

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383>

УДК 624.19.059.3

Защитные мероприятия при строительстве наземных сооружений над существующими подземными

Асп. А. А. Далидовская¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. Г. Пастушков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Сегодня остро стоит вопрос по обеспечению безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от нового строительства. Процесс производства работ по устройству несущих конструкций сооружений и дальнейшая их эксплуатация могут оказывать негативное влияние на уже существующие объекты. В связи с этим весьма актуальна задача разработки инновационных методов и инструментов обеспечения безопасной эксплуатации таких сооружений, как перегонные тоннели метрополитена. Для ее решения необходимы достоверный прогноз дополнительных деформаций и назначение комплекса защитных мероприятий. Кроме того, большое внимание следует уделять численному моделированию системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения». Как пример оценки влияния нового строительства на существующие подземные можно привести строительство транспортной развязки на пересечении проспекта Независимости с улицей Филимонова. В качестве защитных мероприятий здесь использовался защитный экран на буронабивных сваях, который позволил значительно минимизировать динамические и статические воздействия на обделку тоннелей и другие подземные сооружения метрополитена. Эффективность применения защиты подтверждается результатами мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций перегонных тоннелей на всех стадиях строительства транспортной развязки. Защитные мероприятия и непрерывный мониторинг за напряженно-деформированным состоянием конструкций помогают избежать аварийных ситуаций в ходе строительства и дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: транспортные сооружения, зона влияния, негативное воздействие, анализ, расчетная схема, грунт, деформации, напряжения, надежность, обследование

Для цитирования: Далидовская, А. А. Защитные мероприятия при строительстве наземных сооружений над существующими подземными / А. А. Далидовская, В. Г. Пастушков // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 377–383. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383>

Protective Measures during Construction of Ground Structures over Existing Underground Structures

A. A. Dalidovskaya¹⁾, V. G. Pastushkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Today, there is an acute issue of ensuring the safe operation of buildings and structures located in the immediate vicinity of new construction. The process of performing works on the installation of load-bearing structures and their further operation can have a negative impact on already existing facilities. In this regard, the task of developing innovative methods and tools to ensure the safe operation of such structures as subway running tunnels is very urgent. To solve it, a reliable forecast of additional deformation and appointment of a complex of protective measures are required. In addition, much attention should be paid to the numerical modeling of the system “surface structures – protective measures – underground structures”. As an example of assessing the impact of new construction, namely, the erection of surface structures over existing underground ones, one can cite the construction of a transport interchange at the intersection of Nezavisimosty Avenue with

Адрес для переписки

Далидовская Александра Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 146а,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-94-77
ftk@bntu.by

Address for correspondence

Dalidovskaya Alexandra A.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-94-77
ftk@bntu.by

Filimonov Street. As protective measures, a protective screen on bored piles has been used here, which made it possible to minimize significantly dynamic and static effects on the lining of tunnels and other underground structures of the subway. Effectiveness of protection application is confirmed by the result of monitoring the stress-strain state of running tunnel structures at all stages of traffic intersection construction. Protective measures and continuous monitoring of the stress-strain state in structures help to avoid accidents during construction and further operation.

Keywords: transport facilities, influence zone, negative impact, analysis, design scheme, soil, deformations, stresses, reliability, inspection

For citation: Dalidovskaya A. A., Pastushkov V. G. (2020) Protective Measures during Construction of Ground Structures over Existing Underground Structures. *Science and Technique*. 19 (5), 377–383. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383> (in Russian)

Введение

Сегодня строительство транспортных сооружений чаще всего приходится выполнять в городской среде с уже существующими зданиями, сооружениями и коммуникациями. Разработка котлованов, воздействие машин и механизмов, устройство несущих конструкций нового сооружения могут оказывать негативное влияние на существующие объекты. В связи с этим весьма актуальной задачей стала разработка методов и инструментов обеспечения безопасной эксплуатации существующей застройки.

Для оценки влияния возводимых транспортных сооружений необходимо провести ряд мероприятий, позволяющих выполнить прогноз возможных деформаций конструкций. Причины появления деформаций сооружений существует огромное количество, однако, зная их, можно попытаться избежать или минимизировать возможные деформации. Решение данной задачи осуществляется численным моделированием влияния нового строительства на существующие подземные сооружения. Только после его проведения может быть принято решение о необходимых защитных мероприятиях. Однако одного численного моделирования для обеспечения безопасной эксплуатации подземных сооружений недостаточно. Чтобы в зоне строительства избежать аварийной ситуации, необходимо надлежащий мониторинг конструкций эксплуатируемых сооружений.

