

В.Г. Пастушков¹, М.А. Кисель¹, К.К. Ботяновская¹, Л.В. Янковский^{2,3}

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

КОНТРОЛЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОГО УЗЛА МЕТРОПОЛИТЕНА

Выполнение работ по контролю напряженно-деформированного состояния обусловлено реконструкцией платформенного участка станции «Площадь Ленина», г. Минск, для устройства пешеходного перехода пересадочного узла. При этом использовалась инновационная автоматизированная система мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций SciGauge.

Целью мониторинга было определение напряженно-деформированного состояния несущих конструкций платформенного участка во время строительства, сопоставление с теоретическими расчетными данными и требованиями нормативных документов. Проводился осмотр строительных конструкций на предмет появления в них трещин.

Для анализа возможных перемещений и напряжений в конструкциях платформенного участка станции «Площадь Ленина» была разработана трехмерная модель объекта с учетом технологии производства работ по реконструкции. Создание модели осуществлялось на основе проектных чертежей и результатов обследования конструкций. Непрерывное наблюдение за напряженно-деформированным состоянием конструкций платформенного участка станции «Площадь Ленина» при помощи системы мониторинга SciGauge позволило вести строительномонтажные работы в круглосуточном режиме.

Геотехнический мониторинг по реконструкции станции метрополитена позволил учесть возможные риски, связанные с воздействием на сложившееся напряженно-деформированное состояние системы «грунт – сооружение» в условиях плотной застройки. Это позволило предупредить возможные аварийные ситуации, связанные с безопасной эксплуатацией метрополитена в период производства работ. Однако следует отметить тот факт, что компьютерное моделирование поведения сооружения под различными нагрузками не может заменить проведение натурных исследований и испытаний образцов материалов. Необходимо дальнейшее совершенствование методик расчета сложных пространственных задач, связанных с работой подземных сооружений.

Ключевые слова: BIM-технологии, мониторинг, станция метрополитена, платформенный участок, переходной тоннель, реконструкция, расчетная модель, грунт, деформации, напряжения.

V.G. Pastushkov¹, M.A. Kisel¹, K.K. Botyanovskaya¹, L.V. Yankovsky^{2,3}

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Perm, Russian Federation

CONTROL OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF A SUBWAY TRANSPORTATION AND TRANSFER HUB

The performance of work on the control of stressed-deformed state was due to the reconstruction of the platform section of the Lenin Square station in Minsk for the construction of a pedestrian crossing of the transfer hub. At the same time, an innovative automated system for monitoring the stress-strain state of building structures "SciGauge" was used.

The purpose of the monitoring was to determine the stress-strain state of the load-bearing structures of the platform section during construction, its comparison with theoretical design data and requirements of regulatory documents. Building structures were inspected for cracks.

To analyze possible movements and stresses in the structures of the platform section of the Lenin Square station, a three-dimensional model of the object was developed taking into account the technology of reconstruction work. The model was created on the basis of design drawings and the results of a structural survey. Continuous monitoring of the stressed-deformed state of the structures of the platform section of the Lenin Square station using the SciGauge monitoring system made it possible to carry out construction and installation work around the clock.

Geotechnical monitoring for the reconstruction of the subway station made it possible to take into account risks associated with the impact on the existing stressed-deformed state of the soil-structure system in conditions of dense development. This made it possible to prevent possible emergencies related to the safe operation of the subway during the period of work. However, it should be noted that computer simulations of the structure behavior under different loads cannot replace the conduct of full-scale studies and tests of material samples. It is necessary to further improve the methods of calculating complex spatial problems related to the operation of underground structures.

Keywords: BIM technologies, monitoring, subway station, platform section, transition tunnel, reconstruction, design model, soil, deformations, stresses.

Введение

Развитие метрополитена города Минска происходит по радиальной схеме. Существующие ветки проходят по диаметральному направлению через центр города. Развитие сети в центральной части города требует создания транспортно-пересадочных узлов. Это позволит жителям и гостям города осуществлять посадку в одном месте на поезда, идущие в различных направлениях из центра к периферийным районам столицы. Возможность перехода с одной ветки на другую осуществляется при помощи переходных тоннелей и галерей, мостиков, лестниц и др.

Создание пересадочных узлов должно максимально соответствовать принципу «сухие ноги», когда пассажир, переходя с одной ветки метро на другую или с одного вида транспорта на другой (например из метро на автобус или железнодорожный поезд), не должен проходить по мокрым и заснеженным городским улицам. Кроме этого необходимо разрабатывать пересадочные узлы таким образом, чтобы они были как можно компактнее, для эффективного освоения городского пространства. Необходимо минимизировать отрицательное воздействие подземных построек на осадки дневной поверхности плотной урбанизированной территории с множеством культурных исторических памятников.

Генеральную схему метрополитена создают до начала проектирования первой линии. Однако в генплан развития города постоянно вносятся изменения в связи со сложившейся обстановкой в экономике города и страны в целом. Это приводит к тому, что решения, принятые при проектировании и строительстве первых станций, оказываются неактуальными на момент строительства новых станций, а также возникает необходимость создания пересадочных узлов между действующими и вновь возводимыми объектами.

