 900–1000 мм. За последние 15 лет при строительстве эскалаторных тоннелей были применены две новые технологии, которые характеризуются малыми осадками дневной поверхности: с возведением ограждающих конструкций и с применением тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК). Деформации дневной поверхности не превышают 100 мм при первом (опытном) применении таких технологий и 20–25 мм при последующем применении. При сооружении эскалаторных тоннелей в рамках геотехнического мониторинга проводятся геотехнические исследования системы «обделка – грунтовый массив». Геотехнический мониторинг позволяет осуществить безопасное ведение работ по строительству эскалаторных тоннелей, корректировать технологические параметры строительства, конструкции крепей и обделок. Создаваемая база данных исследований позволяет анализировать результаты исследований для реализуемых технологий и конструктивных решений и вносить корректировку в последующие аналогичные проекты.

Ключевые слова: эскалаторный тоннель, новые технологии, геотехнический мониторинг, деформации, база данных.

Для цитирования: Лебедев М. О., Егоров Г. Д. Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 146–159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.

Geotechnical monitoring in construction of escalator tunnels

M.O. Lebedev¹, G.D. Egorov¹

¹ Open Joint Stock Company «Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetroprotrans», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Abstract: Construction of escalator tunnels in the Saint-Petersburg subway uses the ‘classical’ technology with artificial freezing of soil. With such method involved, the maximum subsidence of ground surface was observed in the period of soil thawing and reached 550 mm, and even 900–1000 mm sometimes. In the recent 15 years, the escalator tunnels were constructed using two novel technologies characterized with small subsidence of ground surface: with enclosing structures and with mechanized tunneling using tunnel boring machinery. The ground surface subsidence was not more than 100 mm in the first (pilot) application of the technologies and made 20–25 mm during subsequent applications. During construction of escalator tunnels, geotechnical monitoring

involves geotechnical survey of the lining–soil mass system. The geotechnical monitoring enables safe construction of escalator tunnels, with adjustment of process variables, or design of support and lining. The database created during the observations makes it possible to analyze the research finding in terms of the technologies and structural solutions in use, and to amend the next similar projects.

Key words: escalator tunnel, new technologies, geotechnical monitoring, deformation, database.

For citation: Lebedev M. O., Egorov G. D. Geotechnical monitoring in construction of escalator tunnels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):146-159. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.

Введение

Технологии строительства эскалаторных тоннелей, существующие в прошлом веке и применяемые при строительстве Санкт-Петербургского (Ленинградского) метрополитена, приводили к значительным деформациям толщи грунтового массива над тоннелем и расположенным на дневной поверхности зданиям и сооружениям.

Основным способом строительства являлось применение рассольного замораживания для стабилизации толщи совершенно неустойчивых водонасыщенных четвертичных отложений. Наклонные тоннели проходили с разработкой грунта отбойными молотками на полное сечение и устройством круговой обделки из чугунных тубингов. Следствием такой технологии являлись значительные деформации и нарушения конструкций сооружений на поверхности, частичный или полный их вывод из эксплуатации. Впоследствии такие сооружения подвергались капитальному ремонту или полному демонтажу.

Одна из станций Петербургского метрополитена — «Адмиралтейская», построенная в историческом центре Санкт-Петербурга, по причине отсутствия опыта применения альтернативных технологий строительства эскалаторных тоннелей с меньшими деформациями дневной поверхности в течение 15 лет не имела собственного выхода на поверхность, поезда на станции не останавливались.

Технологические схемы строительства эскалаторных тоннелей

Научные исследования, натурные измерения и опыт строительства показывают, что при использовании традиционной («классической») технологии наибольшее влияние на величину осадок грунтового массива и дневной поверхности оказывает рассольное замораживание по контуру выработки. В процессе замораживания происходит деструктуризация грунта, что обычно сказывается на увеличении деформаций грунтового массива при его оттаивании уже после завершения проходки. При строительстве эскалаторных тоннелей по «классической» технологии максимальные величины деформаций дневной поверхности составляют 550 мм, а в отдельных случаях достигают и 1000 мм [1].

В рамках поиска вариантов снижения осадок дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей в Санкт-Петербурге были реализованы новые технологии строительства: комбинированная технология стабилизации четвертичных отложений, технология с возведением ограждающих конструкций и механизированная технология с применением ТПМК с активным пригрузом забоя.

При комбинированной технологии стабилизации четвертичных отложений на первоначальном этапе выполнялось закрепление вмещающего эскалаторный тоннель грунтового массива Jet-сваями.

Грунтоцементное ограждение необходимой толщины создавалось с помощью рядов вертикальных скважин, расположенных вдоль оси тоннеля. Дополнительно, при первом применении комбинированной технологии (эскалаторный тоннель станции метро «Звенигородская»), было выполнено контурное замораживание наклонными скважинами для перекрытия возможных окон в цементном камне.

