

# НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ТРЕХУРОВНЕВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКИ В г. МИНСКЕ

## SCIENTIFIC SUPPORT OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF A THREE-LEVEL TRAVEL JUNCTION IN THE CITY OF MINSK



**В. Г. Пастушков,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Мосты  
и тоннели» Белорусского  
национального технического  
университета, г. Минск,  
Беларусь

**И. Л. Бойко,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Мосты  
и тоннели» Белорусского  
национального технического  
университета, г. Минск,  
Беларусь

**Г. П. Пастушков,**  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Мосты и тоннели»  
Белорусского национального  
технического университета,  
г. Минск, Беларусь

*В статье представлены результаты работ по научному сопровождению и мониторингу строительства транспортной развязки на пересечении просп. Независимости с ул. Филимонова над перегонными тоннелями и другими сооружениями Минского метрополитена.*

*При проектировании и производстве строительного-монтажных работ был применен ряд инновационных технологий, что позволило выполнить строительные-монтажные работы в сжатые сроки и обеспечить ведение работ в три смены.*

*This article presents the results of works on scientific support and monitoring of the transport junction at the intersection of Nezavisimosti Avenue with Filimonov Street over the main line tunnels and other structures of the Minsk underground.*

*When planning and performing the building and installation works, a number of innovative technologies were applied. The problem of performing of the building and installation works on a tight schedule was solved and a three-shift work system was provided.*

### Введение

Строительство транспортной развязки на пересечении просп. Независимости с ул. Филимонова осуществлялось над эксплуатируемыми перегонными тоннелями и другими сооружениями Минского метрополитена.

Рассматриваемый участок перегонных тоннелей расположен на первой линии Минского метрополитена между станциями «Московская» и «Восток» и введен в эксплуатацию 26 декабря 1986 г. Проектом предусматривалось строительство над тоннелями метрополитена путепровода с типовыми сборными железобетонными пролетными строениями для автодорожных мостов длиной 21 и 24 м.

Исходными данными по конструктивно-технологическим решениям транспортной развязки явились предложения институтов «Минскинжпроект» и «Минскметропроект».

### Конструктивно-технологические решения

В зону влияния строительства путепровода попадали тоннели метрополитена на перегоне «ст. Московская – ст. Восток», проходка которых осуществлена закрытым способом, а также вентсбойка и венткамера, выполненные открытым способом. Несущими

конструкциями тоннелей на контролируемом участке являются бетонная и чугунная обделка, состоящие из отдельных колец номинальной шириной 1,0 м. Перегонные тоннели конструктивно отделены друг от друга вентсбойкой.

Железобетонная обделка обоих тоннелей выполнена с применением колец, состоящих из ребристых железобетонных блоков. Вверху каждого из колец обделки установлены ключевые вкладыши (блоки).

Чугунная обделка выполнена из тюбингов производства завода «Лентрублин». Кольца обделки соединены между собой в продольном и поперечном направлениях с помощью болтов. Швы между тюбингами зачеканены свинцом и заделаны раствором.

Несущими конструкциями вентсбойки являются сборно-монолитное днище, монолитные

железобетонные рамы, сборные и монолитные стены. Покрытие состоит из сборных железобетонных плит и монолитных участков.

Первоначально над тоннелями метрополитена был запроектирован путепровод длиной 200 м, в основании которого предусматривалось устройство монолитной железобетонной распределительной плиты (рис. 1).

Опоры путепровода и эстакад опирались на буронабивные сваи. Расстояние в свету от наружных граней конструкций сооружений метрополитена до поверхности свай составляло 1,5 м.

Первоначальный вариант с путепроводом длиной 200 м по причине его большой стоимости был отвергнут заказчиком, после чего были рассмотрены другие конструктивные решения с путепроводом меньшей длины. Окончатель-