По результатам анализа исследований и публикаций [1–13] до настоящего времени не решена проблема корректного моделирования системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения», которая позволяла бы выполнять оценку влияния нового строительства на существующие соору-

жения. Расчеты носят характер прогноза, и определение напряженно-деформируемого состояния не корректируется по ходу строительно-монтажных работ вследствие отсутствия фактических данных [5]. Зачастую проектная группа напрямую не связана с организацией, выполняющей строительство объекта и осуществляющей геодезический контроль. Исследования по определению фактического состояния объектов во многих случаях практически не ведутся или выполняются в недостаточном объеме.

Вопрос по обеспечению безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от нового строительства, решается на этапе проектирования объекта. Первостепенными задачами являются определение инженерно-геологических условий строительной площадки и оценка технического состояния существующих зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от проектируемого объекта. В составе работ по предварительному обследованию необходимо выполнить сбор информации о конструктивном решении существующих сооружений, поиск и изучение архивной документации инженерно-геологических изысканий, анализ ранее проведенных обследований, визуальное обследование с составлением планов и разрезов, изучение дефектных ведомостей с фотофиксацией дефектов со схемами их положения. По результатам предварительного обследования должна быть установлена категория технического состояния здания или сооружения [14].

Следующий этап – определение зоны влияния нового строительства расчетным путем с учетом фактического технического состояния существующей застройки и результатов инженерно-геологических изысканий. Для линейных

объектов следует определять характерный размер (площадь) зоны влияния строительства, а для компактных – ее радиус. В пределах зоны влияния выделяют размеры области интенсивных деформаций. Допустимо принимать плановые размеры зоны интенсивных деформаций соответствующими размерам области, в которой осадки грунтового массива, вызванные новым строительством, превышают 10 мм [14].

Только на основании перечисленного комплекса работ может быть принято решение о необходимости создания защитных мероприятий. Следует обратить внимание на то, что защитные мероприятия выполняются не только с целью обеспечения безопасной эксплуатации существующих сооружений, но и для защиты нового объекта строительства от негативного влияния существующей застройки.

При назначении защитных мероприятий необходимо определить факторы, которые в дальнейшем будут оказывать влияние на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и находящихся в нем подземных сооружений. К основным факторам негативного влияния можно отнести конструктивные, технологические и климатические. Для защиты подземных сооружений от всех видов негативного воздействия, вызванного новым строительством, могут быть применены один или одновременно несколько видов защитных мероприятий: конструктивные, направленные на изменение параметров проектируемого сооружения; усиление конструкций существующих подземных сооружений; укрепление грунтового массива; устройство геотехнических экранов, которые будут рассмотрены далее в статье.

Проект защитных мероприятий должен включать выполнение целого ряда условий: обеспечивать механическую безопасность объекта строительства и существующих сооружений не только в период строительства, но и в последующей эксплуатации; минимизировать значения дополнительных деформаций; повышать несущую способность грунтового основания; выравнивать распределение деформаций основания в плане и по глубине; защищать подземные сооружения от воздействия вибрации.

Выбирая технические решения по устройству защитных мероприятий, необходимо учитывать следующие факторы: характер и степень влияния нового строительства; конструктивную схему и техническое состояние защищаемого объекта; уровень ответственности объекта; особенности инженерно-геологического строения площадки; доступ и возможность выполнения работ по устройству конструкций защитных мероприятий. Также при разработке защитных мероприятий следует учитывать влияние эксплуатации существующих сооружений на строящиеся.

При решении поставленной задачи нужно очень внимательно относиться к численному моделированию системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения». Ее следует рассматривать в единой расчетной модели и учитывать не только влияние нового строительства на существующие сооружения, но и наоборот. По различным причинам проектировщики большое внимание уделяют моделированию непосредственно конструкций новых сооружений, а их взаимодействие с грунтовым массивом, а тем более защитные мероприятия, рассматривают упрощенно или не рассматривают вообще.

Как пример оценки влияния нового строительства на существующие подземные и выбора защитных мероприятий – это строительство транспортной развязки на пересечении пр. Независимости с ул. Филимонова. В зону влияния строительства путепровода попадали тоннели метрополитена на перегоне станций метро «Московская» – «Восток», проходка которых осуществлялась закрытым способом, а также вентсбойка и венткамера, выполненные открытым способом.