Непосредственно проходка тоннеля осуществлялась вручную отбойными молотками и экскаватором, при проходке возводилась временная обделка из стальных двутавровых арок, межрамное пространство заполнялось тяжелым бетоном. По внутреннему контуру временной обделки выполнялась обмазочная гидроизоляция и на следующем этапе возводилась постоянная обделка из монолитного бетона в направлении снизу вверх. При сравнении строительства эскалаторного тоннеля по новой технологии с «классической» технологией была подтверждена эффективность принятых решений — осадки дневной поверхности уменьшились в 5 раз и составили 100—110 мм.

При строительстве второго выхода со станции метро «Спортивная» устойчивость окружающего массива обеспечивалась при помощи «стен в грунте», заглубленной в плотные глины и возведенной по периметру эскалаторного тоннеля. Дополнительная цементация грунтового массива при этом выполнялась как внутри контура «стены в грунте», так и снаружи — по оси наклонного хода. Проходка эскалаторного тоннеля проводилась аналогично эскалаторному тоннелю станции метро «Звенигородская», за исключением применения набрызг-бетона для закрепления межрамного пространства при возведении временной обделки. Деформации дневной поверхности на момент окончания строительства составили 15—20 мм [2].

По похожей технологии были построены два эскалаторных тоннеля в Лондоне на станции «Liverpool Street», глубина заложения которой составляет 42 м [3]. Оба эскалаторных тоннеля располагаются в лондонских глинах и соединяют подземные вестибулы с уровнем платформы станции. При сооружении сначала пройден пилот-тоннель в калоттной части выработки. Далее пилот-тоннель был в два этапа разработан на полное сечение (эллипсообразной формы) с устройством временной крепи. Последним этапом сооружения стало возведение постоянной обделки с диаметром в свету 7,6 м по горизонтальной оси.

Горнопроходческие работы осуществлялись с использованием комбайна. Параметры крепей и обделок были выбраны по результатам геотехнических расчетов. Толщина временной крепи постоянная, и составляет 0,3 м. Крепь выполнена из набрызг-бетона с металлической фиброй. На участках сложной геометрии и сопряжений устраивались арматурные каркасы с укладкой набрызг-бетона без использования фибры. Толщина постоянной обделки достигает 1 м в шельге свода, а к бокам выработки она снижается до 0,25 м. Обделка тоннеля выполнена из набрызг-бетона с металлической фиброй, с включением полипропиленовой фибры для противопожарной защиты.

Аналогично наклонным ходам на станции «Liverpool Street», по такой же технологии был построен эскалаторный тоннель на станции «Whitechapel». Наклонный тоннель связывает новый кассовый зал станции с уровнем платформы, его устье находится на 19 м ниже дневной поверхности [4].

На станции «Victoria» Лондонского метрополитена [5] новый наклонный ход был построен в рамках реконструкции станции. Эскалаторный тоннель длиной 30 м был пройден в сложных условиях, в условиях плотной городской застрой-

ки, рядом с существующими подземными выработками, с их пересечением и частичной забутовкой. Работы велись без перерыва движения поездов по линии метрополитена. Для минимизации деформаций подземных сооружений и осадки рядом расположенных зданий (в том числе — театра) была применена предварительная Jet-цементация грунтового массива. Также в существующих тоннелях возводились подпорные конструкции и был регламентирован порядок разработки грунтового массива. По длине эскалаторного тоннеля первоначально была пройдена штольня со сплошным деревянным креплением. В местах пересечения с другими выработками были предварительно построены наклонные железобетонные пандусы.

Разработка тоннеля на полный профиль велась в шахматном порядке по частям, с последовательностью разработки грунта, принятой по результатам численного моделирования. Обделка устраивалась из набрызг-бетона с армированием фиброй. Профиль и сечения наклонного хода — переменные, по условиям проходки рядом с действующими тоннелями. После завершения строительных работ на станции были смонтированы три новых эскалатора.

Другим направлением снижения осадок при строительстве эскалаторных тоннелей является применение тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) с системой грунтопригруза забоя и воздействием на грунт в заобделочном пространстве путем нагнетания двухкомпонентного тампонажного раствора в процессе проходки. В Санкт-Петербурге с использованием ТПМК немецкой фирмы «Херренкнехт АГ» были пройдены три эскалаторных тоннеля. При проходке использовалась высокоточная сборная железобетонная обделка с продольными и поперечными связями, наружный диаметр обделки — 10,4 м, толщиной блока

500 мм, между блоков предусмотрено резиновое уплотнение стыков.

При первом применении данной технологии (станция «Обводный канал») величина осадок дневной поверхности составила 95 мм. На следующих эскалаторных тоннелях (станции «Адмиралтейская» и «Спасская») при совершенствовании и отладке технологии деформации грунтового массива не превысили 25 мм.

Применение ТПМК при сооружении эскалаторных тоннелей было опробовано и в Москве, где с помощью проходческого комплекса «Ловат» в 2008—2012 гг. были сооружены два наклонных хода на станции «Марьино роща» [6]. При проходке возникали различные технологические сложности, которые были успешно преодолены, но это сказалось на сроках сооружения тоннелей.