Такая проблема возникла при проектировании и строительстве пересадочного узла с первой на третью ветку Минского метрополитена. Проектирование станции «Площадь Ленина» первого участка первой ветки Минского метрополитена велось с учетом перспективного развития генерального плана развития города Минска. Однако за прошедшие десятилетия с момента строительства первой ветки в генплан неоднократно вносились изменения, что привело к образованию в месте ранее проектируемой третьей ветки крупного транспортного узла. Строительство открытым способом станции третьей ветки и переходного тоннеля между первой и третьей линией парализовало бы транспортное сообщение большей части города. Поэтому было принято решение о выносе станции третьей ветки за пределы транспортного узла. Однако при проектировании переходного тоннеля с противоположной стороны возникла необходимость демонтажа части несущих стен, а также выполнения проходки закрытым способом в основании лотковой плиты станции, что оказало бы негативное влияние на напряженно-деформированное состояние существующих конструкций эксплуатируемой станции. При проведении работ по устройству переходного тоннеля проектом производства работ остановка движения поездов не предусмотрена, что во много раз усложняет задачу строительства.

При решении подобного рода задач необходимо обеспечить строгий контроль за состоянием конструкций и верхнего строения пути эксплуатируемой линии метрополитена, а также за состоянием окружающей застройки, попадающей в зону влияния, без изменения режима эксплуатации станции [1–3]. Автоматизированная система мониторинга несущих конструкций позволяет решать подобного рода задачи. Проведение комплекса мероприятий по наблюдению за состоянием несущих конструкций станции в период до начала строительства, во время его,

а также в течение определенного периода после строительства позволяет провести комплексную оценку технического состояния основных несущих конструкций сооружения и выявить соответствующие критерии по эксплуатации транспортного узла. Использование комплекса программ конечно-элементного анализа обеспечивает возможность совместного расчета в одной модели пространственных систем «грунт – сооружение», в том числе с физически нелинейными свойствами [10, 11].

Анализ последних источников исследований и публикаций

Анализ последних исследований и публикаций по данной тематике говорит о том, что все чаще в практике отечественного и зарубежного метростроения приходится сталкиваться с необходимостью ведения мониторинга существующих конструкций метрополитена в ходе его строительства и реконструкции. Данный комплекс мероприятий существенно облегчает производство строительно-монтажных работ по реконструкции существующих сооружений метрополитена, обеспечивая при этом его нормальное функционирование [1–3, 5, 6].

Существует также комплекс задач, при которых проведение мониторинга является важнейшей составляющей всего строительного производства. Эти задачи возникают, как правило, при реконструкции подземных сооружений, находящихся в исторических, деловых и культурных центрах города, где раскрытие дневной поверхности грунта крайне негативно сказывается на состоянии окружающей застройки, попадающей в зону влияния строительства и реконструкции подземных сооружений [4, 7, 9–15].

Важнейшим мероприятием подготовительного этапа мониторинга является создание адекватной расчетной модели. Модель должна учитывать реальную работу всех узлов и элементов сооружения до начала производства работ. Только после того, как будет создана максимально приближенная к реальным условиям модель, возможна ее дальнейшая корректировка на основании данных, получаемых в ходе мониторинга. Однако зачастую расчетная модель не корректируется с учетом происходящих изменений в ходе строительства или реконструкции подземных сооружений [7, 12, 13].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Современные технологии строительства станций и тоннелей метрополитена позволяют выполнять строительно-монтажные работы практически при любых инженерно-геологических и гидрологических условиях, в том числе и в плотной городской застройке. Воплощение в реальность любых идей в сложных городских условиях невозможно без тщательного контроля за окружающим состоянием сложившейся застройки города. Необходимо с высокой точностью и достоверностью определять лишь те конкретные задачи, решение которых позволит без существенного ущерба для окружающей среды воплотить в реальность любые инженерные идеи [8].

Постановка задачи

Для получения реальных значений изменения напряженно-деформированного состояния существующих конструкций в период реконструкции сооружения необходимо получить так называемый «ноль» до начала производства работ, то есть знать начальное напряженно-деформированное состояние конструкций сооружения во время эксплуатации в плановом режиме, с учетом возникших за годы эксплуатации дефектов и повреждений конструкций. Только проведение комплексного геотехнического мониторинга позволяет определить фактические изменения напряженно-деформированного состояния в период реконструкции и дальнейшей эксплуатации сооружения.

Конструктивно-технологические решения

Тип станции – однопролетная со сводчатым перекрытием. Длина станции – 97,5 м.

Покрытие платформенного участка выполнено в виде монолитного железобетонного свода, жестко связанного со стенами станции (рис. 1).



Рис. 1. Платформенный участок до реконструкции

Наружные стены платформенного участка – монолитные железобетонные, выполненные методом «стена в грунте». К внутренней поверхности стен закреплены железобетонные блоки толщиной 200 мм с отверстиями для пропуска инженерных коммуникаций. Поверх данных блоков выполнена декоративная облицовка из гранитных плит. По несущим стенам выполнены консоли со служебными проходами и освещением.

Лотковая плита выполнена из монолитного железобетона на бетонной подготовке. Плита имеет переменную толщину в форме обратного свода. На плиту уложен путевой бетон.

Перекрытия в уровне платформы – сборные железобетонные плиты и монолитные участки в середины платформы, а также в зоне расположения съёмных перекрытий. Плиты смонтированы ребристые размером 1,48×9,95 м с консольными свесами по обе стороны. Опирающие плиты выполнены на кирпичные стены. Несущие стены платформенных плит – из кирпича. Толщина стен – 380 мм.

Между осями стен платформенных плит устроены монолитные железобетонные стены, отделяющие запроектированные лестничные спуски. Вышеперечисленные конструкции запроектированы и построены с учетом последующей реконструкции станции из промежуточной в пересадочную.