Несущими конструкциями тоннелей являются чугунная тубинговая и железобетонная блочная обделка, состоящие из отдельных колец шириной 1,0 м. Перегонные тоннели конструктивно отделены друг от друга вентсбойкой. Железобетонная обделка тоннелей выполнена с применением колец, состоящих из ребристых железобетонных блоков. Вверху каждого кольца обделки установлены ключевые вкладыши (блоки), кольца соединены между собой с помощью болтов в продольном и поперечном направлениях. Несущие конст-

рукции вентсбойки – сборно-монолитное днище, монолитные железобетонные рамы, сборные и монолитные стены. Покрытие состоит из сборных железобетонных плит и монолитных участков.

Над тоннелем метрополитена был запроектирован городской автодорожный путепровод. Мост выполнен с пролетами по схеме 24,0 + 21,0 м, ширина его 37,5 м (рис. 1). Путепровод запроектирован под нагрузки А14, НК-112 с учетом толпы на тротуарах. Опоры – железобетонные монолитные, по специальному проекту, на буронабивных сваях диаметром 1,2 м и длиной 14,0 м. Промежуточная монолитная опора моста – столбчатого типа с монолитным разрезным ригелем. Крайние опоры путепровода выполнены в виде подпорных стен с горизонтальными монолитными анкерными креплениями в грунте насыпи.



Рис. 1. Общий вид транспортной развязки по проспекту Независимости над эксплуатируемыми тоннелями метрополитена

Fig. 1. General view of traffic intersection on Nezavisimosty Avenue over exploited subway tunnels

На участке проектируемого строительства поверхность была спланирована насыпными грунтами в ходе строительства тоннелей метрополитена, зданий, проспекта Независимости, улиц Филимонова и Скорины, прокладки подземных коммуникаций. В геологическом строении участка проектируемого строительства участвовали:

- техногенные образования, представленные насыпными грунтами, состоящими из песков с примесью супесей и супесей с примесью песка, содержат включения гравия, гальки, валунов, отходов строительного производства;
- аллювиально-озерно-болотные отложения, представленные пылеватými песками средней прочности, суглинками, сильно заторфованным грунтом, мергелем;
- флювиогляциальные надморенные отложения, представленные песками (от пылеватых

до гравелистых) и гравийным грунтом средней прочности;

- моренные отложения могилевского подгоризонта, представленные прочными и очень прочными супесями;

- флювиогляциальные внутриморенные отложения сожского и межморенные днепровско-сожского горизонтов, представленные пылеватými песками (мелкими и средней прочности).

Гидрогеологические условия характеризуются наличием подземных озерно-болотных вод на глубине 19,8–21,3 м (абс. отм. 193,7–195,7 м) и флювиогляциальных надморенных отложений, водоносного комплекса внутриморенных и межморенных вод днепровско-сожского горизонта и вод спорадического распространения, горизонт напорный.

Необходимость выполнения защитных мероприятий обуславливалась тем, что опоры путепровода располагались в непосредственной близости от действующих тоннелей метрополитена, а также предусматривалась срезка грунта над тоннелями, что могло вызвать появление и развитие деформаций конструкций тоннелей в зоне ведения работ. Если на стадии разработки котлована не выполнять защитных мероприятий, то может произойти поднятие дна котлована и соответственно тоннелей на 10–11 мм, вызванное упругими деформациями при разгрузке залегающих ниже грунтов.

С целью стабилизации деформаций грунтового массива над перегонными тоннелями было предусмотрено выполнение защитного экрана (рис. 2), состоящего из монолитной железобетонной плиты на буронабивных сваях диаметрами 0,63 и 0,80 м. Толщина засыпки между сводами тоннелей и низом плиты защитного экрана варьировалась от 2 до 3 м. Длина буронабивных свай защитного экрана в зоне тоннелей составляла 14 м, у вентсбойки 22 м. Толщина плиты защитного экрана над тоннелями 0,5 м, над вентсбойкой 0,1 м [15].

Выполнение данного комплекса защитных мероприятий позволило значительно минимизировать динамические и статические воздействия на обделку тоннелей и другие подземные сооружения метрополитена, а также на конструкции нового сооружения.

Для реализации требований защиты тоннелей метрополитена в соответствии с проектом на участке ведения работ вдоль существующей линии метрополитена с обеих сторон каждого тоннеля выполнялись буронабивные сваи диаметрами 0,63 и 0,80 м.