Комплексный геотехнический мониторинг эскалаторных тоннелей

При сооружения эскалаторных тоннелей как по «классической», так и по малоосадочным технологиям, в рамках геотехнического мониторинга проводятся исследования работы системы «обделка — грунтовой массив».

Геотехнический мониторинг включает в себя комплекс мероприятий, направленных на безопасное строительство и эксплуатацию конструкций наклонных ходов и окружающего массива, зданий и сооружений. При этом фиксируются негативные (техногенные и природные) воздействия на тоннель, определяются качественные и количественные показатели их влияния на обделку.

Особая важность мониторинга проявляется при сооружении объектов метрополитена в непосредственной близости от застройки, в исторической части городов и при пересечении трассами тоннелей автодорожных или железнодорожных магистралей.

Комплексный геотехнический мониторинг при строительстве эскалаторных тоннелей включает (рис. 1):

- контроль качества работ по закреплению грунтов и устройству ограждающих конструкций;
- инженерно-геологический и гидрогеологический прогноз впереди забоя наклонного хода методом сверхширокополосной георадиолокации;
- определение фактических деформационно-прочностных свойств вмещающего массива (метод сейсмоакустики);
- определение напряженно-деформированного состояния крепей и обделок;
- определение конвергенции внутреннего контура выработки;
- определение глубинных смещений массива экстензометрами;
- контроль деформаций (осадок) дневной поверхности;
- гидрогеологический мониторинг;
- визуальный и инструментальный мониторинг зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительства наклонного хода;
- определение величин допускаемых осадок и кренов (абсолютных и относительных), расчет деформаций зданий при ожидаемых осадках в процессе проходки, установление критериев компенсационных мероприятий;
- контроль качества выполненных работ по первичному и контрольному нагнетанию за обделку [7, 8].

Мониторинг зданий и сооружений ведется визуально, с помощью нескольких серий обследования (до начала, в процессе и после окончания строительства). В рамках инструментального мониторинга на здания устанавливаются контрольно-измерительная аппаратура, фиксирующая величины раскрытия трещин во времени и крены в различных направлениях. Проведение измерений возможно организовать в автоматическом режиме. Расчет деформаций зданий при ожи-

даемых осадках от процесса проходки проводится после определения мульды оседания от строительства наклонного хода и сопутствующих выработок. Поставленная задача обычно решается в трехмерной постановке методом конечных элементов (МКЭ).

Деформации дневной поверхности, попадающей в зону влияния горных работ, определяются высокоточными тахеометрами или кодовыми нивелирами путем серий работ по измерению вертикальных и горизонтальных смещений марок и деформационных реперов.

Контроль качества работ по закреплению грунтов и устройству ограждающих конструкций выполняется сейсмоакустическими исследованиями с поверхности или из специально устроенных скважин [9, 10].

Фактические деформативно-прочностные свойства грунтов, вмещающих тоннель, вычисляются по результатам сеймопрофилирования.

Напряженно-деформированное состояние обделки тоннеля и окружающего грунтового массива оценивается по нормальным тангенциальным напряжениям в блоках, тубингах или монолитных участках обделки, по продольным напряжениям, а также по смещениям блоков (тубингов) относительно друг друга. Определение напряжений по периметру обделки выполняется при помощи струнных деформометров, которые устанавливаются на опытных участках по длине эскалаторного тоннеля. Строятся зависимости величин напряжений от глубины заложения опытных участков по длине наклонного хода.

Конвергенция внутреннего контура выработки определяется лазерным дальномером или электронным тахеометром по установленным маркам и отражателям. Измерения проводятся в сечениях наклонного хода в горизонтальном, вертикальном и наклонных направлениях.

Другим вариантом контроля напряженно-деформированного состояния обделки и определения конвергенции контура обделки является применение волоконно-оптических систем мониторинга с измерительными кабелями или распределенными датчиками, которые закладываются в тело бетона в контрольных сечениях конструкции или закрепляются на внутреннем контуре [11].

Контроль качества нагнетания тампонажного раствора в заобделочное пространство проводится при помощи цифрового томографа. Работы проводятся после схода каждого из контролируемых колец с оболочки щита, по результатам исследований составляется развертка колец обделки с нанесенными пустотами и зонами некачественного нагнетания. Возможно проведение данных работ и другими методами георадиолокации.

Для определения гидростатического давления на разных горизонтах, а также изменений гидродинамических режимов водоносных пластов в процессе строительства, выполняется бурение наблюдательных скважин с установкой в них датчиков гидростатического давления. Бурение и оснащение скважин выполняется до начала строительства эскалаторного тоннеля, что позволяет определить основные гидродинамические закономерности на протяжении всех этапов производства строительных работ.

Сдвигения в грунтовом массиве определяют стержневыми экстензометрами. Экстензометры устанавливаются в скважины вдоль трассы наклонного хода на различных глубинах, чтобы контролировать деформации различных слоев грунтового массива. Сдвигения грунтового массива фиксируются как непосредственно от горнопроходческих работ по строительству тоннеля, так и от проведения мероприятий по усилению оснований зданий, которые выполняются при превышении установленных критериев

осадок и кренов оснований зданий. Проведение измерений глубинных смещений на период строительства возможно выполнять автоматизированным способом с передачей полученных данных на удаленный сервер.

