

DOI 10.15593/24111678/2021.04.09

УДК 624.282

В.Г. Пастушков¹, А.Н. Вайтович¹, О.В. Костюкович¹, 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

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

На примере строительного объекта показана возможность использования автоматизированной системы мониторинга конструкций и описаны преимущества ее применения. Рассмотрен экспериментальный строительный объект – строительство на участке пересечения просп. Дзержинского и улицы Толстого первого транспортного кольца в г. Минске.

Совместно с компанией SciBim разработана программа по мониторингу напряженно-деформированного состояния строительных конструкций для возводимого съезда эстакады, вентсбойки метрополитена и перегонных тоннелей. Подготовлены варианты использования RFID-технологии для анализа возможностей их дальнейшего применения в производстве сборных и сборно-монолитных железобетонных изделий и внедрены при изготовлении опор и балок пролетного строения.

Описаны и проанализированы основные преимущества вышеперечисленных технологий с точки зрения автоматизации производства и повышения уровня цифровизации.

Применение автоматизированной системы мониторинга состояния строительных конструкций и RFID-технологии – это, безусловно, надежный способ отслеживания и контроля конструктивных элементов на всех этапах их жизненного цикла. Разработанная SciBIM система управления и обслуживания объектов является важной частью всего цикла информационного моделирования зданий и сооружений.

Мониторинг технического состояния конструкций участков перегонных тоннелей, вентсбойки метрополитена, а также строящегося транспортного сооружения подтвердил возможность ведения строительно-монтажных работ при условии непрерывного наблюдения за напряженно-деформированным состоянием конструкций. Технология RFID с возможностью отслеживания положения маркированной конструкции позволяет избежать монтажных ошибок и способствует непрерывному производству работ. Ожидается, что такое комплексное использование технологии наряду с информационными моделями повысит эффективность автоматического сбора данных.

Ключевые слова: BIM-технологии, транспортное сооружение, напряженно-деформированное состояние, эстакадный съезд, перегонные тоннели, напряжения, относительные деформации, перемещения, мониторинг, техническое состояние.

V.G. Pastushkov¹, A.N. Voitovich¹, O.V. Kostyukovich¹, 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

PRACTICE OF APPLICATION OF AUTOMATED MONITORING SYSTEM OF BUILDING STRUCTURES OF TRANSPORT FACILITIES

In the article, on the example of a construction object, the possibility of using an automated monitoring system for structures is shown and the advantages of its use are described. An experimental construction project is examined — construction at the intersection of ave. Dzerzhinsky and Tolstoy street of the first transport ring in Minsk

Together with SciBim LLC, a program has been developed to monitor the stress-strain state of building structures for the ramp under construction, subway ventilation breaks and running tunnels. Options for the use of RFID technology have been prepared to analyze the possibilities of their further application in the production of precast and precast-monolithic reinforced concrete products and implemented in the manufacture of supports and beams of the span structure

The main advantages of the above technologies from the point of view of automation of production and increase of digitalization level are described and analyzed.

The use of an automated system for monitoring the state of building structures and RFID technology is certainly a reliable way to track and control structural elements at all stages of their life cycle. The developed manage-

ment and maintenance system of SciBIM facilities is an important part of the entire cycle of information modeling of buildings and structures.

Monitoring of the technical condition of the structures of sections of interstation tunnels, subway ventilation break, as well as the transport structure under construction confirmed the possibility of construction and installation work under the condition of continuous monitoring of the stressed-deformed state of the structures. RFID technology with the ability to track the position of the marked structure allows avoiding installation errors and facilitates continuous work. This integrated use of technology, along with information models, is expected to increase the efficiency of automatic data collection.

Keywords: BIM technologies, transport structure, stressed-deformed state, trestle exit, interstation tunnels, stresses, relative deformations, movements, monitoring, technical condition.

Введение

В контексте перехода мирового строительного сообщества к BIM-технологиям (информационному моделированию зданий и сооружений) получены массивы информации, исчисляемые терабайтами или даже петабайтами, которую специалисты в области информационных технологий называют «большие данные» (big data) [1–3].

Big data в строительстве наиболее важную роль играет на этапе эксплуатации объектов, так как для полного понимания технического состояния отдельных конструкций и сооружений в целом всегда недостаточно информации, сохранившейся по всем этапам их «жизненного цикла». В результате внедрения BIM-технологий технические сведения о рабочем проекте накапливаются непрерывно, а проектная база данных расширяется, что, в свою очередь, предоставляет новые возможности для анализа и оптимизации. Остается открытым лишь вопрос сбора полезной информации.

На территории Республики Беларусь с 2012 г. [4] ведется активная политика внедрения BIM-технологий в этапы планирования и проектирования сооружений, и в настоящее время уже есть значительные достижения: Национальный олимпийский стадион «Динамо», Центр олимпийской подготовки по художественной гимнастике, объекты Минского метрополитена.

Значительного успеха в работе по внедрению BIM-технологий достигла и сфера образования: были переработаны учебные программы, созданы аудитории с мощными современными компьютерами, преподавателями получено множество сертификатов Autodesk Certified Professional, достигнуты высокие результаты на международных конкурсах Autodesk [5].

BIM-технологии в Республике Беларусь успешно внедряются и на этапе эксплуатации в ходе научно-исследовательской работы.