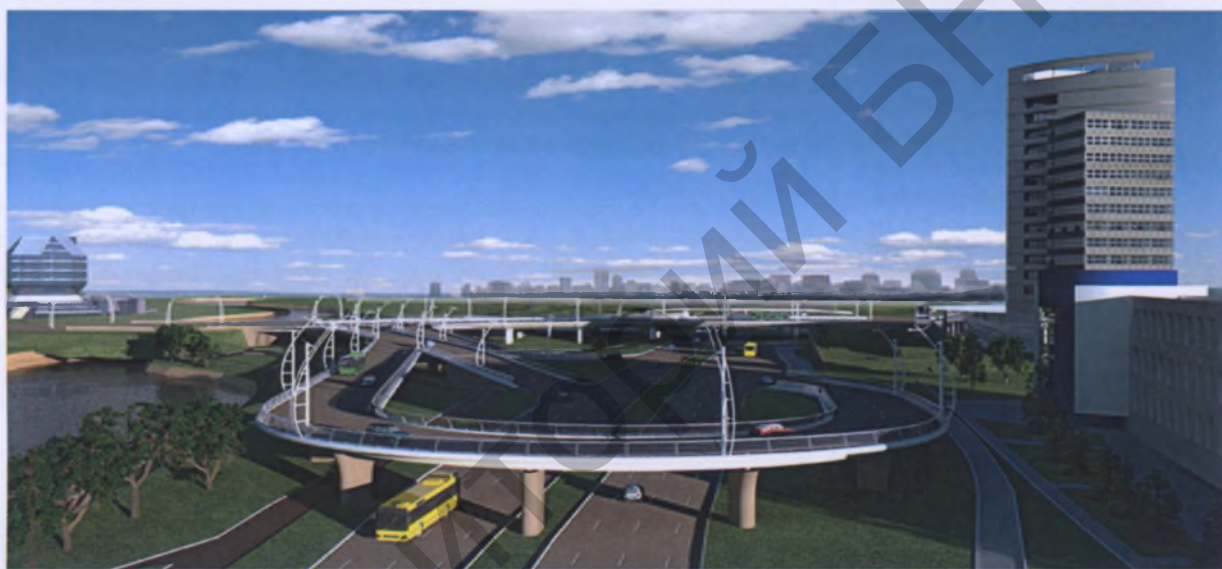


Рисунок 1 – Общий вид развязки длиной 200 м



Рисунок 2 – Общий вид развязки длиной 45 м

ный вариант развязки предполагал строительство путепровода длиной 45 м, а подъездные пути к нему выполнялись в форме насыпи (рис. 2).

### Пространственные расчеты

В Республике Беларусь с 01.01.2010 введены в действие технические кодексы установившейся практики (ТКП EN), а также национальные приложения к ним на проектирование мостов и труб, идентичные нормам проектирования Евросоюза. Введенные нормативные документы содержат последние достижения науки в области теории расчета и сохраняют все лучшее и передовое из отечественных норм [1–4, 5–8].

В соответствии с требованиями вышеуказанных норм, для оценки влияния возводимой транспортной развязки на существующие конструкции перегонных тоннелей метрополитена были выполнены расчеты с применением современных расчетных программ и комплексов. При расчете обделок, работающих в режиме взаимовлияющих деформаций с грунтовым массивом, конструкция обделки и окружающий ее грунтовой массив рассматривались как единая система [9].

Расчетная схема системы «строящиеся конструкции – обделка – грунтовой массив» представлялась в виде среды, разбитой на конечные элементы, которые соединялись между собой жесткими или упругими связями. Расчетные па-

раметры комплексной системы изменялись в соответствии с намеченной последовательностью этапов строительства для получения необходимых контролируемых показателей.

Рассматриваемый грунтовой массив, ограниченный полупространством, и расположенные в нем конструкции разбивались на конечное число элементов, соединенных между собой в узлах. Рассматриваемое полупространство разбивалось на объемные элементы. Так как трудоемкость такого расчета значительно возрастает, для его выполнения требуется применение программных комплексов, специально ориентированных на проектирование мостовых и тоннельных сооружений.

Метод конечных элементов позволяет производить расчеты обделок не только на основе взаимодействия модели с грунтовым массивом, но и с учетом нелинейности деформирования массива и обделки. Размеры выделяемой области грунтового массива выбраны таким образом, чтобы перекрыть зону влияния выработок на напряженно-деформированное состояние обделки.

В данной статье с применением интегрированного программного комплекса выполнена оценка влияния возводимой транспортной развязки на существующие конструкции перегонных тоннелей метрополитена. В результате решения получены усилия, напряжения и деформации в элементах [10].