Еще одной из важнейших задач геотехнического мониторинга при строительстве эскалаторных тоннелей является прогнозирование характера развития геомеханических процессов, возникающих при их сооружении. Для решения этой задачи применяются методы математического моделирования с использованием специализированных программных средств. Современные программные комплексы позволяют учесть при моделировании огромный комплекс параметров и факторов, участвующих в описании как технологии процесса, так и условий сооружения тоннеля. Выполняемое двухмерное или трехмерное моделирование позволяет получить данные о возможных деформационных процессах и зонах их распространения на всех этапах строительства [12].

Результаты геотехнического мониторинга при строительстве эскалаторных тоннелей

Одним из способов исследований в рамках научно-технического сопровождения строительства является определение напряженно-деформированного состояния постоянных несущих конструкций (крепей и обделок) тоннелей.

Контрольно-измерительная аппаратура устанавливается в нескольких сечениях крепи и обделки по длине наклонного хода (во всех литологических разностях, пересекаемых тоннелем). Далее, контролируя во времени как напряжения в конструкции на опытных участках, так и конвергенции внутреннего контура по всему тоннелю, можно построить корреляционные зависимости и определить напряжений для остальных участков тон-

неля, провести оценку несущей способности основной тоннельной конструкции.

Величины нормальных тангенциальных напряжений в кольцах обделки наклонных ходов, сооружаемых ТПМК с грунтовым пригрузом забоя («Обводный канал», «Адмиралтейская», «Спасская») не превышают величины 13 МПа в зоне четвертичных грунтов и 20 МПа в суглинках. Наибольшее развитие напряженно-деформированного состояния (до 80% от конечной величины) отмечается в момент схода обделки с оболочки щита и заполнения заобделочного пространства. Характерный график развития напряжений во времени приведен на рис. 2, а. Продольные напряжения в рассматриваемых тоннелях не превышали 7 МПа.

В обделке эскалаторного тоннеля станции «Спасская» растягивающих усилий в поперечном направлении зафиксировано не было. Но это стало возможным после корректировки технологических параметров ТПМК по строительству первых двух эскалаторных тоннелей на станции «Обводный канал» и «Адмиралтейская», при проходке которых в обделке фиксировались растягивающие напряжения.

Величины нормальных тангенциальных напряжений в аркобетонной крепи наклонных ходов станций «Звенигородская» и «Спортивная-2» не превышают 200 МПа (по металлу двутавровых балок) при средней величине в 60 МПа. Максимальное горное давление, соответствующее напряженно-деформированному состоянию колец из двутавров, составляет $8,85 \text{ т/м}^2$. Горное давление в зоне четвертичных грунтов не превышает $0,37$ от гравитационной составляющей (γH). В постоянной обделке (рис. 2, б) напряжения близки к нулю в верхних сечениях и не превышают 3 МПа на границе четвертичных отложений и плотных глин. Таким образом, крепь (временная обделка) полностью воспринимает горное

давление и имеет значительный запас несущей способности. На постоянную обделку передается незначительная часть горного давления, основная нагрузка в ней — собственный вес.

Применение глубинных скважинных экстензометров при строительстве эскалаторных тоннелей позволяет оценить необходимость компенсационного нагнетания и времени его начала для предотвращения опасных деформаций зданий, особенно при строительстве в историческом центре в условиях плотной городской застройки. По допущенным деформациям на контуре выработки можно дать прогноз будущих деформаций дневной поверхности и минимизировать их путем своевременного проведения компенсационных работ.

Помимо этого имеется и научная составляющая измерений — определение закономерностей деформирования толщи грунтового массива в процессе проходки, смещений в приконтурной зоне.

По результатам исследований составляются корреляционные зависимости и разрабатываются рекомендации по корректировке технологических параметров проходки для снижения деформаций грунтового массива. Измерения глубинных деформаций грунтового массива необходимо выполнять автоматизированными системами в режиме реального времени.

По результатам измерений имеется возможность оперативного принятия решений в случае приближения контролируемых параметров напряженно-деформированного состояния системы «тоннель — грунтовый массив» к критериальным величинам.

Система автоматизированного мониторинга глубинных деформаций грунтового массива с помощью цельноствержневых экстензометров впервые была применена при проходке наклонного хода станции «Адмиралтейская» в условиях плотной городской застройки и истори-