Прекрасным примером служит созданная в конце 2015 г. информационная модель памятника архитектуры XII в. – Спасо-Преображенской церкви Спасо-Ефросиньевского женского православного монастыря в городе Полоцке, которая представляет собой данные геодезического, визуального, инструментального и электронного мониторингов, результатов пространственных расчетов и анализа технического состояния сооружения [6]. Внедрение инновационных технологий в обработку, систематизацию и анализ полученных big data позволило с достаточной степенью качества определить причины ухудшения технического состояния объекта и, как следствие, предпринять верные пути решения задачи сохранения работоспособности и аутентичности данного архиважного для культуры и страны объекта.

При строительстве транспортного узла на пересечении улицы Филимонова и просп. Независимости в г. Минске была выполнена информационная пространственная динамическая модель всех элементов развязки, включая подземные участки линий метрополитена и построенного путепровода. Модель в полной мере воссоздает фактическую геометрию существующих конструкций [7] и включает в себя данные геодезического, визуального, инструментального и электронного мониторингов, результатов пространственных расчетов, данные о техническом состоянии сооружения [8], а также облако точек, полученное по результатам лазерного 3D-сканирования [9].

Связующим звеном между вышеупомянутыми этапами BIM, как и во всем его цикле, служит контекстная модель. Эта модель включает в себя различные характеристики элемента: от технологических и геометрических до физическо-механических. Единственным, не затронутым в этой статье этапом жизненного цикла зданий и объектов инфраструктуры является изготовление конструкций и их непосредственное возведение.

Здесь важным элементом должна послужить связь информационной модели, выполненной на этапе проектирования [10], и готовой конструкции как части уже возведенного объекта, определение места расположения элемента и оперативного получения всех заложенных данных во время изготовления, складирования и установки на объекте. Информация о техническом состоянии и обслуживании конструкций постоянно обновляется и автоматически заносится в общую базу данных.

Основная цель инженеров-строителей – проектировать, строить и поддерживать в надлежащем состоянии объекты инфраструктуры. Развитие экономики напрямую зависит от разветвленности транспортной сети, а также ее целостности. Однако это развитие, наряду с устаревающей инфраструктурой, представляет серьезную проблему для слаженной работы мировой логистики. Состояние мостовых сооружений, зачастую не соответствующих растущим транспортным нагрузкам, в сочетании с последствиями стихийных бедствий может создавать серьезную угрозу безопасности.

Проводимые инструментальные, хотя в основном визуальные, обследования конструкций ненадежны и зачастую в зависимости от характера повреждения и возможности доступа к конструкциям не отражают полной картины их технического состояния. Многие неразрушающие методы контроля (рентгеновское и ультразвуковое сканирование) дают значительный спектр информации, но являются дорогостоящими и не предназначены для широкомасштабного использования. Недорогие беспроводные датчики, которые можно устанавливать как внутри, так и на поверхности различных типов конструкций, стали наиболее оптимальным решением для преодоления недостатков предыдущих методов.

Объект исследования

Городской автодорожный путепровод (рис. 1) для транспортной развязки на пересечении ул. 1-е Кольцо (ул. Толстого) с просп. Независимости запроектирован двухполосным с длиной по задним граням открьлков 93,54 м и шириной – 12,50 м. Схема сооружения 19,5+22,0+21,0+22,0+14,0+22,0+14,0+20,3+2×16,5 м; габарит – Г-0,75+9,00+1,25 м.

Пролетные строения путепровода запроектированы индивидуального изготовления с монолитной плитой пролетного строения.

В поперечном сечении путепровода 11 балок с шагом 1,1 м. На опоры под номерами 1, 3, 5, 8, 11 (через полиуретановые подкладки) опираются балки пролетных строений, а на опорах под номерами 2, 4, 6, 7, 9, 10 выполнены монолитные железобетонные скрытые ригели с жестким защемлением в них балок. Крайние опоры – номер 1, 11 – монолитные железобетонные индивидуального проектирования на буронабивных сваях со шкафной стенкой и открьлками. Промежуточные опоры – номер 3–10 – монолитные железобетонные индивидуального проектирования стоечного типа на буронабивных сваях.



Рис. 1. Общий вид строящегося эстакадного съезда

В ходе выполнения строительно-монтажных работ в основание опоры номер 7, согласно изменениям проектной документации, было добавлено две сваи. Для уменьшения воздействия на обделку тоннелей под ростверками опор номер 6–11 после устройства бетонной подготовки предусмотрена укладка теплоизоляционных плит из пенопласта по слою песка.

Сопряжение путепровода с насыпями подходов выполнено при помощи сборно-монолитных переходных плит. В зону влияния строительства эстакадного съезда первого городского транспортного кольца попадают участки перегонных тоннелей открытого и закрытого способа работ (ОСР и ЗСР соответственно), а также вентсбойка новой линии Минского метрополитена. Участки тоннелей ОСР протяженностью 40,4 м запроектированы на естественном основании в сборно-монолитном исполнении.

Стеновые блоки выполнены высотой 5,37 м, шириной 1,48 м с толщиной стенки 0,25 м из бетона класса С 25/30. Объединение сборных стеновых блоков с монолитной лотковой плитой выполнено за счет арматурных выпусков из стеновых блоков.

Плиты перекрытия сборные длиной 4,5 м, шириной 1,48 м и высотой 0,5 м, шарнирно опираются на консольные выступы стеновых блоков. Плиты выполнены из бетона класса С 25/30, по водонепроницаемости W 6, по морозостойкости F 150.