Геотехнический мониторинг станции при производстве строительно-монтажных работ

Геотехнический мониторинг предусматривает непрерывный контроль за деформациями и усилиями в исследуемых конструкциях станции и проверку соответствия расчетному значению, гарантирующему безаварийную работу сооружения.

Мониторинг проводится в несколько этапов. Основной работой на подготовительном этапе был анализ исходной информации на основании результатов обследования. Были подвергнуты тщательному анализу результаты геодезического измерения за последний период эксплуатации (два года). Получены сведения о техническом состоянии подземных сооружений, попадающих в зону риска, предоставленные эксплуатирующими организациями. Были определены крены, несоосности, деформации и неравномерные осадки несущих путевых стен исследуемой станции. Установлены геодезические марки на все опасные сооружения станции с привязкой их к реперной сети города. Установлены датчики и маячки на трещины, которые были обнаружены в несущих конструкциях станции. Установлены датчики на несущую железобетонную путевую стену, железобетонную лотковую плиту. Осуществлялись постоянный контроль соблюдения технологического регламента проведения работ и научное сопровождение подготовительных работ.

Программа контроля предусматривала, что при выявлении критических показателей из автоматизированной системы (деформации станционных конструкций, просадки и перекосы

ходовых рельсов, при которых необходимо выполнять мероприятия по обеспечению безопасности движения поездов) незамедлительно принималось решение всеми заинтересованными организациями о проведении мероприятий по ликвидации проблемы.

Визуальный мониторинг до начала реконструкции включал в себя осмотр до начала строительных работ и установку видеонаблюдения в зоне планируемой застройки. Данные с камер системы видеонаблюдения эксплуатирующей организации, получаемые по запросу, необходимы для осуществления контроля за установленным оборудованием и определения напряженно-деформируемых состояний (НДС) от временной эксплуатационной нагрузки. Результаты работ по визуальному мониторингу предоставляются в отчетах с фотографиями выявленных повреждений и их значениями, а также заносятся в базу данных – систематизированные результаты наблюдений, пригодные для обработки и использования с помощью специализированных программных комплексов.

Геодезическо-маркшейдерский надземный мониторинг до начала реконструкции включал устройство реперов для геодезических измерений и выполнение инструментальных измерений по установленным реперам с привязкой к планово-высотной сети города. Геодезические инструментальные наблюдения ведутся с использованием оптического цифрового и лазерного оборудования с целью получения высокоточных результатов изменения планово-высотного положения установленных марок и скорости этих изменений. По результатам измерений данные заносятся в единую базу данных.

Подземный контроль состояния конструкций включал установку геодезических марок в конструкциях станции и 3D-сканирование участка работ. По результатам измерений данные заносятся в единую базу данных.

Инструментальным мониторингом состояния конструкций до начала реконструкции определялись ширина и глубина раскрытия трещин, учет существующих течей в количественном выражении. По результатам измерений данные заносятся в единую базу данных.

Пусконаладочные работы электронного дистанционного контроля состояния несущих конструкций до начала реконструкции включали в себя: разработку схемы расположения датчиков на станции и схему электропроводки, установку электронных накладных тензорезистивных датчиков на железобетонную несущую путевую стену и лотковую плиту, установку беспроводной связи передачи данных через Интернет или сотовую связь; установку программного обеспечения на автоматизированные рабочие места строительной организации и аварийно-технической помощи службы пути и тоннельных сооружений метрополитена для контроля напряженно-деформированного состояния конструкций станции.

Данные электронного мониторинга имеют внутреннюю запись. По результатам измерений данные заносятся в единую базу данных.

Научное сопровождение ведется на всех этапах реконструкции станции. Перед началом выполнения работ по мониторингу разработана база данных, занесение информации в которую должно строго выполняться всеми участниками процесса. Периодические отчеты в процессе производства работ при реконструкции станции должны содержать результаты мониторинга, информацию о состоянии объекта, возможных отклонениях и прогноз изменения состояния инженерных конструкций. Также производилось сопоставление деформаций и напряжений в конструкциях станции, полученных по результатам расчетов проектными организациями, с фактическими значениями и уточнением при необходимости расчетных моделей. Состав и порядок мониторинга должны корректироваться в процессе выполнения работ в зависимости от местных условий, возможностей и предварительных результатов.

Разработка расчетной модели

Для анализа возможных перемещений в конструкциях платформенного участка была разработана трехмерная модель объекта мониторинга. Создание модели осуществлялось на основе проектных чертежей.

Моделирование производилось в специализированном геотехническом программном обеспечении. Напряженно-деформированное состояние системы «грунт – сооружение» рассчитывалось методом конечных элементов в условиях трехмерной задачи. Информационная модель представляет собой совокупность объемных элементов и разработана таким образом, что при расчете учитываются все стадии напряженно-деформированных состояний несущих конструкций. Элементы модели проектировались таким образом, чтобы модель была максимально приближена к реальному состоянию.

Грунт задавался моделью Мора – Кулона. Модель Мора – Кулона основана на зависимостях между скоростью изменения эффективного напряжения σ' и скоростью деформации ε' .

При создании данной модели использовались традиционные параметры материалов: модуль упругости, собственный вес, удельное сцепление, угол внутреннего трения и коэффициент Пуассона и др.