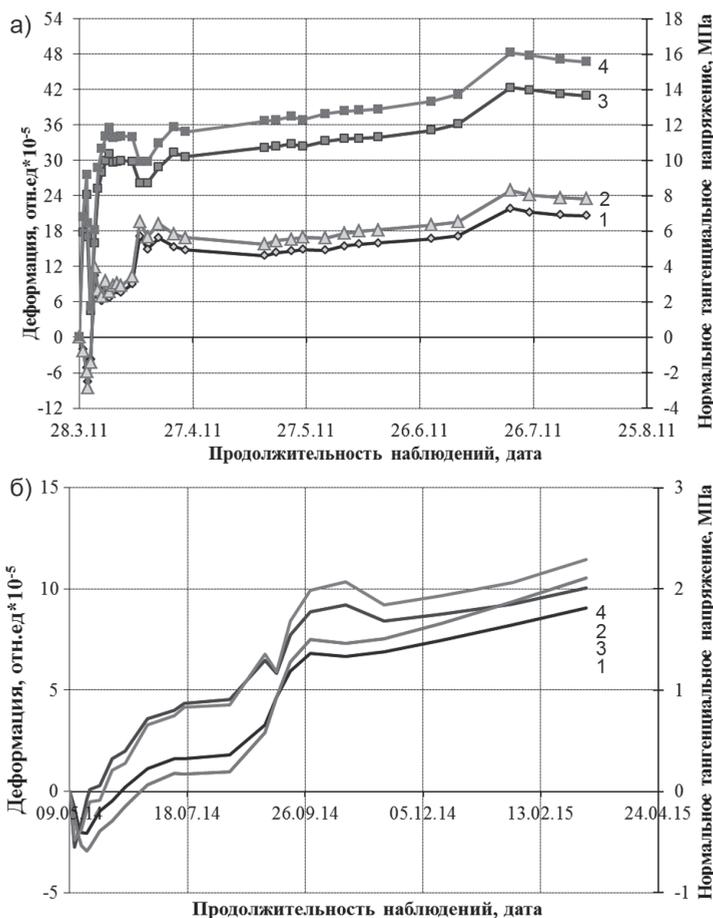


Рис. 2. Формирование напряженно-деформированного состояния обделки: сборной железобетонной (а); монолитной железобетонной (б); 1 – деформации на внешнем контуре обделки; 2 – напряжения на внешнем контуре обделки; 3 – деформации на внутреннем контуре обделки; 4 – напряжения на внутреннем контуре обделки

Fig. 2. Formation of stress-strain state of the lining: a – precast concrete; b – monolithic concrete; 1 – deformation on the outer contour of the lining; 2 – stress on the outer contour of the lining; 3 – deformation on the inner contour of the lining; 4 – stress on the inner contour of the lining

ческого центра. Максимальные осадки грунтового массива по результатам измерений составили 73 мм у контура выработки и 3 мм на глубинах до 10 м от уровня дневной поверхности. Общая осадка массива (с учетом осадок дневной поверхности) вблизи контура выработки составила 117 мм.

На рис. 3, а приведены кривые развития деформаций массива на разной глубине от поверхности Земли до контура тоннеля в период активного их изме-

нения. Было установлено, что деформации по двум нижним реперам в скважине начинаются перед ротором щита на расстоянии 2–3 м и составляют 5 мм. Деформации продолжают увеличиваться в течение всего времени движения щита под скважиной. Наибольшая скорость роста деформаций (≈ 10 мм/сут) отмечается в период монтажа колец непосредственно под сечением скважины Э2 и следующих двух колец, достигая к концу этого периода суммарной величи-

ны в 50 мм. Стабилизироваться деформации начинают только после монтажа 15 кольца за контролируемым сечением. Из полученных результатов следует, что развитие деформаций в массиве впереди ротора щита и до возведения обделки связано с недостаточным давлением активного пригруза забоя. Большая скорость роста деформаций над тоннелем при сходе обделки с оболочки щита и продолжающийся рост деформаций еще с отходом забоя на 15 м свидетельствуют о недостаточном заполнении

заобделочного пространства и наборе прочности тампонажного раствора.

На рис. 3, б видно изменение положения глубинных реперов при ведении компенсационных работ по манжетной технологии, осуществляемых для превентивного упрочнения грунтов основания здания. Подача раствора в грунты осуществлялась на глубинах 12–14 м с конечным давлением «отказа» 1,0–1,5 МПа.

Скважина с экстензометрами располагалась на расстоянии 20 м от места ведения работ. Нагнетание выполнялось