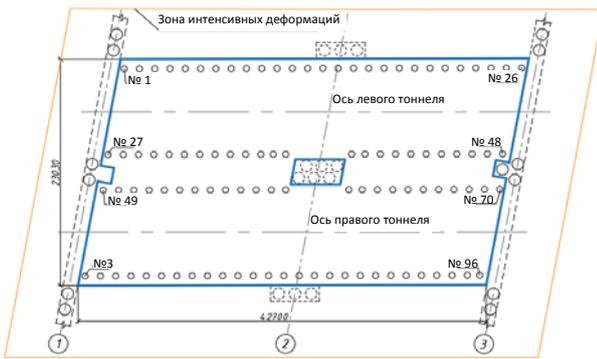


Рис. 2. План расположения плиты и свай защитного экрана
Fig. 2. Layout of slab and piles of protective shield

Для изготовления свай применяли гидравлическую бурильную машину SF-65 фирмы SOILMEC (рис. 3). Бурение скважин выполнялось с гидропригрузом из-за высокого расположения уровня грунтовых вод и риска выноса в объем скважины грунта из затрубного пространства. В связи с отсутствием в проекте указаний о величине гидропригруза его значение определялось экспериментально и корректировалось по ходу строительства.

С тем, чтобы определить возможность ведения работ по строительству путепровода транспортной развязки в круглосуточном режиме, проектом был предусмотрен пробный участок, на котором выполнялись буронабивные сваи защитного экрана и осуществлялся мониторинг технического состояния конструкций перегонных тоннелей, находящихся в зоне влияния.



Рис. 3. Работы по устройству буронабивных свай защитного экрана гидравлической бурильной машиной SF-65 фирмы SOILMEC

Fig. 3. Work on installation of bored piles for protective screen with SOILMEC SF-65 hydraulic drilling machine

По результатам мониторинга в процессе ведения строительных работ на пробном участке максимальные вертикальные деформации составили 4,0 мм, изменение напряжений в чугунных тубингах обделки 1,5–2,5 МПа (рис. 4). Напряжения и деформации при устройстве буронабивных свай постоянно растут и изменяются с небольшой скоростью, о чем свидетельствует зависимость напряжения от температуры на рис. 4.

Геодезический мониторинг свидетельствовал о вертикальных перемещениях геодезических марок, закрепленных на обделке тоннеля, равных 1,5–2,0 мм, что находится в рамках погрешности прибора. На основе полученных данных результатов электронного и геодезического мониторинга были сделаны выводы о возможности устройства буронабивных свай в три смены.

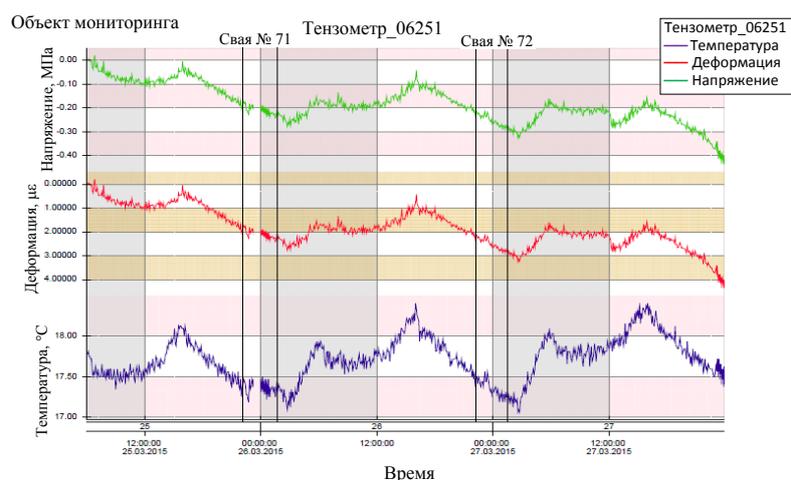


Рис. 4. Графики изменения температуры, напряжений и деформаций в чугунных тубингах тоннеля в период бурения пробных свай

Fig. 4. Graphs of changes in temperature, stresses and deformations in cast-iron tubing of tunnel during the period of drilling test piles

Проектом разработка котлована предусматривалась в шесть этапов. Однако в процессе строительства по результатам мониторинга и корректировки расчетной модели эта последовательность была изменена.