В расчетную модель были заложены характеристики материалов конструкций на основе проектных чертежей. Характеристики грунтов задавались на основании результатов инженерно-геологических изысканий. Важный вопрос при моделировании состоял в адекватном задании геометрических и жесткостных параметров конструкции. В расчетной схеме модель разрабатывалась с учетом технологии производства работ по реконструкции платформенного участка станции. После завершения построения геометрической модели может быть построена сетка конечных элементов. Расчеты выполнялись с учетом последовательности производства работ, разработанной проектной организацией (рис. 2, 3).

После завершения построения геометрической модели она была разбита на сетку конечных элементов.

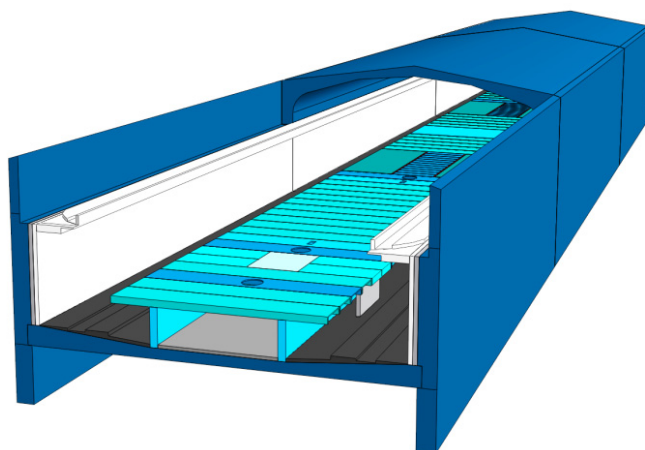


Рис. 2. Подземные конструкции, попадающие в зону влияния при реконструкции

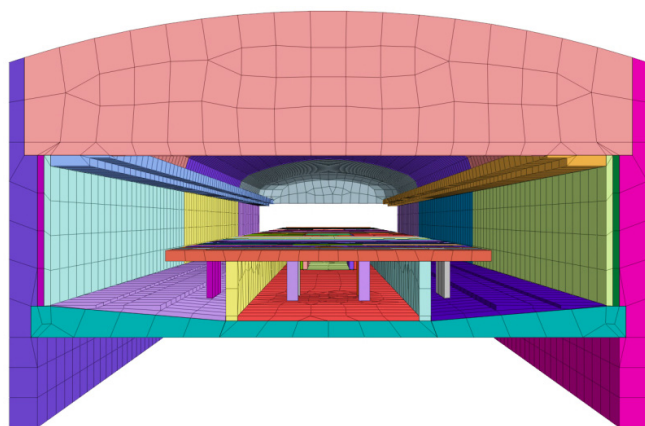


Рис. 3. Сетка конечных элементов платформенного участка станции «Площадь Ленина»

Построение конечно-элементной сетки основано на принципе триангуляции. Автоматически находятся оптимальные длины сторон конечных элементов и создается неструктурированная сетка со сгущением в наиболее ответственных местах (рис. 4).

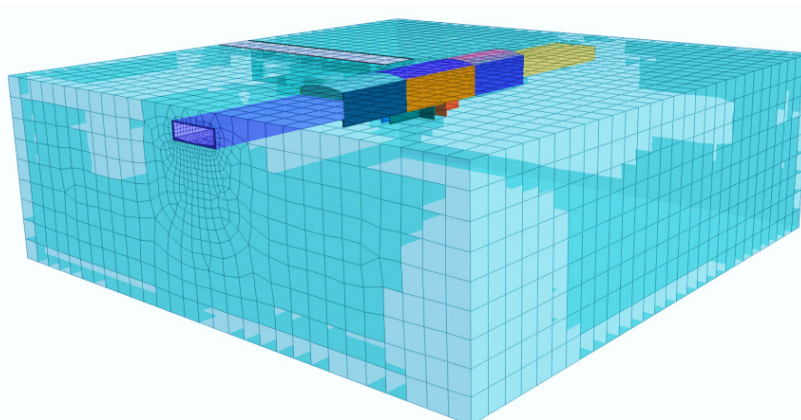


Рис. 4. Объемная конечно-элементная расчетная модель

Что касается граничных условий и собственного веса конструкций, то они могут задаваться автоматически, что существенно облегчает решение задачи. До начала расчета были заданы все необходимые стадии расчета конструкций с учетом технологии производства работ. Расчет производился по стадиям возведения.

Результаты расчета

По результатам пространственных расчетов прогнозируемые перемещения несущих конструкций платформенного участка в зоне производства работ составили 7–8 мм. Прогнозируемые изменения напряжений в несущих конструкциях станции составляют 5–11 МПа (рис. 5, 6).

На основе анализа проведенных расчетов максимальные напряжения возникают в стене в зоне устройства технологических проемов и составляют 6 МПа. Было рекомендовано произвести устройство металлической или железобетонной обоймы части стены между смежными проемами.