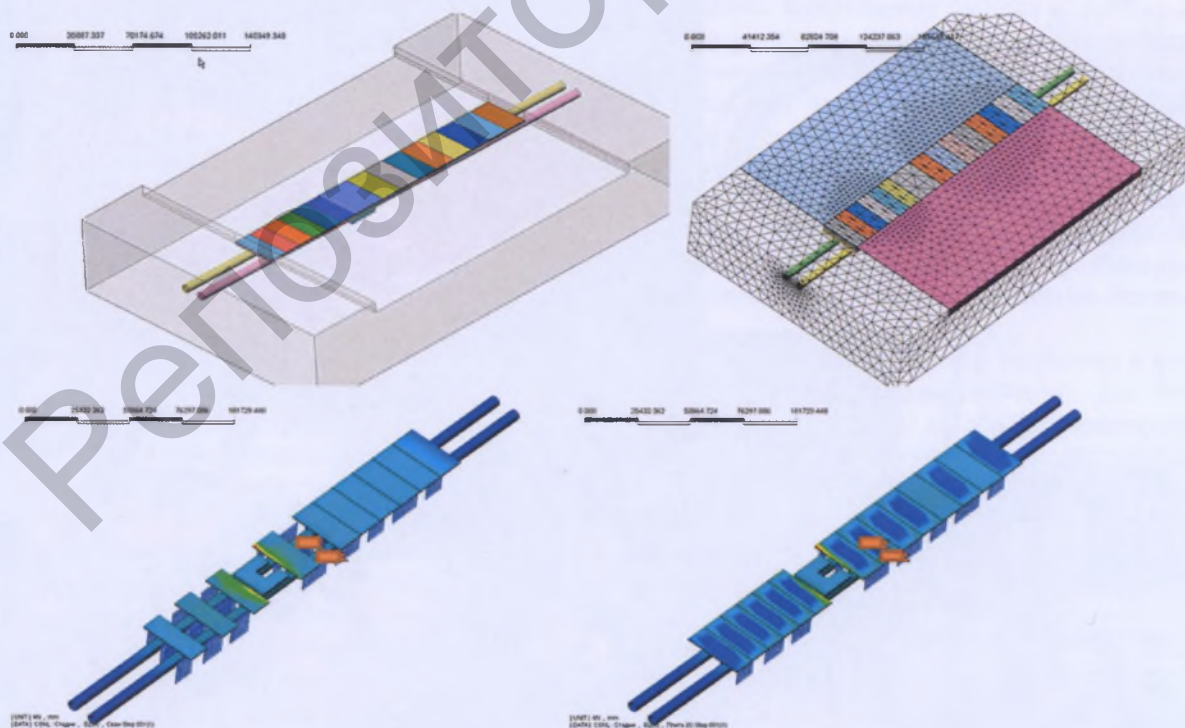


Рисунок 3 – Пространственные расчетные модели и результаты расчетов

Расчетные модели системы «сооружение – грунт» были выполнены в двух вариантах, состоящих из конструктивных элементов плиты-пригруза и существующего подземного сооружения с грунтовым массивом [11].

На основании анализа результатов расчетов (рис. 3) с учетом поэтапной разработки грунта под эстакадой длиной 200 и 45 м было установлено, что деформации тоннеля в направлении оси улицы Филимонова в районе вентсбойки были критическими и превышали допустимые значения. Этот факт обуславливал ведение работ по строительству путепровода только в ночные часы, что не обеспечивало требуемых темпов строительства и безопасной работы над тоннелем. В связи с этим совместно с заказчиком было принято решение о круглосуточном ведении строительно-монтажных работ с непрерывным мониторингом напряженно-деформированного состояния конструкций тоннелей и других сооружений, попадающих в зону влияния строительства.

## Мониторинг

Работы по мониторингу выполнялись на основании технического задания и программы работ, разработанной филиалом БНТУ «Научно-исследовательская часть» в 2014 г. по заказу ОАО «Минскметропроект».

До начала строительства было выполнено визуальное обследование сооружений метрополитена, произведен анализ информации, содержащейся в заключениях по обследованию конструкций, результатов геодезических (маркшейдерских) измерений за период двух предшествующих строительству лет, сведений о техническом состоянии подземных сооружений, попадающих в зону риска, полученных от эксплуатирующих организаций, определение кренов, несоосностей, деформаций, неравномерных осадок обделки тоннелей метрополитена. Были установлены геодезические марки на сооружениях и станциях метрополитена с привязкой их к городской реперной сети, установлены маячки и датчики раскрытия на трещины, зафиксированные в тоннеле метрополитена, установлены электронные датчики [12, 13].

Мониторингом (рис. 4) предусматривался непрерывный контроль в натуральных условиях за усилиями и деформациями несущих конструкций тоннелей метрополитена, проверка соответствия их расчетным значениям, обеспечивающим безаварийную работу конструкций. Мониторинг включал в себя:

- геодезический надземный мониторинг;
- геодезический подземный мониторинг;
- визуальный мониторинг;
- инструментальный мониторинг состояния конструкций;
- электронный дистанционный мониторинг.



