

Мониторинг технического состояния железнодорожных путепроводов

¹***БОНДАРЬ Иван Сергеевич**, к.т.н., ассоциированный профессор, ivan_sergeevich_08@mail.ru,

¹**МАМЕДОВА Жасмин Эльдаровна**, студент, Mamedova_Zh@gmail.ru,

¹**АЛДЕКЕЕВА Динара Танашбековна**, к.т.н., ассоциированный профессор, aldekeeva69@mail.ru,

¹**НУРАХМЕТОВА Кульзира Кумаргалиевна**, PhD, ассистент-профессор, nurahmetova52@mail.ru,

¹АО «АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева», ул. Шевченко, 97, Алматы, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Содержание искусственных сооружений в состоянии, обеспечивающем его работу без каких-либо ограничений, при их нормальной эксплуатации и возможных экстремальных воздействиях на объект является одной из важнейших задач. Целью настоящего исследования являлось получение данных о техническом состоянии искусственных сооружений, эксплуатируемых при различных осевых нагрузках (иногда 25 т на ось), для безопасной эксплуатации в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог Республики Казахстан. В работе представлены результаты мониторинга напряженно-деформированного состояния железобетонных пролетных строений двух путепроводов за апрель 2018 года и май 2023 года. Экспериментально получены прогибы, деформации и напряжения от воздействия статических нагрузок (в качестве нагрузки был выбран тепловоз ТЭМ18). Для поредения прогибов применяли прогибомеры БПАО, цифровую регистрацию и записи первичных преобразователей на основе средств тензометрии (деформации и напряжения) определяли аппаратно-программным комплексом «ТЕНЗО». Авторами получены зависимости напряженно-деформированного состояния железобетонных пролетных строений двух путепроводов типовых конструкций, которые помогают эксплуатационным службам железнодорожного транспорта отслеживать техническое состояние искусственных сооружений. Также рекомендуется использовать эти данные для проведения обследований и испытаний аналогичных пролетных строений железнодорожных мостов, для дальнейшего мониторинга за их техническим состоянием при увеличении эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: железнодорожный мост, железнодорожный транспорт, мониторинг, напряженно-деформированное состояние, прогибы, деформации, напряжения.

Введение

Мониторинг состояния несущих конструкций – постоянный контроль за техническим состоянием искусственных сооружений в стадии эксплуатации – приводит к снижению эксплуатационных затрат на содержание искусственных сооружений, расположенных в сети железных дорог Республики Казахстан. Кроме того, планирование межремонтных сроков искусственных сооружений производится на основе обработки данных по физическому состоянию объектов инфраструктуры. Для выполнения поставленной задачи разрабатываются автоматизированные системы для диагностики транспортных соо-

ружений на железной дороге, определения фибровых деформаций (напряжений) и перемещений (прогибов) [1].

Напряжения и динамические коэффициенты определяются как расчетным, так и экспериментальным методом, для балочных пролетных строений мостов, испытывающих статические и динамические воздействия от подвижного состава [2-3]. Причем расчетные напряжения от воздействия динамической нагрузки складываются с расчетными напряжениями от воздействия статической нагрузки [4]. Проектировщики, как правило, перепроверяют данные, полученные расчетным методом, сравнивая их с данны-

ми, полученными экспериментальным путем при испытании существующих типовых пролетных строений мостов. Для балочных пролетных строений эксплуатируемых мостов, имеется накопленная за длительный период мониторинга состояния несущих конструкций, база динамических коэффициентов, деформаций, напряжений и перемещений.

В работах Lanis A., Razuvaev D., Lomov P. [5], Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. [6], Yang Y., Li S., Yan B. [7], Белый А., Карапетов Е., Ефименко Ю. [8], Бондарь И.С. [9], Бондарь И.С., Махметова Н.М., Квашнин М.Я., Хасенов С.С. [10] представлены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния пролетных строений железнодорожных транспортных сооружений, подтверждающие адекватность изложенных в данной статье результатов.

Материалы и методы исследования Натурные испытания балочных пролетных строений

Данные испытаний пролетных строений железнодорожных путепроводов получены с помощью измерительной системы «ТЕНЗО», реализующей обработку цифровой записи первичных преобразователей на основе средств тензометрии.

Испытания проводились в апреле 2018 года и мае 2023 года, испытывались пролет-

ные строения железнодорожных железобетонных путепроводов: 16,5 м – ребристые двухблочные таврового сечения и 11,5 м – плитные двухблочные таврового сечения, тип полотна – на щебеночном балласте.