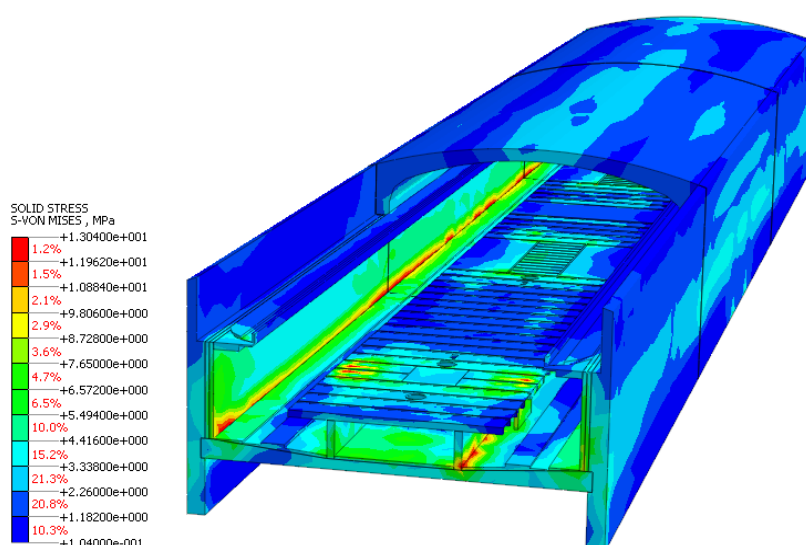


Рис. 5. Деформации, возникающие в стене и своде станции, в момент осуществления проходки переходного тоннеля

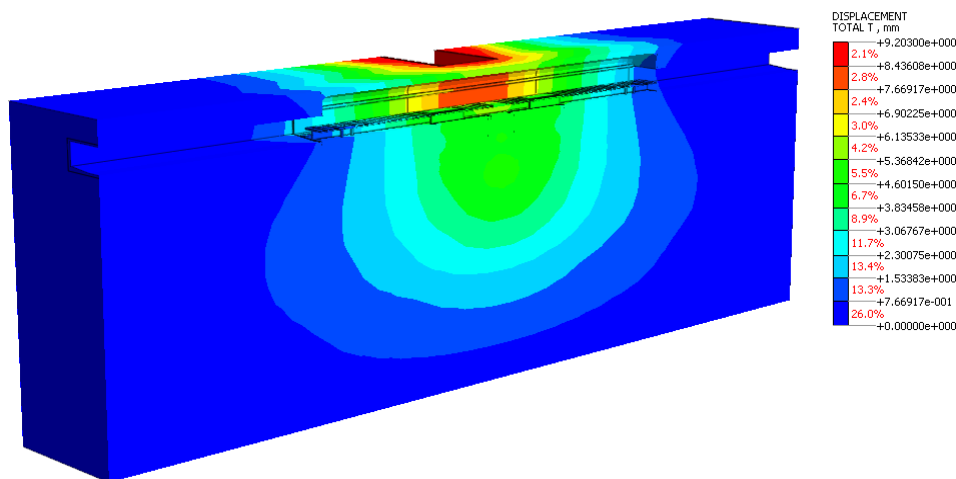


Рис. 6. Деформации грунтового массива после раскрытия котлована

Максимальные перемещения конструкций несущей стены и лотковой плиты с путевым бетоном возникают при производстве работ по сооружению котлована примыкания. Это объясняется снятием активного давления на стену. Хотелось бы отметить, что, помимо создания активного бокового давления на существующую стену станции, окружающий грунтовой массив станции воспринимал часть распора, передающегося от сводчатого покрытия станции. Удаление грунта из котлована в зоне производства строительно-монтажных работ по устройству примыкания переходного тоннеля приведет к тому, что горизонтальная составляющая опорной реакции свода станции будет восприниматься только жесткостью стены и узлом сопряжения стены со сводом, что приведет к существенному изменению напряженно-деформированного состояния «стены в грунте», а также к возможному трещинообразованию. Для снижения негативного влияния горизонтальной реакции сводчатого покрытия на стену проектом было предусмотрено устройство так называемых контрфорсов, которые частично компенсируют снятие бокового давления.

Учитывая тот факт, что сооружения метрополитена относятся к особо ответственным объектам с повышенным риском эксплуатации, необходимо в период проведения работ организовать мониторинг перемещений и деформаций существующих конструкций платформенного участка.

Реализация проектных решений

Работы по устройству ходка начались в августе 2018 г., а именно выбуривание кернов диаметром 250 мм в существующей стене станции для задавливания труб защитного экрана. Работы выполнялись только в ночное время – с 01 ч 00 мин до 05 ч 00 мин, в период отсутствия движения пассажирских поездов метрополитена. В декабре 2018 г. в котловане начались работы по задавливанию труб защитного экрана. Длина задавливаемых труб около 7,5 м. Погружение труб производится при помощи пневматического вибропогружателя.

После окончания работ по задавливанию труб в мае 2019 г. были выполнены работы по усилению основания стены станции двумя рядами грунтоцементных свай (ГЦС) из примыкающего котлована.

С июля 2019 г. начались работы по выбуриванию кернов диаметром 57 мм в существующей стене станции для установки труб инъекторов. Первые три ряда, считая от низа лотка станции, выполняются в ночное время, в период отсутствия движения пассажирских поездов. Начиная с августа 2019 г. на основании результатов геотехнического мониторинга работы по выбуриванию кернов выполнялись в круглосуточном режиме.

В сентябре 2019 г. приступили к выполнению работ по нагнетанию микроцемента через инъекторы в грунтовой массив основания станции. Микроцементный состав нагнетается

в грунтовый массив, расположенный за контуром проектной выработки переходного тоннеля (с внешних сторон защитного экрана из труб). Ко второму этапу по нагнетанию микроцемента приступили в дневное время благодаря непрерывному контролю состояния основных несущих конструкций.

В ноябре 2019 г. начались работы по стабилизации породы в забое горной выработки при помощи нагнетания акрилатного геля. Работы по нагнетанию акрилатного геля выполнялись в ночное «окно», в период отсутствия движения пассажирских поездов метрополитена. В декабре 2019 г. работы по нагнетанию акрилатного геля велись в круглосуточном режиме.