Для тоннелей закрытого способа работ принята сборная железобетонная высокоточная обделка диаметром $D_{н}/D_{вн} = 6,0/5,4$ м. При этом блоки сплошного сечения толщиной 30 см, а шириной 1,4 м. Каждое кольцо состоит из семи блоков (рис. 2), объединенных между собой дюбелями. На участках тоннелей, примыкающих к открытому способу работ (по 10 колец с каждой стороны), устанавливаются кольца с металлическими дюбелями. Глубина заложения тоннелей составляет от 3,0 до 12,0 м. Обделка выполнена из бетона класса С 35/45, марка по водонепроницаемости W 12, по морозостойкости F 300. Внутренняя поверхность тоннелей покрывается раствором белого цемента.



Рис. 2. Общий вид перегонного тоннеля, попадающего в зону влияния строительства эстакадного съезда

Вентсбойка запроектирована на естественном основании протяженностью 18,0 м. Конструкция вентсбойки – сборно-монолитная прямоугольная четырехпролетная с внутренним рамным каркасом. Колонны (9 шт.) монолитные сечением 0,5×0,6 м объединены монолитными балками длиной 18,0 м, шириной 1,0 м (понизу) и консольными выступами, предусмотренными для опирания плит покрытия. Плиты покрытия выполнены в сборном (1,5 × 0,7 м) и монолитном исполнении.

Для установки клапанов предусмотрены внутренние монолитные перегородки и монолитный участок покрытия. Сооружение отделено от тоннелей ЗСР и СТП деформационными швами.

Экспериментальные исследования конструкций в процессе строительства путепровода и перегонных тоннелей метрополитена

Сложность строительства эстакадного съезда заключалась в расположенных под эстакадой и попадающих в зону влияния строительства перегонных тоннелей третьей линии Минского метрополитена.

Для обеспечения безаварийной работы конструкций было принято решение о проведении мониторинга – непрерывного контроля в натуральных условиях деформаций и усилий в основных несущих строительных конструкциях транспортного сооружения (эстакадного съезда), перегонных тоннелей, вентсбойки метрополитена и проверка соответствия их расчетным значениям.

Непрерывное наблюдение за напряженно-деформированным состоянием конструкций эстакадного съезда и перегонных тоннелей выполнялось при помощи автоматизированной системы мониторинга SciBim.

Для анализа возможных перемещений и напряжений в конструкциях участков перегонных тоннелей и вентсбойки метрополитена, а также строящегося эстакадного съезда была разработана трехмерная модель объекта мониторинга. Создание модели осуществлялось на основе проектных чертежей и результатов инструментального мониторинга конструкций [11–13].

Для решения вопроса электронной маркировки элементов конструкций строящегося эстакадного съезда авторами совместно с компанией SciBim разработана система управления и обслуживания объектов на основе технологии RFID. Данная технология с возможностью отслеживания положения маркированной конструкции позволяет избежать монтажных ошибок и способствует непрерывному производству работ [14–17].

Расчет по минимизации воздействия строительства транспортного сооружения на тоннели метрополитена

Разработка расчетной модели выполнялась на основании проектных чертежей, результатов инженерно-геологических изысканий и с учетом технологии производства работ по строительству транспортного сооружения.

В геоморфологическом отношении участок строительства приурочен к флювиогляциальной равнине. Естественный рельеф изменен при строительстве существующей железной дороги Минск – Молодечно и железнодорожной ветки Минск Северный – Минск Товарный, ул. Толстого, прокладке коммуникаций, строительстве сооружений. Участок пересекают многочисленные подземные коммуникации различного назначения.

Неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений не наблюдается. Поверхностный сток организован системой ливневой канализации.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием верховодки, вод спорадического распространения, спорадических, моренных отложений и межморенных вод днепровско-сожского горизонта.

Расчет выполнен с использованием интегрированного программного комплекса SOFiSTiK (разработчик SOFiSTiK AG, Германия), основанного на методе конечных элементов [18].

Расчетная модель (рис. 3) включает в себя следующие элементы: сваи, ростверки, стойки промежуточных опор, ригеля, балки и плиты пролетных строений.

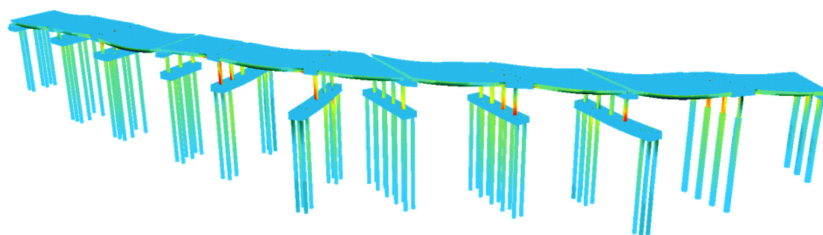


Рис. 3. Общий вид КЭ-модели транспортного сооружения

Сваи, стойки промежуточных опор, балки пролетных строений моделировались стержневыми элементами; ростверки, ригеля и плита пролетного строения – пластинчатыми.

Ограждения безопасности, перильные ограждения, слои покрытия мостового полотна и тротуаров моделировались в виде нагрузок.