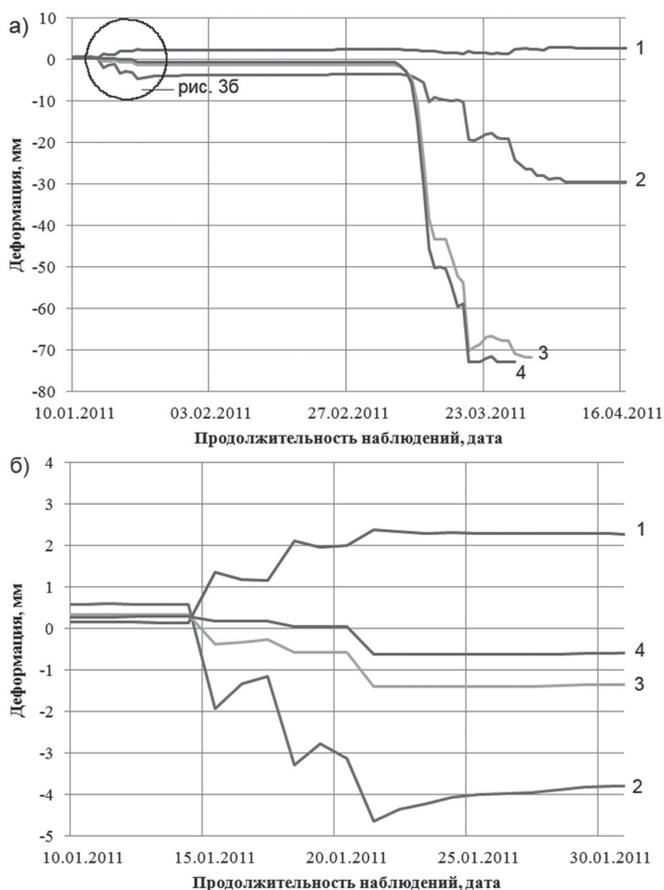


Рис. 3. Графики развития глубинных деформаций над осью наклонного хода по скважине Э2: в течение всего периода активных деформаций (а); в период выполнения компенсационных работ в основание здания (б); 1 — на глубине 9,5 м; 2 — на глубине 18 м; 3 — на глубине 25 м; 4 — на глубине 29 м

Fig. 3. Graphs of the development of deep deformations over the axis of the inclined course along the well E2: a — during the entire period of active deformations; b — during the compensation work at the base of the building; 1 — at a depth of 9.5 m; 2 — at a depth of 18 m; 3 — at a depth of 25 m; 4 — at a depth of 29 m

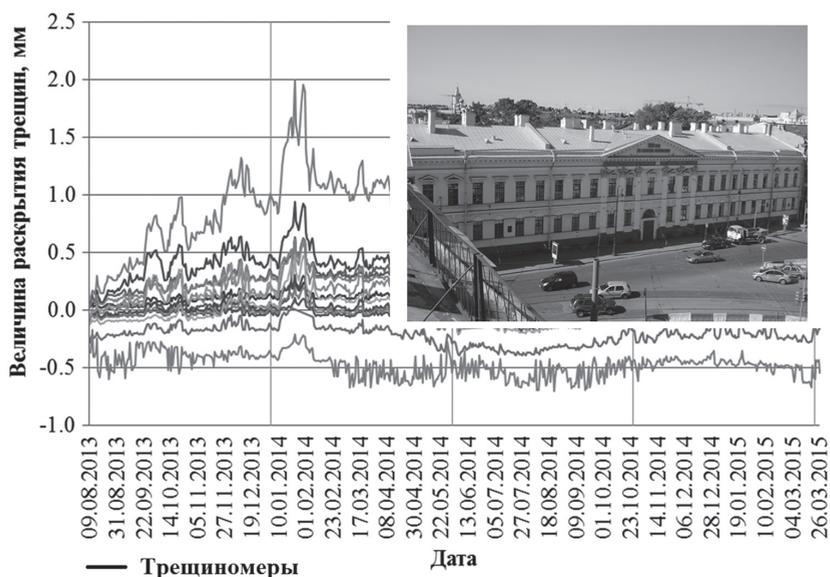


Рис. 4. Характерный график развития трещин по датчикам, установленных на зданиях
 Fig. 4. A typical graph of crack development on sensors installed in buildings

тремя подходами с интервалами в 2 дня, что хорошо отражено на графике. При этом наблюдается поднятие экстензометров выше горизонта нагнетания и их опускание ниже этого горизонта. Такая информация о глубинных деформациях массива является очень важной для своевременного назначения времени начала и окончания компенсационных работ.

Инструментальный мониторинг зданий с применением контрольно-измерительной аппаратуры, фиксирующей величины раскрытия трещин во времени и крены в различных направлениях проводился при строительстве эскалаторного тоннеля второго выхода со станции метро «Спортивная». Датчики устанавливались на здания, представляющие историческую ценность, построенные в конце XIX — начале XX в. и расположенные в зоне влияния строительства.

Максимальный диапазон раскрытия трещин составлял 2,5 мм при средних значениях порядка 0,4 мм. Динамика развития трещин в большей степени зависит от изменений температурного ре-

жима. В жаркие дни величина раскрытия трещин минимальная, а в наиболее холодные дни, наоборот, максимальная. Накопленная деформация (раскрытия трещин) зданий за 19 месяцев наблюдений не превысила величины 0,3—0,5 мм. Изменение углов наклона зданий за все время наблюдений не превысило 0,2 градуса. Динамика волнообразного раскрытия, закрытия фиксировалась в старых трещинах, образовавшихся во время эксплуатации зданий. Была выдана рекомендация о недопустимости извлечения металлического шпунтового ограждения, выполненного вдоль этих зданий. Характерные графики развития трещин приведены на рис. 4.