Моделирование напряженно-деформированного состояния участка транспортной развязки и его изменений в процессе строительства выполняли с использованием программных комплексов midas GTS NX и SOFiSTiK (WinTube). Данные программы позволили определять напряженно-деформированное состояние как в грунтовом массиве, так и в конструкциях перегонных тоннелей и защитного экрана. При моделировании системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения» использовалась пространственная расчетная схема, которая создавалась с учетом поэтапной разработки с уровня существующей поверхности в зоне действующих линий метрополитена, а также оценки возможности поднятия дна котлована и соответственно тоннеля, вызванного упругими деформациями при разгрузке залегающих ниже грунтов. В этой схеме учитывались мероприятия по предупреждению опасных неравномерных деформаций обделки тоннелей путем стабилизации окружающего массива грунта для обеспечения равномерности в поднятии по всему периметру обделки с сохранением эксплуатационного габарита и уменьшением величины поднятия уровня головки рельса. Геотехническая модель строилась на основе анализа и обобщения материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных на площадке строительства в разное время. Следует отметить, что до начала расчетов было проведено обследование подземных сооружений с учетом их фактических параметров. Выполненные расчеты соответствуют требованиям технических кодексов установившейся практики (идентичных нормам проектирования Евросоюза), а также требованиям национальных приложений к ним на проектирование мостов и труб.

Для изучения работы плиты защитного экрана в натурных условиях и проверки соответствия расчетным предпосылкам проводились статические испытания обратной засыпкой грунта на возведенный защитный экран. В качестве статической нагрузки использовался асфальтогранулят со следующими физико-механическими характеристиками: плотность $\rho = 1,7 \text{ т/м}^3$, общая масса грунта 1100 т. Основное испытательное оборудование – система мониторинга АСМК, установленная в перегонных

тоннелях линии метрополитена (рис. 5). Доступ к данным системы мониторинга осуществлялся по удаленной связи. Дополнительно использовались периодические данные маркшейдерско-геодезического контроля.



Рис. 5. Датчик системы мониторинга, установленный на чугунном тубинге

Fig. 5. Monitoring system sensor, mounted on cast iron tubing

Согласно расчетным предпосылкам, максимальное значение перемещений в обделке перегонных тоннелей с учетом выполнения защитных мероприятий составило 1,336 мм, что хорошо коррелирует с результатами испытаний, по которым этот показатель достигал 1,000 мм.

По результатам мониторинга технического состояния перегонных тоннелей после окончания строительства путепровода изменение напряжений в чугунных тубингах обделки составило 2,6–4,8 МПа, что свидетельствует о включении плиты защитного экрана в работу и распределении усилий по всему грунтовому массиву.

ВЫВОДЫ

1. Результаты мониторинга напряженно-деформированного состояния и испытаний подтвердили адекватность выбранных защитных мероприятий при строительстве транспортной развязки над действующими тоннелями метрополитена на пересечении проспекта Независимости с улицей Филимонова.

2. Своевременная и объективная оценка влияния нового строительства на существующие подземные сооружения метрополитена позволяет разработать проектные решения, препятствующие негативному влиянию строительства на эксплуатационную надежность действующих объектов метрополитена.