Временная вертикальная нагрузка принималась согласно разделу 6 ТКП 45-3.03-232-2011 «Мосты и трубы. Строительные нормы проектирования» и представлена в виде: 1) полос автомобильной нагрузки АК, каждая из которых включает одну двухосную тележку с давлением на ось 10 К, и равномерно распределенную нагрузку интенсивностью К, кН (на обе колес). Класс нагрузки 14 (А14) – величина нагрузки на ось 140 кН, интенсивность равномерно распределенной нагрузки – 14 кН/м; 2) одиночной тяжелой четырехколесной нагрузки НК весом 1098 кН (НК-112); 3) толпы на тротуарах автодорожных мостов (при учете совместно с другими действующими нагрузками) – 2 кПа.

При расчете конструкций эстакадного съезда использовались основные сочетания нагрузок. По результатам расчетов были получены усилия, возникающие в буронабивных сваях и составляющие усилия (рис. 4, 5), передаваемые на грунт от загружений.

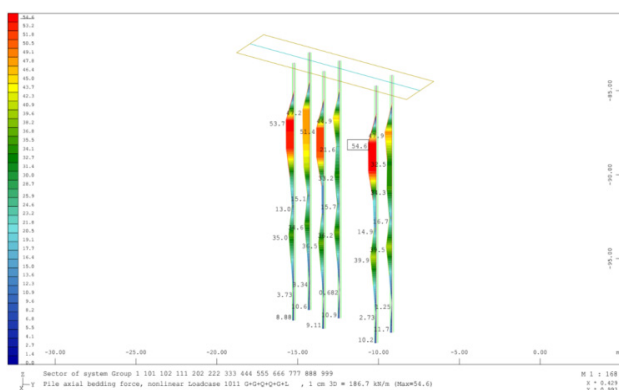


Рис. 4. Вертикальная составляющая давления от свай опоры номер 11 на грунт от нормативного сочетания нагрузок, кН/м

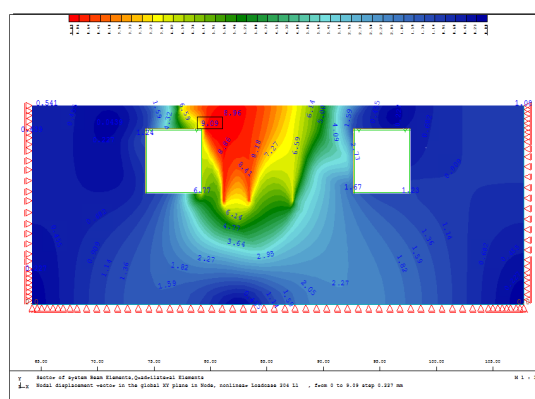


Рис. 5. Изополя вектора перемещений на стадии 5 – строительство опоры номер 11

Расчет обделки открытого способа работ выполнен в плоской постановке с определением перемещений, усилий и относительных деформаций в несущих конструкциях тоннелей. Для анализа возможных перемещений в конструкциях участка перегонных тоннелей, попадающих в зону влияния строительства объекта, была разработана трехмерная расчетная модель. Предварительно геометрическая модель была создана в программе AutoCAD и далее импортирована непосредственно в расчетный комплекс Midas GTS NX. Каждому элементу модели задавались определенные свойства, в которых закладывались материал, сечение или другие свойства. Вся модель представляет собой базу данных из 1D-, 2D- и 3D-свойств.

Конечно-элементная расчетная схема состоит из одномерных (буронабивные сваи) трехмерных элементов (ростверки, тоннели, вентсбойка, санузел, насыпи съездов), а также интерфейсов, которые моделируют контакт между конструкциями и грунтом. После завершения построения геометрической модели она была разбита на сетку конечных элементов (рис. 6).

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.

Нагрузки от сооружения (рис. 7) задавались по результатам расчета, выполненного в ПК SOFiStiK.

Что касается граничных условий и собственного веса конструкций, то они задавались автоматически. В данном расчете моделировались сваи и ростверки под опоры. В расчетной модели давление, передаваемое непосредственно от ростверков опор эстакады между сваями на

конструкции тоннелей метрополитена, происходит через трехмерные конечные элементы с заданными жесткостными параметрами в соответствии с характеристиками грунтов. Изополя перемещений – от давления, передаваемого на тоннели метрополитена непосредственно ростверками опор эстакады между сваями.