Заключение

При строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге реализованы новые технологические схемы и конструкции крепей и обделок. Применение комбинированной стабилизации массива — Jet-технологий и последующего подмораживания в грани-

цах выполненного Jet, позволило уменьшить осадки дневной поверхности до 95–110 мм. Применение ТПМК с активным пригрузом забоя и строительство под защитой «стены в грунте» снизило деформации дневной поверхности по сравнению с классической технологией строительства эскалаторных тоннелей в Санкт-Петербурге (замораживанием массива) на порядок — до 15–25 мм. Снижение деформаций дневной поверхности (либо их компенсация) дает возможность использования новых технологий в условиях существующей застройки дневной поверхности без дополнительных мероприятий по усилению зданий.

Геотехнический мониторинг является неотъемлемой частью технологического процесса строительства, обеспечивая безопасность при выполнении горнопроходческих работ, корректировку технологических параметров строительства, конструкций крепей и обделок. Создаваемая база данных геотехнических исследований позволяет вносить корректировку в последующие аналогичные проекты.

Напряженно-деформированное состояние конструкций эскалаторных тоннелей с временной аркобетонной крепью и постоянной монолитной железобетонной обделкой при стабилизации толщи

четвертичных отложений или с использованием ограждающей «стены в грунте», показывает сопоставимые результаты. Величины нормальных тангенциальных напряжений, как правило, не превышают 20–30% предела прочности материала временной крепи на сжатие.

В постоянной обделке величины нормальных тангенциальных напряжений на момент сдачи объекта в эксплуатацию не превышают 3 МПа, что свидетельствует о том, что основную нагрузку от горного давления несет временная кольцевая (замкнутая) крепь из аркобетона. Для последующего проектирования имеется возможность корректировки функциональной роли и параметров аркобетонной крепи и постоянной обделки по результатам уже реализованных проектов. Анализ строительства эскалаторных тоннелей в условиях Лондона также показывает успешную реализацию проектов с использованием временной крепи и постоянной обделки.

Задачи, решаемые в составе геотехнического мониторинга, дополняют друг друга и исключают возможность неверной интерпретации получаемых результатов, а также возможные последующие спекуляции о негативном влиянии на существующую застройку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безродный К. П., Лебедев М. О., Егоров Г. Д. Строительство эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. — 2015. — № 1. — С. 14–17.
2. 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. — С. 35–37.
3. Sillerico Mayta E., Reader D., Suarez Diaz J., Vivier R., Marchand E., Ahmad S. Design and construction of escalator shafts and an inclined access passage at the new Elizabeth line Liverpool Street station (The Crossrail Project) / ITA-ALTES World Tunnel Congress 21–26 April 2018, paper proceedings.
4. Sillerico Mayta E., Suarez Diaz J., Vivier R., Marchand E., Ahmad S. Design and Construction of Inclined Escalator Shafts and Stair Adit at Liverpool St and Whitechapel Stations, Crossrail Project, January 2018, pp. 195–222.
5. Ryan McCarron. Victoria Station Upgrade. PAL 10. The challenges of mining an escalator barrel within an operational station // Harding Prize Submission Paper. 2015, pp. 1–12.