В январе 2020 г. был выполнен демонтаж железобетонных блоков, вырезанных из стены в грунте (раскрытие проемов) при помощи резки стальными канатами с абразивным покрытием. Параллельно была начата разработка грунта первой заходки под монтаж несущих рам временной крепи выработки.

Далее выполнялись поэтапные работы по разработке грунта, установке временной крепи, омоноличиванию основных несущих конструкций, металлоизоляции, контрольному нагнетанию и т.д.

После завершения работ по устройству основных рам на строительной площадке осуществлялись работы по устройству рам примыкания к конструкции существующей «стены в грунте», а также велись работы по вырубке бетона и монтажу обвязочных рам в зоне устройства проемов существующей «стены в грунте» пешеходного тоннеля.

В апреле 2020 г. на строительной площадке продолжались работы по разработке грунта, планировке откосов под лестничные марши и устройству эскалаторных спусков, срубке бетона существующих конструкций «стены в грунте» и подготовки лотковой плиты с целью доведения габаритных размеров в свету до проектных значений. Полностью завершена разработка бетона в проемах под лестничные спуски в лотковой плите.

В течение мая 2020 г. выполнялись работы по контрольному нагнетанию раствора за обделку участков переходных тоннелей в зоне горного способа работ. Были выполнены работы по доработке грунта, а также устройству железобетонных конструкций прямка для водоотливной установки и натяжной камеры эскалаторов.

В июне 2020 г. выполнены все работы по устройству основных несущих конструкций как при открытом, так и закрытом способе работ. Основным видом работ на данном этапе строительства явились внутренние отделочные работы, а именно: возведение перегородок, оштукатуривание стен и перегородок, прокладка инженерных сетей, укладка гранитных плит и др. (рис. 7).



Рис. 7. Платформенный участок после реконструкции

Результаты работ по электронному дистанционному мониторингу

Для измерения деформаций в конструкциях путевой стены, лотковой плиты платформенного участка станции были установлены струнные накладные тензометры и двухосевые инклинометры. Показания с тензометров и двухосевых инклинометров опрашиваются регистратором, входящим в состав сервера, установленного под платформой станции.

Регистратор является частью автоматизированной системы мониторинга состояния строительных конструкций (АСМССК), позволяет в автономном и режиме реального времени опрашивать показания датчиков.

С помощью специализированного программного обеспечения, входящего в АСМССК, показания тензометра преобразуются в показание относительной деформации ϵ конструкции в микрострейнах, и далее в соответствии с реальным модулем упругости высчитываются напряжения в элементах конструкций; показания инклинометра преобразуются в перемещения в миллиметрах.

Для мониторинга напряженно-деформированного было установлено 12 тензометров:

- 10 тензометров – на конструкцию путевого бетона на лотковой плите в пяти местах (по два – перпендикулярно и параллельно направлению рельс),
- два тензометра – на арматурные стержни путевой стены;
- пять двухосевых инклинометров на конструкцию путевого бетона на лотковой плите.

Фактическая схема расположения измерительного оборудования приведена на рис. 8.

Показания датчиков в период проведения работ по данному этапу показаны на рис. 9.

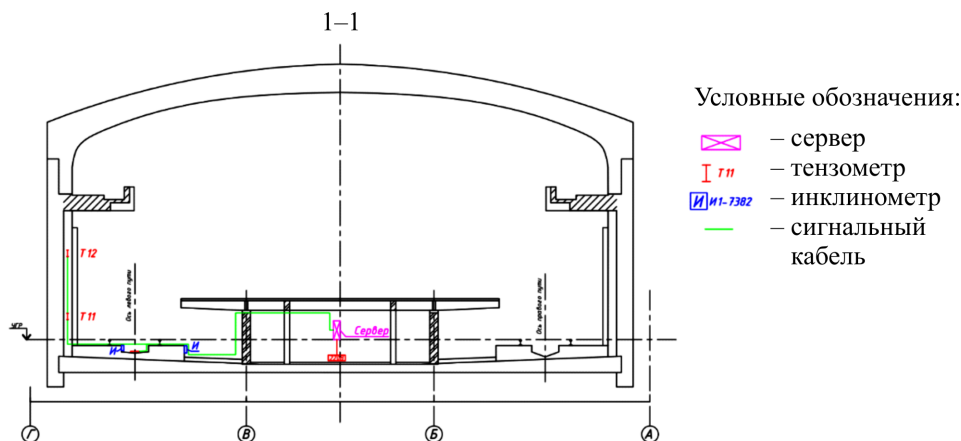


Рис. 8. Схема расположения элементов системы мониторинга конструкций станции при реконструкции платформенного участка

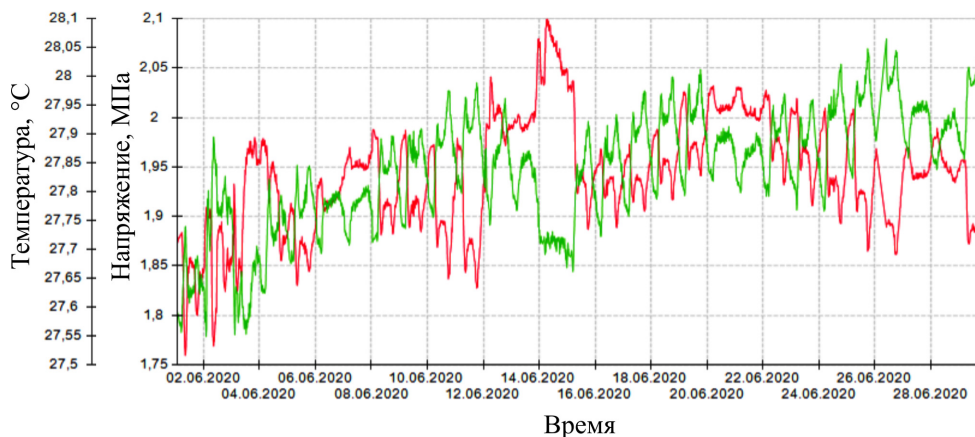


Рис. 9. График изменения температуры и напряжений, возникающих в путевом бетоне

Выводы

На основании выполненного геотехнического контроля напряженно-деформированного состояния конструкций станции при реконструкции платформенного участка станции «Площадь Ленина» можно сделать следующие выводы.