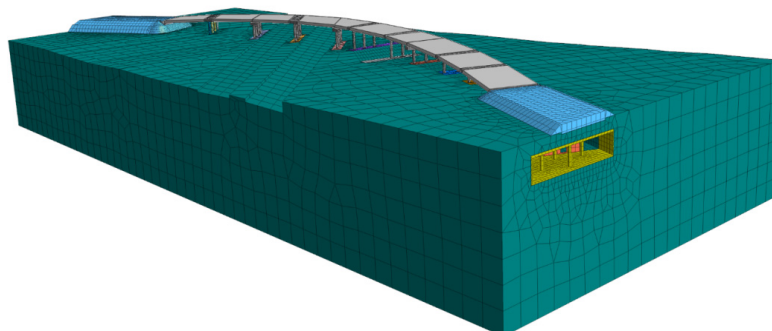


Рис. 6. Общий вид сетки конечных элементов расчетной модели

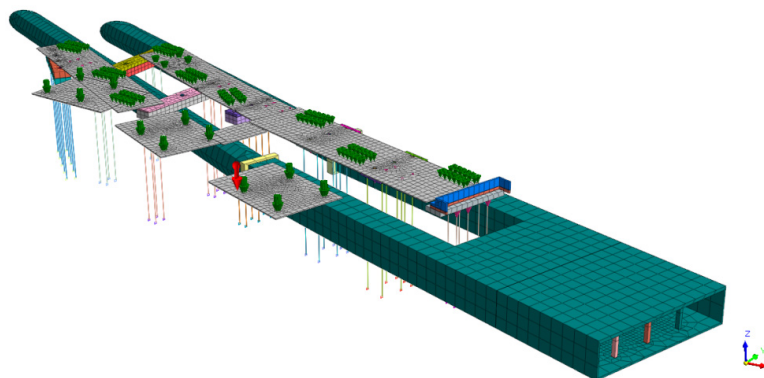


Рис. 7. Схема нагрузок машин и механизмов при устройстве свай и монтаже пролетных строений транспортного съезда

На основе анализа и обобщения материалов исследования и расчета по минимизации воздействия транспортного сооружения на тоннели метрополитена (рис. 8) проведена комплексная оценка и даны рекомендации о необходимости выполнения мониторинга с научным сопровождением проектирования и строительства, а также о проведении натурных испытаний после окончания строительно-монтажных работ.

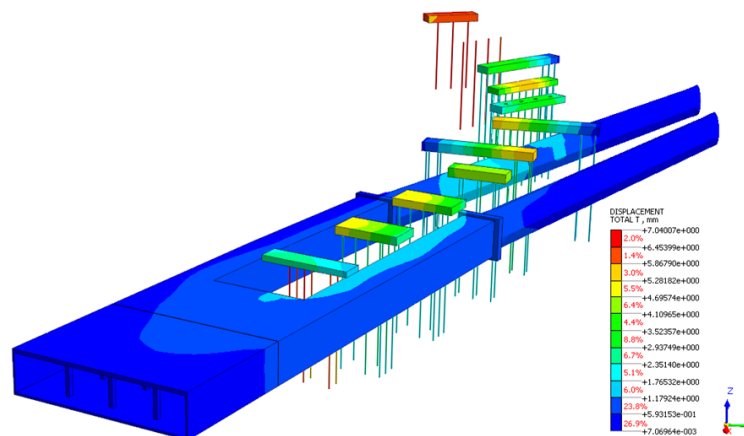


Рис. 8. Результаты расчёта максимальных суммарных перемещений в конструкциях, возникающих на стадии испытания сооружения

Мониторинг НДС конструкций в процессе строительства путепровода и перегонных тоннелей метрополитена

Для измерения деформаций в несущих конструкциях перегонных тоннелей метрополитена были установлены струнные накладные тензометры SciBim SVW и двухосевые инклинометры SciBim BI.

Показания с тензометров и двухосевых инклинометров опрашиваются регистраторами, установленными в тоннелях метрополитена. Регистратор SciBim DL является частью автоматизированной системы мониторинга состояния строительных конструкций (АСМССК), позволяет в автономном и режиме реального времени опрашивать показания измерительного оборудования и передавать на удаленный сервер. Для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций перегонных тоннелей метрополитена было установлено:

- 102 накладных струнных тензометра SciBim SVW;
- 18 двухосевых инклинометров SciBim BI;
- четыре регистратора SciBim DL.

Для измерения деформаций в конструкциях эстакадного съезда установлены закладные тензометры SciGauge EVW в сваях в количестве 36 штук, в ростверках опор – 10 штук, в стойках опор – 15 штук, и в заводских условиях при изготовлении балок пролетных строений (рис. 9). Всего установлено 63 закладных струнных тензометра.



Рис. 9. Установка закладного струнного тензометра SciBim EVW на арматуру каркаса балки

Для считывания показаний струнных тензометров, установленных на объекте мониторинга, коммутации сигналов, а также обеспечения взаимодействия с другими автоматизированными системами предназначен регистратор данных SciBim DL. Датчики к нему подключены при помощи сигнальных кабелей.

С помощью специализированного программного обеспечения, входящего в АСМССК SciView 3D, показания тензометров преобразуются в показания относительных деформаций ϵ конструкции в микрострейнах и далее в соответствии с реальным модулем упругости высчитываются напряжения в элементах конструкций; показания инклинометров преобразуются в относительные перемещения в миллиметрах.

Регистратор является ключевым элементом автоматизированных систем контроля напряженно-деформированных состояний строительных конструкций и позволяет в автономном и режиме реального времени опрашивать и сохранять показания датчиков.

Применение RFID-технологии

Специалистами кафедры «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета и завода железобетонных мостовых конструкций ОАО «Дорстройиндустрия» было выполнено научно-экспериментальное исследование конструкций по инновационной маркировке с применением электронных бесконтактных меток на объекте исследований.

Для решения вопроса электронной маркировки элементов конструкций авторами совместно с компанией SciVim разработана система управления и обслуживания объектов на основе технологии RFID.

Предварительно RFID-меткам UHF Concrete SciVim и ISO Card SciVim были присвоены уникальные коды, которые привязаны к информационной модели исследуемого элемента (рис. 10). Применяемые RFID-метки имеют рабочий диапазон температуры в пределах от минус 30 °С до плюс 75 °С, что позволяет их использовать при изготовлении балок с автоклавной обработкой бетона.