Рисунок 4 – Общий вид выполняемых работ по электронному мониторингу объекта

Измерение линейных деформаций проводилось методом электротензометрии. Для этого на поверхности элемента конструкции наклеивались датчики (тензометры), количество и направление которых определялось условиями мониторинга с известными при этом видами напряженного состояния и известными направлениями главных напряжений. Тензометры разработаны для измерения деформации стальных, железобетонных, каменных или деревянных конструкций. Накладной тензометр применяется в основном для длительного мониторинга и измерения деформации и напряжения в сваях, подпорных стенках, распорках, балках, колоннах объектов различного функционального назначения (зданий, тоннелей, мостов, плотин, насыпей); диагностического контроля состояния конструкций зданий и сооружений при их строительстве и эксплуатации [14].

Тензометры могут закрепляться на поверхности объекта с помощью сварки, анкеров или клея. Показаниями тензометра являются: частота колебания струны датчика, Гц, и температура окружающей среды датчика, °С. С помощью специализированных программ, разработанных для автоматизированной системы мониторинга конструкций (АСМК), показания тензометра преобразуются в относительные деформации  $\epsilon$  конструкции, измеряемые в микрострейнах.

Тензометр оснащен электронной меткой, которая позволяет в любой момент времени однозначно его идентифицировать. Электронная метка содержит уникальный цифровой идентификатор датчика (УИД), серийный номер, калибровочный коэффициент, а также свободную память, где могут быть сохранены нулевые показания или географические координаты установленного датчика. Для расчета компенсации эффектов теплового расширения в датчик встроен цифровой термометр, позволяющий измерять температуру окружающей среды.

Калибровочный коэффициент  $K$  и коэффициент  $G$  записаны в электронную метку каждого накладного тензометра и приведены в его калибровочном сертификате.

Даталоггер для работы с датчиками предназначен для дистанционного считывания показаний с датчиков, установленных на объекте мониторинга, коммутации сигналов, сбора и предварительной обработки информации, а также обеспечения взаимодействия с другими автоматизированными системами [15].

Даталоггер является ключевым элементом автоматизированной системы мониторинга конструкций и оснований (АСМК).

Даталоггер совместно с подключенными к нему датчиками применяется для организации работы автоматизированной системы длительного или периодического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений на этапе их строительства и эксплуатации.

При непрерывном мониторинге даталоггер в режиме реального времени передает показания датчиков через программный или аппаратный хост-контроллер в базу данных АСМК. Обмен с хост-контроллером происходит по одному из двух интерфейсов связи: проводному CAN 2.0b или беспроводному ZigBee (2,4 ГГц).

Интерфейсы связи работают в режиме резервирования. Питание контроллера может быть осуществлено от внешнего источника постоянного тока, от внутреннего гальванического элемента питания или одновременно от обоих источников (в этом случае внутренний источник играет роль резервного питания).

Периодический мониторинг может быть организован по принципу «черного ящика»: установленный на объекте мониторинга даталоггер, работая автономно от внутреннего источника питания, посылает запросы на датчики с заданным периодом и сохраняет всю полученную информацию в памяти. В качестве памяти хранения данных может выступать как внутренняя энергонезависимая память, так и внешняя память типа SD-карты. Карта памяти SD используется для хранения показаний датчиков, файла настроек режима работы даталоггера и журнала событий. Считывание данных с целью обработки результатов мониторинга выполняется непосредственным копированием данных с SD-карты или через подключение даталоггера к хост-контроллеру по одному из доступных интерфейсов связи.

С помощью специализированного программного обеспечения, входящего в АСМК, результаты измерения даталоггера преобразуются в показания измеряемых датчиками величин (рис. 5).

Конструктивно даталоггер выполнен в алюминевом корпусе, предназначенном для установки непосредственно на объект мониторинга без использования дополнительной защиты в виде коммуникационного шкафа.

Измерение температуры датчиков производится методом непосредственного преобразования сигналов встроенного в датчик термистора или считыванием цифрового кода температуры из электронной метки датчика.

При проведении работ следует следить за тем, чтобы датчик и сигнальный кабель не были повреждены в процессе установки или эксплуатации строительным или иным оборудованием.



Рисунок 5 – Результаты измерений и их отображение в специализированном программном обеспечении

Измерительная часть даталоггера содержит четыре канала для подключения датчиков. Каждый измерительный канал содержит схему фильтрации и нормализации входного сигнала, линию для считывания уникальной электронной метки датчика, а также вход для подключения терморезистора.