Мониторинг технического состояния конструкций станции при устройстве пересадочного узла подтвердил возможность ведения строительно-монтажных работ в круглосуточном режиме при условии непрерывного наблюдения за напряженно-деформированным состоянием конструкций.

В случае быстрого возрастания значений относительных деформаций и перемещений, не пропорциональных их предыдущему темпу роста, геотехнический мониторинг позволяет немедленно остановить строительно-монтажные работы.

По результатам геодезического мониторинга за период наблюдений максимальные отклонения отметки точки Т2, расположенной в торце платформы в зоне строительства пешеходного перехода под вторым главным путем, в середине декабря 2019 г. увеличились до +4,0 мм. Дальнейшие наблюдения показали остановку увеличения отклонения и постепенного смещения значений к исходным. На данный момент отклонение Т2 составляет +1,0 мм.

В середине декабря 2019 г. в зоне строительства пешеходного тоннеля под вторым главным путем наблюдалось увеличение отклонения отметок по левому и правому ходовым рельсам: точка 83 – до +3,2 мм по левому рельсу и точка 84 – до +2,4 мм по правому рельсу. Дальнейшие измерения показали смещения значения к исходным данным. Так, в последнем цикле измерений отклонение точки 83 по левому рельсу составило –1,8 мм и точки 84 по правому рельсу –2,3 мм относительно первоначальных данных.

В последнем цикле измерений наметилось смещение в минусовую сторону участков от точки 24 до точки 88 по левому рельсу и от точки 15 до точки 100 по правому рельсу. Величина смещения составляет до –2,1 мм от значений предыдущего цикла. В остальных точках результаты последнего цикла четко вписываются в графическую картину предыдущих измерений и не имеют с ними существенных различий.

Показания датчиков электронного мониторинга на данном этапе не превысили допустимых критериев, установленных программой мониторинга.

Геотехнический мониторинг ведения строительно-монтажных работ по реконструкции эксплуатируемой станции метрополитена позволил учесть возможные риски, связанные с воздействием на сложившееся напряженно-деформированное состояние системы «грунт – сооружение» в условиях плотной городской застройки. Это позволило существенно сэкономить трудозатраты и стоимость всего строительства в целом. Но главным образом позволило предупредить возможные аварийные ситуации, связанные с безопасной эксплуатацией метрополитена в период производства работ.

Предварительные расчеты, проведенные при помощи моделирования в трехмерной постановке, дают возможность создания полноценных комплексных моделей, учитывающих совместную работу «грунт – сооружение».

Следует отметить тот факт, что компьютерное моделирование поведения сооружения под различными нагрузками ни в коей мере не может заменить проведение натурных исследований и испытаний образцов материалов. Необходимо дальнейшее совершенствование методик расчета сложных пространственных задач, связанных с работой подземных сооружений.

Особую благодарность выражаем коллективу проектировщиков ОАО «Минскметропроект», строителям ОАО «Минскметромтррой», дирекции по строительству Минского метрополитена за поддержку и неоценимую помощь на всех этапах геотехнического мониторинга.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций. ТКП EN 1990-2011 (02250) / Введен с 2012-07-07. – Минск: МАиС, 2012. – 70 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции. СНБ 5.03.01-02 / Введен с 2003-07-01. – Минстройархитектуры. – Минск: Стройтехнорм, 2003. – 139 с.
3. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий. ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250) (EN 1992-1-1: 2004+AC: 2010, IDT) / Введен с 2010-01-01. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь; Стройтехнорм; СтройМедиаПроект, 2015. – XIV. – 205 с.
4. Kurata N., Spencer B.F., Ruiz-Sandoval M. Risk Monitoring of Buildings Using Wireless Sensor Network. – 2005. – 6 p.
5. Pastushkov G.P., Kisel M.A. Підготовчий етап для контролю несучих конструкцій станції метро, що знаходиться в експлуатації // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 2 (49). – С. 116–125.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. – 270 с.
7. Фролов Ю.С., Иванес Т.В. Механика подземных сооружений: учеб. пособие / Петерб. гос. ун-т путей сообщ. – СПб.: ПГУПС, 1997. – 102 с.
8. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
9. Пастушков Г.П., Пастушков В.Г. О переходе европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Минск, 2011. – № 2. – С. 113–121.
10. Pastushkov G., Pastushkov V. Durability of reinforced concrete bridges – the major problem of road branch: Proceedings of the International Conference “Construction and Architecture”/ edited by B.M. Khroustaliyev, S.N. Leonovich. – Minsk, 2003. – P. 322–332.
11. Пастушков В.Г., Бойко И.Л., Пастушков Г.П. Научное сопровождение проектирования и строительства трехуровневой транспортной развязки в г. Минске // Автомобильные дороги и мосты. – Минск, 2015. – № 2. – С. 11–17.
12. Skolnik D. Tentative Title: Instrumentation for Structural Health Monitoring. – Los Angeles, CA, 2008.
13. Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control / Edited by Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu // Geodata S.p.A. – Turin, Italy, 2007. – 528 p.
14. Пат. 2032024 Рос. Федерация. Способ усиления основания ленточных фундаментов при реконструкции зданий и сооружений / Бартоломей А.А., Янковский Л.В. № 5055193/33; заявл. 17.07.92; опубл. 27.03.95, Бюл. № 9. – 5 с.
15. Стандарты долговечного строительства / Н.Е. Кокодеева [и др.] // Жилищное строительство. – 2012. – № 1. – С. 14–18.