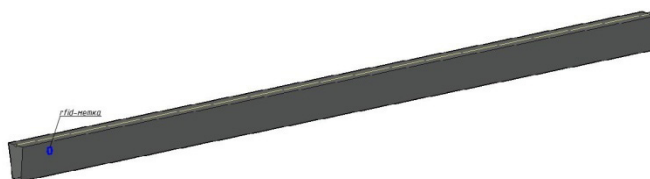


Рис. 10. Принципиальная схема размещения RFID-метки в балке пролетного строения

После подготовки арматурного каркаса балки Б-3 пролетного строения L_{6-7} к продольному стержню в зоне опирания на опору номер 6 посредством вязальной проволоки через специально предусмотренные отверстия была установлена электронная бесконтактная RFID-метка UHF Concrete SciVim. В процессе бетонирования балки RFID-метка UHF Concrete SciVim оказалась в толще бетонной массы, и тем самым была обеспечена ее защита от внешних воздействий.

RFID-метка ISO Card SciGauge имеет небольшой радиус действия и поэтому должна быть надежно установлена на поверхности элемента (рис. 11).



Рис. 11. Расположение высокотемпературной пассивной RFID-метки ISO Card SciVim на поверхности балки

Было принято решение о закреплении ее в проектное положение к унифицированной опалубке до установки арматурного каркаса в зоне опирания на опору номер 6 на расстоянии 25,0 см от торца балки. На пятые сутки твердения бетона балки Б-3 пролетного строения L_{6-7} была выполнена распалубка, и RFID-метки были повторно проверены на работоспособность, после чего

балку транспортировали на место строительства путепровода с последующим монтажом ее в проектное положение, что позволило идентифицировать элемент на следующих важных этапах: изготовление, транспортировка, складирование и правильный монтаж в проектное положение.

При монтаже каркаса стойки промежуточной опоры на рабочую арматуру также была установлена RFID-метка UHF Concrete SciBim (рис. 12).



Рис. 12. Высокотемпературная пассивная RFID-метка на рабочей арматуре каркаса стойки

Натурные испытания конструкций путепровода

Целями проведения испытаний эстакады являются:

- определение действительного напряженно-деформированного состояния конструкций эстакады при действии испытательных нагрузок;
- анализ действительного напряженно-деформированного состояния конструкций участка тоннелей метрополитена при действии испытательных нагрузок на эстакаде;
- выявление степени соответствия работы элементов конструкций сооружений расчетным проектным предпосылкам и при необходимости уточнение расчетных моделей;
- оценка возможности пропуска проектной нагрузки по мосту, разработка рекомендаций по режиму эксплуатации моста.

Программой работ было предусмотрено загрузке проезжей части эстакады (рис. 13) сосредоточенными временными испытательными нагрузками – автосамосвалы МАЗ-5516 и КамАЗ-6520.



Рис. 13. Установка испытательной нагрузки в зоне крайней опоры эстакадного съезда

При испытаниях осуществляется измерение следующих параметров:

- напряжений (относительных деформаций) в нижних и верхних фибрах железобетонных балок пролетного строения в наиболее нагруженных сечениях;
- напряжений (относительных деформаций) в нижних фибрах железобетонной плиты проезжей части над балками пролетных строений;
- вертикальных перемещений (прогибов) наиболее нагруженных балок пролетных строений в середине пролета;
- напряжений (относительных деформаций) в фибрах железобетонных конструкций участка тоннелей метрополитена с внутренней стороны;
- вертикальных и горизонтальных смещений контролируемых сечений участка тоннелей метрополитена.

График изменения напряжений, возникающих в ростверке и стойках опоры номер 10 в период проведения испытаний (загрузки № 1–9), показан на рис. 14.

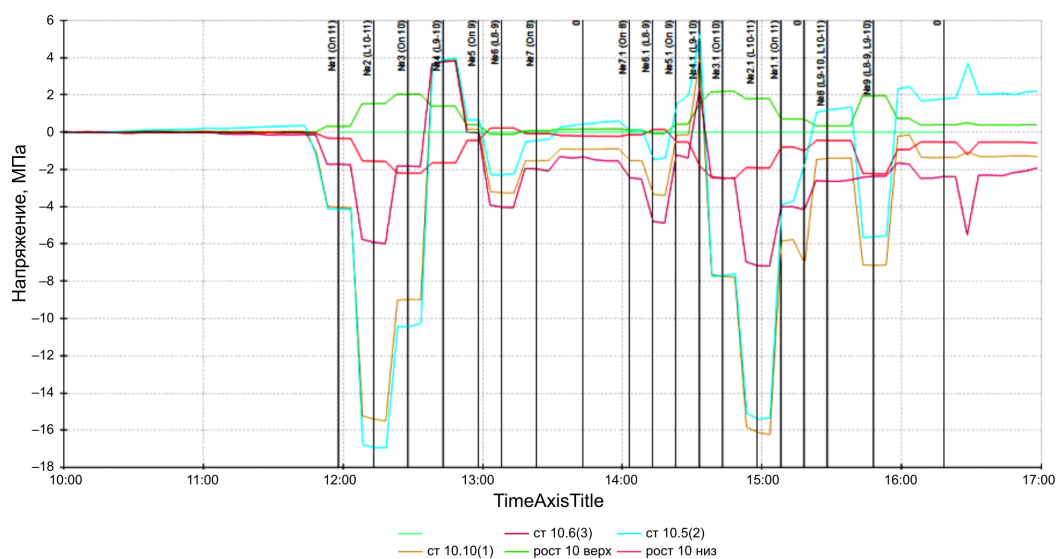


Рис. 14. График изменения напряжений, возникающих в ростверке и стойках опоры номер 10

Измерение напряжений (относительных деформаций) осуществляется при помощи электронных струнных тензометров накладного и закладного исполнения. Измерение вертикальных перемещений происходит при помощи механических и электронных прогибомеров, электронных инклинометров с контролем показаний при помощи оптических нивелиров.