3. Правильный подход к выбору и назначению защитных мероприятий, а также ведение непрерывного мониторинга за напряженно-деформированным состоянием конструкций помогают избежать аварийных ситуаций в ходе строительства сооружений и дальнейшей их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990–2011 (02250). Введ. 07.07.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2012. 70 с.
2. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–6. Общие воздействия. Воздействия при производстве строительных работ: ТКП EN 1991-1-6–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 32 с.
3. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 1–7. Общие воздействия. Особые воздействия: ТКП EN 1991-1-7–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 64 с.
4. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 2. Транспортные нагрузки на мосты: ТКП EN 1991-2–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 158 с.
5. Винников, Ю. Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» / Ю. Л. Винников, А. В. Суходуб, О. В. Кичаева // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. № 2. С. 50–63.
6. Тоннели метрополитенов. Устройство, эксплуатация и ремонт / Ю. И. Сушкевич [и др.]. М.: Метро и тоннели, 2009. 463 с.
7. Hemphill, G. B. *Practical Tunnel Construction* / G. B. Hemphill. USA: Wiley, 2013. 434 p. <https://doi.org/10.1002/9781118350270>.
8. Lunardi, P. *Design and Construction of Tunnels* / P. Lunardi. Milano: Rocksoil SPA, 2008. 587 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73875-6>.
9. Пастушков, В. Г. Научное сопровождение проектирования и строительства трехуровневой транспортной развязки в г. Минске / В. Г. Пастушков, И. Л. Бойко, Г. П. Пастушков // Автомобильные дороги и мосты. 2015. № 2. С. 11–17.
10. Пастушков, Г. П. О переходе европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 113–121.
11. 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: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 25–27 апреля 2013 г. Пермь, 2013. Т. 3. С. 368–375.
12. Skolnik, D. A. Instrumentation for Structural Health Monitoring: Measuring Interstory Drift [Electronic Resource] / D. A. Skolnik, W. J. Kaiser, J. W. Wallace // The 14 World Conference on Earthquake Engineering. China: Beijing, 2008. Mode of access: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_11-0089.PDF.
13. *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control* / Edited by V. Guglielmetti [et al.]. London: ImprintCRC Press, 2007. 528 p. <https://doi.org/10.1201/9780203938515>.
14. Здания и сооружения. Защитные мероприятия в зоне влияния строительства подземных объектов: СП 361.1325800.2017. Введ. 15.05.2018. М.: Минстрой, 2018. 56 с.
15. Бульчев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н. С. Бульчев. М.: Недра, 1989. 270 с.

Поступила 18.10.2019

Подписана в печать 14.01.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1990–2011 (02250). *Eurocode. Structural Design Basics*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2012. 70 (in Russian).
2. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-1-6–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Parts 1–6. General Influences. Impacts during Construction Works*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2009. 32 (in Russian).
3. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-1-7–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Parts 1–7. General Influences. Special Effects*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 64 (in Russian).
4. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-2–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Part 2. Transport Loads on Bridges*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 158 (in Russian).
5. Vinnikov Yu. L., Sukhodub A. V., Kichaeva O. V. (2015) Modeling the Stress-Strain State of the “Reconstructed Building – Foundations – Foundation” System. *Vestnik PNIPIU. Stroitel'stvo i Arkhitektura = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, (2), 50–63 (in Russian).
6. Sushkevich Yu. I., Babushkin N. F., Ivanov V. F., Kozin E. G., Rasulov A. R. (2009) *Subway Tunnels. Device, Operation and Repair*. Moscow, Metro i Tonneli Publ. 463 (in Russian).
7. Hemphill G. B. (2013) *Practical Tunnel Construction*. USA, Wiley. 434. <https://doi.org/10.1002/9781118350270>.
8. Lunardi P. (2008) *Design and Construction of Tunnels*. Milano, Rocksoil SPA. 587. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73875-6>.
9. Pastushkov V. G., Boyko I. L., Pastushkov G. P. (2015) Scientific Support for the Design and Construction of a Three-Level Transport Interchange in Minsk. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (2), 11–17 (in Russian).
10. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G. (2011) On Transition to European Standards for the Design of Bridge Structures in the Republic of Belarus. *Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Okhrana Okruzhayushchei Sredy, Transport, Bezopasnost' Zhiznedejatel'nosti* [Bulletin PNIPIU. Protection of the Environment, Transport, Life Safety], (2), 113–121 (in Russian).
11. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G. (2013) Basic Requirements for the Design of Bridge Structures in Accordance with European Standards. *Modernizatsiya i Nauchnye Issledovaniya v Transportnom Komplekse: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Perm', 25–27 Aprelya 2013 g.* T. 3 [Modernization and Scientific Research in the Transport Complex. Materials of the International Scientific and Practical Conference, Perm, April 25–27, 2013. Vol. 3]. Perm, 368–375 (in Russian).
12. Skolnik D. A., Kaiser W. J., Wallace J. W. (2008) Instrumentation for Structural Health Monitoring: Measuring Interstory Drift. *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*. China, Beijing. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_11-0089.PDF.
13. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S. (2007) *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*. London, ImprintCRC Press. 528. <https://doi.org/10.1201/9780203938515>.
14. SP [Set of Rules] 361.1325800.2017. *Buildings and Constructions. Protective Measures in the Zone of Influence for Construction of Underground Facilities*. Moscow, Minstroj Publ., 2018. 56 (in Russian).
15. Bulychev N. S. (1989) *Mechanics of Underground Structures in Example and Problems*. Moscow, Nedra Publ. 270 (in Russian).

Received: 18.10.2019

Accepted: 14.01.2020

Published online: 30.09.2020