References

1. Evrokod. Osnovy proektirovaniia stroitel'nykh konstrukttsii. TKP EN 1990-2011(02250) [Eurocode. Fundamentals of the design of building structures. TCP EN 1990-2011(02250)]. Minsk, *MAiS*, 2012, 70 p.
2. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukttsii. SNB 5.03.01-02 [Concrete and reinforced concrete structures. SNB 5.03.01-02]. Minstroiarhitektury, Minsk, *Stroitekhnorm*, 2003, 139 p.
3. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukttsii. Chast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlia zdanii. TKP EN 1992-1-1-2009* (02250) (EN 1992-1-1:2004+AC:2010, IDT) [Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General rules and regulations for buildings. TCP EN 1992-1-1-2009* (02250)]. Minsk, Minstroiarhitektury Respubliki Belarus', Minsk, *Stroitekhnorm*, 2015, 205 p.
4. Kurata N., Spencer B.F. Jr., Ruiz-Sandoval M. Risk Monitoring of Buildings Using Wireless Sensor Network, 2005, 6 p.

5. Pastushkov G.P., Kisel M.A. Pidgotovchii etap dlia kontroliu nesuchikh konstrukttsii stantsii metro, shcho znakhodit'sia v ekspluatatsii [Preparatory stage for monitoring the load-bearing structures of a metro station in operation]. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, Poltava, PNTU, 2017, vol. 2 (49), pp. 116-125.
6. Bulychev N.S. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii v primerakh i zadachakh [Mechanics of underground structures in examples and tasks]. Moscow, Nedra, 1989, 270 p.
7. Frolov Iu.S., Ivanov T.V. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii: Ucheb. posobie [Mechanics of underground structures: Textbook]. Saint Petersburg, PGUPS, 1997, 102 p.
8. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow, SKAD SOFT, 2011, 736 p.
9. Pastushkov G.P., Pastushkov V.G. O perekhode evropeiskie normy proektirovaniia mostovykh konstrukttsii v Respublike Belarus' [About the transition to the European standards for the design of bridge structures in the Republic of Belarus]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2011, no. 2, pp. 113–121.
10. Pastushkov G., Pastushkov V. Durability of reinforced concrete bridges – the major problem of road branch. Proceedings of the International Conference “Construction and Architecture”. Minsk, 2003, pp. 322–332.
11. Pastushkov V.G., Boiko I.L., Pastushkov G.P. Nauchnoe soprovozhdenie proektirovaniia i stroitel'stva trekhurovnevoi transportnoi razviazki v g. Minske [Scientific support of the design and construction of a three-level transport interchange in Minsk]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty*, 2015, no. 2, pp. 11–17.
12. Skolnik D. Tentative Title: Instrumentation for Structural Health Monitoring. Los Angeles, CA, 2008.
13. Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu. Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control. Geodata S.p.A, Turin, Italy, 2007, 528 p.
14. Bartolomei A.A., Iankovskii L.V. Sposob usileniia osnovaniia lentochnykh fundamentov pri rekonstrukttsii zdaniia i sooruzhenii [A method of strengthening the base of ribbon foundations during the reconstruction of buildings and structures]. Pat. 2032024 Ros. Federatsiia. no.5055193/33; zaiavl. 17.07.92; opubl. 27.03.95, Biul. no. 9, 5 p.
15. Kokodeeva N.E. Standarty dolgovechnogo stroitel'stva [Standards of durable construction]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2012, no.1, pp. 14–18.

Получено 01.11.2021

Об авторах

Пастушков Валерий Геннадьевич (Минск, Республика Беларусь) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели», Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Кисель Максим Александрович (Минск, Республика Беларусь) – старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели», Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Ботьяновская Камилла Казимировна (Минск, Республика Беларусь) – аспирант кафедры «Мосты и тоннели», Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Янковский Леонид Вацлавович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технический сервис и ремонт машин», Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23), доцент кафедры «Автомобили и технологические машины», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yanekperm@yandex.ru).

About the authors

Valery G. Pastushkov (Minsk, Republic of Belarus) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Bridges and Tunnels", Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Maxim A. Kisel (Minsk, Republic of Belarus) – Senior Lecturer of the Department "Bridges and Tunnels", Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Kamilla K. Botyanovskaya (Minsk, Republic of Belarus) – postgraduate student of the Department "Bridges and Tunnels", Belarusian National Technical University (65, Independence ave., Minsk, 220013, e-mail: mitbntu@gmail.com).

Leonid V. Yankovsky (Perm, Russia) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Service and Repair of Machines of Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovsk str., Perm, 614990), Associate Professor of the Department of Automobiles and Technological Machines of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, e-mail: yanekperm@yandex.ru).