Оценивание динамических характеристик пролетных строений (логарифмический декремент затухания, частоты вынужденных и собственных колебаний, динамический коэффициент) выполняется в ходе обработки сохраненных записей тензостанции.

По результатам испытаний конструктивный коэффициент K :

- для балок пролетных строений составляет 0,41–0,98 по прогибам и 0,27–0,99 по напряжениям;
- для конструкций опор номер 6–11 – 0,50–0,99, что свидетельствует о работе конструкций пролетного строения и опор в высокой степени соответствия теоретическим расчетным предпосылкам.

Показатель работы конструкции α , выраженный в соотношении измеренных упругих и остаточных деформаций, для балок пролетных строений составляет 0,00–0,21 по прогибам и 0,00–0,46 по напряжениям.

Максимальные напряжения в тоннельной обделке при проведении испытаний эстакадного съезда составили до 3 МПа и не превысили допустимых критериев, установленных в программе испытаний.

В результате динамических испытаний в пролетах L_{6-7} – L_{8-9} установлено, что работа пролетного строения под динамическим воздействием испытательной нагрузки является удовлетворительной. Установленная по результатам динамических испытаний первая собственная частота колебаний пролётного строения составляет 5,64–5,65 Гц и находится за пределами запрещенного интервала по СН 3.03.01. Определенные по результатам испытаний фактические динамические коэффициенты составляют 1,24–1,34.

Заключение

Применение автоматизированной системы мониторинга состояния строительных конструкций и RFID-технологии – надежный способ отслеживания и контроля конструкционных элементов на всех этапах их жизненного цикла.

Разработанная SciBIM система управления и обслуживания объектов является важной частью всего цикла информационного моделирования зданий и сооружений.

Мониторинг технического состояния конструкций участков перегонных тоннелей, вентсбойки метрополитена, а также строящегося транспортного сооружения подтвердил возможность ведения строительно-монтажных работ при условии непрерывного наблюдения за напряженно-деформированным состоянием конструкций.

Впервые на территории Республики Беларусь была разработана и успешно применена в заводских условиях инновационная маркировка железобетонных конструкций с использованием электронных бесконтактных меток.

Технология RFID с возможностью отслеживания положения маркированной конструкции позволяет избежать монтажных ошибок и способствует непрерывному производству работ.

Результаты проведенной научно-исследовательской работы привели к необходимости постановки вопроса о внедрении компьютеризированной единой системы для доступа к информации о текущем состоянии строительного элемента в любой момент времени.

Ожидается, что такое комплексное использование технологии наряду с информационными моделями повысит эффективность автоматического сбора данных.

Особую благодарность выражаем коллективу проектировщиков, строителям, Дирекции по строительству Минского метрополитена и работникам завода мостовых конструкций за поддержку и неоценимую помощь на всех этапах мониторинга.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. BIM технологии в строительстве: новый стандарт отрасли – PlanRadar: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.planradar.com/ru/bim-tekhnologii-v-stroitelstve/> (дата обращения: 12.05.2021).
2. BIM: как мы строим строителей на стройке: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/company/croc/blog/335808/> (дата обращения: 12.05.2021).
3. Что такое BIM. Информационное моделирование зданий. Autodesk: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autodesk.ru/solutions/bim> (дата обращения: 12.05.2021).
4. Об утверждении отраслевой программы по разработке и внедрению информационных технологий комплексной автоматизации проектирования и поддержки жизненного цикла здания, сооружения на 2012–2015 годы: Постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 31.01.2012 № 4. – Минск, 2012.
5. Комплексный подход к применению BIM-технологий при подготовке специалистов архитектурно-строительной отрасли / П. Тищенко [и др.] // Архитектура и строительство Беларуси. – 2015. – № 5. – С. 53–55.

6. Shykuts K.K., Botyanovskiy A.A., Pastushkov V.G. Investigation of ground and foundation condition influence on the Spaso-Preobrozhenskaya church constructions in Polotsk // *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. – 2017. – № 2 (49). – P. 177–185.
7. Пастушков В.Г., Бойко И.Л., Пастушков Г.П. Научное сопровождение проектирования и строительства трехуровневой транспортной развязки в г. Минске // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2015. – № 2 (16). – С. 11–17.
8. Вайтович А.Н., Шикуть К.К. Испытание путепровода с применением системы мониторинга АСМК // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практич. конф.* – 2016. – Т. 1. – С. 264–267.
9. Ботяновский А.А., Пастушко В.Г. Применение BIM-технологий и новейшего оборудования при исследовании фактического технического состояния мостового сооружения // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практич. конф.* – 2015. – Т. 1. – С. 342–345.
10. Пастушков Г.П., Пастушков В.Г. Основные требования к проектированию мостовых конструкций в соответствии с европейскими нормами // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практич. конф.* – 2013. – Т. 3. – С. 368–375.
11. Бетонные и железобетонные конструкции. СНБ 5.03.01-02. – Минстройархитектуры. – Минск.: Стройтехнорм, 2003. – 139 с.
12. Kurata N., Spencer B.F. Jr., Ruiz-Sandoval M. Risk Monitoring of Buildings Using Wireless Sensor Network. 2005. – 6 p.
13. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
14. Григорьев П.В. Особенности технологии RFID и ее применение // *Молодой ученый*. – 2016. – № 11. – С. 317–322.
15. Финкенцеллер К. RFID-технологии. – М.: ДМК Пресс, Додэка XXI, Hanser Publishers, 2016. – 490 с.
16. Обзор технологий и стандартов RFID-систем / Н.А. Верзун [и др.] // *Информационные технологии и телекоммуникации*. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 1–11.
17. Стандарты долговечного строительства / Н.Е. Кокодева [и др.] // *Жилищное строительство*. – 2012. – № 1. – С. 14–18.
18. Софистика. Программное обеспечение FEM, BIM и CAD для инженеров-строителей: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sofistik.com/> (дата обращения: 12.05.2021).