6. Штерн Г.Я., Сорокин Н.А. Сооружение эскалаторного тоннеля в Москве с помощью ТПМК «Lovat» // *Метро и тоннели*. — 2009. — № 2. — С. 6–7.
7. Безродный К.П., Салан А.И., Маслак В.А., Марков В.А., Лебедев М.О. Практика внедрения безосадоочных технологий при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена // *Записки Горного института*. — 2012. — Т. 199. — С. 190–195.
8. Лебедев М.О., Егоров Г.Д. Напряженно-деформированное состояние обделок наклонных тоннелей, сооружаемых по различным технологическим схемам // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2015. — Вып. 8, ч. 2. — С. 18–26.
9. Li Y., Hewett B. Borehole seismic quantitative diagnosis of a seismic velocity model for 3D seismic imaging of subsurface structures, EAGE // *Geophysical Prospecting*. 2014, Vol. 62, pp. 719–739.
10. Julius K. von Ketelhodt, Thomas Fechner, Musa S.D. Manzi, Raymond J. Durrheim Joint inversion of cross-borehole P-waves, horizontally and vertically polarized S-waves: tomographic data for hydro-geophysical site characterization // *Near Surface Geophysics*. 2018. No 16, pp. 529–542.
11. Brunton M., Preston J., Whelan B. E. *Monitoring of Sprayed Concrete Lined Tunnels Using Fibre Bragg Grating Sensors*, Monitor Optics Systems Pty. Ltd. 2015.
12. Гарбер В.А., Кашко А.А., Панфилов Д.В. Пространственное моделирование при строительстве транспортных тоннелей // *Метро и тоннели*. — 2004. — № 5. — С. 46–48. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O., Egorov G. D. Construction of escalator tunnels of the St. Petersburg metro. *Metro i tonneli*. 2015, no 1, pp. 14–17. [In Russ].
2. Bezrodnyy K. P., Maslak V. A., Markov V. A., Lebedev M. O., Starkov A. Yu., Morozov A. V., Ukhvanov A. V. Combined technology of soil stabilization in the construction of escalator tunnels of the St. Petersburg metro. *Metro i tonneli*. 2009, no 5, pp. 35–37. [In Russ].
3. Sillerico Mayta E., Reader D., Suarez Diaz J., Vivier R., Marchand E., Ahmad S. Design and construction of escalator shafts and an inclined access passage at the new Elizabeth line Liverpool Street station (The Crossrail Project). *ITA—AITES World Tunnel Congress 21–26 April 2018*, paper proceedings.
4. Sillerico Mayta E., Suarez Diaz J., Vivier R., Marchand E., Ahmad S. *Design and Construction of Inclined Escalator Shafts and Stair Adit at Liverpool St and Whitechapel Stations*, Crossrail Project, January 2018, pp. 195–222.
5. Ryan McCarron. Victoria Station Upgrade. PAL 10. The challenges of mining an escalator barrel within an operational station, *Harding Prize Submission Paper*. 2015, pp. 1–12.
6. Shtern G. Ya., Sorokin N. A. Construction of an escalator tunnel in Moscow by Lovat's TBM. *Metro i tonneli*. 2009, no 2, pp. 6–7. [In Russ].
7. Bezrodnyy K. P., Salan A. I., Maslak V. A., Markov V. A., Lebedev M. O. The practice of implementation of nonstop technologies in the construction of the St. Petersburg metro. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, vol. 199, pp. 190–195. [In Russ].
8. Lebedev M. O., Egorov G. D. Stress-strain state of sloping tunnel linings constructed according to different technological schemes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. Issue 8, part 2, pp. 18–26. [In Russ].
9. Li Y., Hewett B. Borehole seismic quantitative diagnosis of a seismic velocity model for 3D seismic imaging of subsurface structures, EAGE. *Geophysical Prospecting*. 2014, Vol. 62, pp. 719–739.
10. Julius K. von Ketelhodt, Thomas Fechner, Musa S.D. Manzi, Raymond J. Durrheim Joint inversion of cross-borehole P-waves, horizontally and vertically polarized S-waves: tomographic data for hydro-geophysical site characterization. *Near Surface Geophysics*. 2018. No 16, pp. 529–542.
11. Brunton M., Preston J., Whelan B. E. *Monitoring of Sprayed Concrete Lined Tunnels Using Fibre Bragg Grating Sensors*, Monitor Optics Systems Pty. Ltd. 2015.
12. Garber V. A., Kashko A. A., Panfilov D. V. Spatial modeling in the construction of transport tunnels. *Metro i tonneli*. 2004, no 5, pp. 46–48. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Михаил Олегович¹ — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru,

Егоров Григорий Дмитриевич¹ — старший научный сотрудник, e-mail: krisha1@yandex.ru,

¹ ОАО «Научно-исследовательский, проектно изыскательский институт «Ленметрогипротранс».

Для контактов: Лебедев М.О., e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.O. Lebedev¹, Cand. Sci. (Eng.), Vice Director for Research, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru,

G.D. Egorov¹, Senior Researcher, e-mail: krisha1@yandex.ru,

¹ Open Joint Stock Company «Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogioprotrans», 191002, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.O. Lebedev, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

(2019, СВ 22, 44 с.)

Зайцева Елена Вячеславовна¹ — канд. техн. наук, ведущий инженер,

Агафонов Валерий Владимирович¹ — д-р техн. наук, профессор,

Оганесян Армине Сейрановна¹ — д-р техн. наук, профессор,

Снигирев Владимир Владимирович¹ — студент,

¹ МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: msmu-prpm@yandex.ru.

Представлены результаты аналитических исследований в области совершенствования научно-методической базы обеспечения стратегии развития горноперерабатывающих производств с учетом инновационной составляющей. Предложены основные элементы перевода цементных предприятий на цифровой путь развития с учетом ключевых задач цифровизации цементных производств, путей их решения и обеспечения на базе технических, технологических и системно-управленческих платформ последнего поколения, обеспечивающих соответствующую техникоэкономическую эффективность горноперерабатывающих предприятий. Представлена логическая модель, обеспечивающая процесс трансформации и преобразования технологических систем горноперерабатывающих предприятий на современном этапе развития научно-технического прогресса с учетом современных тенденций и закономерностей для видоизменения и пополнения теоретических основ для разработки методологии синтеза их технологических систем и выбора стратегий развития.

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL BASIS FOR THE DEVELOPMENT STRATEGY OF MINING INDUSTRIES

Zaytseva E.V.¹, Agafonov V.V.¹, Oganesyana A.S.¹, Snigirev V.V.¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The article presents the results of analytical studies in the field of improving the scientific and methodological base of the strategy of development of mining industries, taking into account the innovative component. The main elements of the transfer of cement enterprises to the digital path of development are proposed taking into account the key tasks of digitization of cement production, ways of their solution and provision on the basis of technical, technological and system-management platforms of the last generation, providing appropriate technical and economic efficiency of mining enterprises. The logical model providing process of transformation and transformations of technological systems of the mining enterprises at the present stage of development of scientific and technical progress taking into account modern tendencies and regularities for modification and replenishment of theoretical bases for development of methodology of synthesis of their technological systems and the choice of development strategies is presented.