Программная и аппаратная части даталоггера оптимизированы с целью минимизации потребления энергии. При использовании в качестве основного источника питания гальванических элементов (6 батареек формата AA, обеспечивающих напряжение 3 В и суммарной емкостью 9 А·ч) даталоггер способен функционировать от 6 батареек более трех лет при «опросе» четырех датчиков с периодом 3 ч.

Места расположения и номера датчиков соответствовали расположению и номерам геодезических деформационных марок.

По результатам мониторинга, перемещения головки рельса были в несколько раз меньше расчетных значений. Только использование дистанционного длительного мониторинга позволило избежать остановки движения поездов в тоннеле.

## Заключение

Оценка влияния сооружений строящейся развязки на конструкции действующих подземных сооружений метрополитена выполнялась с использованием современных программных комплексов с учетом требований отечественных нормативных документов – технических кодексов установившейся практики (ТКП EN) и национальных приложений к ним по проектированию транспортных сооружений, идентичных нормам проектирования Евросоюза.

Впервые в Республике Беларусь строительно-монтажные работы по устройству путепровода над эксплуатируемым тоннелем метрополитена осуществлялись в круглосуточном режиме.

Дистанционный мониторинг напряженно-деформированного состояния с использованием инновационного электронного оборудования позволил оперативно оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций подземных сооружений и останавливать в случае необходимости строительные работы при превышении расчетных параметров.

Система мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций перегон-

ных тоннелей позволила связать большой объем информации и создать специальную базу данных.

Научное сопровождение проектных и строительно-монтажных работ с мониторингом напряженно-деформированного состояния кон-

струкций позволило в процессе строительства развязки эксплуатировать тоннели метрополитена в плановом режиме, избежать дефектов, снижающих несущую способность, недопустимых кренов и иных деформаций конструкций тоннелей.

### Список использованной литературы

1. Пастушков, Г. П. О переходе на европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2011. – № 2. – С. 113–121.
2. Пастушков, В. Г. Особенности проектирования железобетонных сборно-монолитных балочных пролетных строений автодорожных мостов по новым нормативным требованиям Республики Беларусь / В. Г. Пастушков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 3. – С. 279–287.
3. Пастушков, Г. П. Основные требования к проектированию мостовых конструкций в соответствии с европейскими нормами / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2013. – Т. 3. – С. 368–375.
4. Пастушков, В. Г. Некоторые особенности проектирования и строительства подземного общественно-торгового центра с паркингом в г. Минске / В. Г. Пастушков, Г. П. Пастушков // Наука та прогрес транспорту. – 2010. – № 32. – С. 91–95.
5. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций : ТКП EN 1990-2011 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2012. – 70 с.
6. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Воздействия при производстве строительных работ : ТКП EN 1991-1-6-2009 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2009. – 32 с.
7. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Части 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия : ТКП EN 1991-1-7-2009 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2010. – 64 с.
8. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 2. Транспортные нагрузки на мосты : ТКП EN 1991-2-2009 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2010. – 158 с.
9. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н. С. Булычев. – М. : Недра, 1989.
10. Пастушков, В. Г. Экспериментальные исследования пространственной работы железобетонных бездиафрагменных пролетных строений на крупномасштабных моделях / В. Г. Пастушков, Г. П. Пастушков // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2011. – № 2. – С. 141–151.
11. Пастушков, В. Г., Янковский Л. В. Проектирование дорожной одежды над подземным сооружением торгового центра / В. Г. Пастушков, Л. В. Янковский // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 5 (18). – С. 84.
12. Сушкевич, Ю. И. Тоннели метрополитенов. Устройство, эксплуатация и ремонт : справочно-учебное пособие / под ред. Ю. И. Сушкевича / ООО «Метро и тоннели». – М., 2009. – 463 с.
13. Пецольд, Т. М. Комплексная оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций : практическое пособие / Т. М. Пецольд [и др.]; под ред. А. А. Васильева. – Гомель : УО «БелГТУ», 2005. – 32 с.
14. Мойсейчик, Е. А. Приборы для неразрушающего контроля, диагностики и обследований мостовых сооружений / Е. А. Мойсейчик, Е. К. Мойсейчик, В. Г. Пастушков // Депонированная рукопись № 858-В2007 31.08.2007.
15. Пастушков, Г. П. Испытание сталежелезобетонного пролетного строения длиной 55 метров с применением инновационного измерительного оборудования / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков, В. А. Белый, А. А. Яковлев // Наука та прогрес транспорту. – 2010. – № 33. – С. 191–192.

Статья поступила в редакцию 15.09.2015.