References

1. BIM tekhnologii v stroitel'stve: novyi standart otrasli – PlanRadar, available at: <https://www.planradar.com/ru/bim-tekhnologii-v-stroitel'stve/> (accessed 12 May 2021).
2. BIM: kak my stroim stroitelei na stroike, available at: <https://habr.com/ru/company/croc/blog/335808/> (accessed 12 May 2021).
3. Chto takoe BIM. Informatsionnoe modelirovanie zdaniy. Autodesk, available at: <https://www.autodesk.ru/solutions/bim> (accessed 12 May 2021).
4. Ob utverzhdenii otraslevoi programmy po razrabotke i vnedreniiu informatsionnykh tekhnologii kompleksnoi avtomatizatsii proektirovaniia i podderzhki zhiznennogo tsikla zdaniia, sooruzheniia na 2012–2015 gody [“On approval of the industry program for the development and implementation of information technologies for integrated automation of design and support of the life cycle of buildings, structures for 2012–2015”]. Postanovlenie Ministerstva arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' ot 31.01.2012, no. 4. Minsk, 2012.
5. Tishchenko P. et al. Kompleksnyi podkhod k primeneniiu BIM-tekhnologii pri podgotovke spetsialistov arkhitekturno-stroitel'noi otrasli [An integrated approach to the use of BIM technologies in the training of specialists in the architectural and construction industry]. *Arkhitectura i stroitel'stvo Belarusi*, 2015, no. 5, pp. 53–55.
6. Shykuts K.K., Botyanovskiy A.A., Pastushkov V.G. Investigation of ground and foundation condition influence on the Spaso-Preobrozhenskaya church constructions in Polotsk. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2017, no. 2 (49), pp. 177–185.
7. 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 (16), pp. 11–17.

8. Vaitovich A.N., Shikut' K.K. Ispytanie puteprovoda s primeneniem sistemy monitoringa ASMK [Testing of the overpass using the AFM monitoring system]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: Proceedings of the Conference*, 2016, vol. 1, pp. 264-267.
9. Botianovskii A.A., Pastushko V.G. Primenenie BIM-tekhnologii i noveishego oborudovaniia pri issledovanii fakticheskogo tekhnicheskogo sostoiianiia mostovogo sooruzheniia [The use of BIM technologies and the latest equipment in the study of the actual technical condition of the bridge structure]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: Proceedings of the Conference*, 2015, vol. 1, pp. 342-345.
10. Pastushkov G.P., Pastushkov V.G. Osnovnye trebovaniia k proektirovaniu mostovykh konstruksii v sootvetstvii s evropeiskimi normami [Basic requirements for the design of bridge structures in accordance with European standards]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: Proceedings of the Conference*, 2013, vol. 3, pp. 368-375.
11. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. SNB 5.03.01-02 [Concrete and reinforced concrete structures. SNB 5.03.01-02.]. *Minstroy arkhitektury, Minsk, Stroitekhnorm*, 2003, 139 p.
12. Kurata N., Spencer B.F. Jr., Ruiz-Sandoval M. Risk Monitoring of Buildings Using Wireless Sensor Network. 2005, 6 p.
13. 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.
14. Grigor'ev P.V. et al. Osobennosti tekhnologii RFID i ee primeneniie [Features of RFID technology and its application]. *Molodoi uchenyi*, 2016, no. 11, pp. 317-322.
15. Finkentseller K. RFID-tekhnologii [RFID technologies]. Moscow, DMK Press, Dodeka XXI, Hanser Publishers, 2016, 490 p.
16. Verzun N.A. et al. Obzor tekhnologii i standartov RFID sistem [Overview of RFID system technologies and standards]. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 1-11.
17. Kokodeeva N.E. Standarty dolgovechnogo stroitel'stva [Standards of durable construction]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2012, no. 1, pp. 14-18.
18. Sofistika. Programmnoe obespechenie FEM, BIM i CAD dlia inzhenerov-stroitelei, available at: <https://www.sofistik.com/> (accessed 12 May 2021).

Получено 29.10.2021

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).

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

Костюкович Ольга Витальевна (Минск, Республика Беларусь) – старший преподаватель 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).

Alexander N. Vaitovich (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).

Olga V. Kostyukovich (Minsk, Republic of Belarus) – Senior lecturer 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).