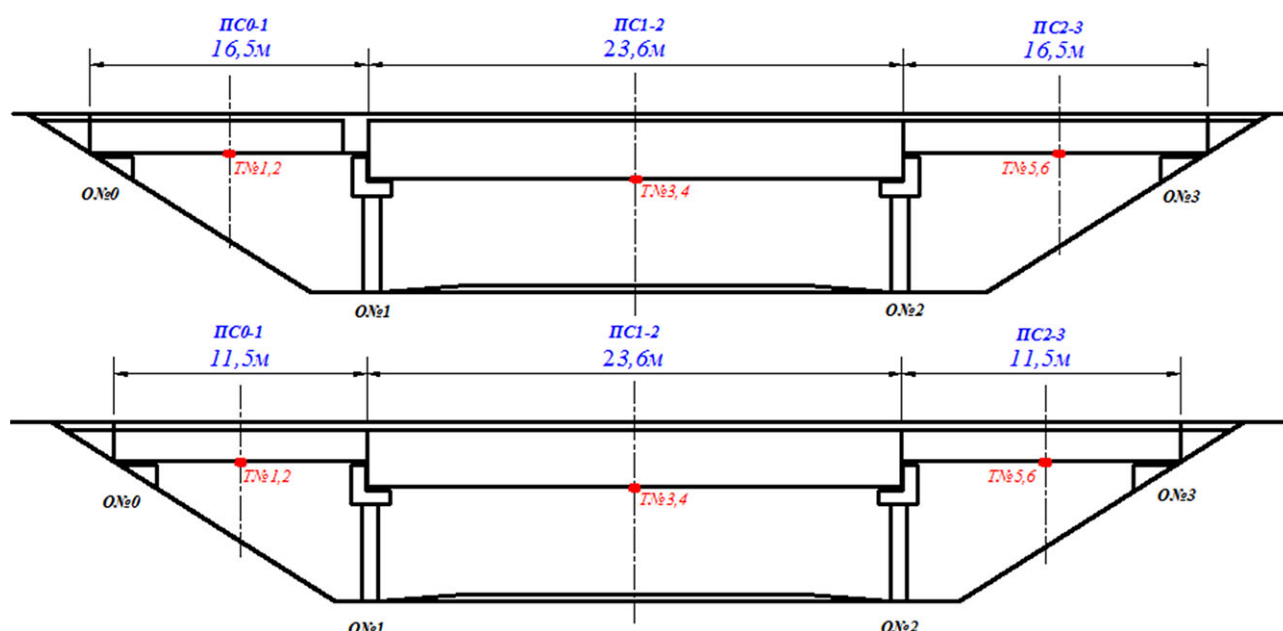
На рисунке 1 приведена схема расположения тензорезисторов на пролетных строениях железнодорожных железобетонных путепроводов.

В 2018 году испытательная нагрузка состояла из маневрового 6-осного тепловоза ТЭМ-18 с нагрузкой на ось 20,7 Тс (202,7 кН) и 4-осного хоппера-дозатора модели 55-76 с нагрузкой на ось 23,3 Тс (228,7 кН), а в 2023 году – в качестве испытательной нагрузки использовался состав, состоящий из 3-х 6-осных тепловозов ТЭМ-18 с нагрузкой на ось 20,83 Тс (204,3 кН) и 2 полувагонов с нагрузкой на ось 24,5625 Тс (240,95 кН) – первый и 25,0875 Тс (246,1 кН) – второй.

В качестве примера на рисунке 2 представлены схемы загрузки пролетных строений 16,5 м и 11,5 м железнодорожных путепроводов в 2018 году, на рисунке 3 – в 2023 году.

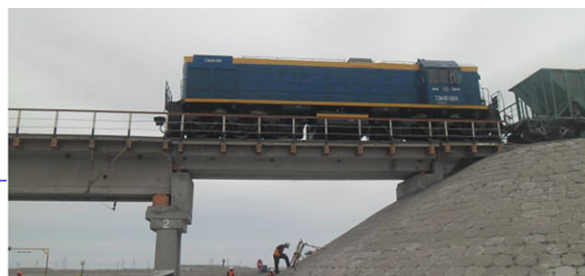
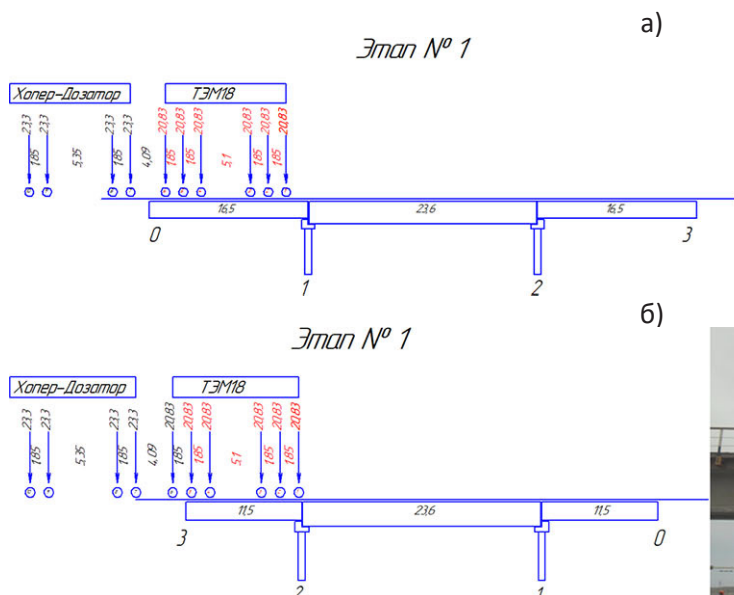
Результаты исследования

На рисунке 4 представлены диаграммы напряжений железобетонных пролетных строений длиной 16,5 м ПС 0-1 и ПС 2-3: слева – данные, полученные в 2018 году,



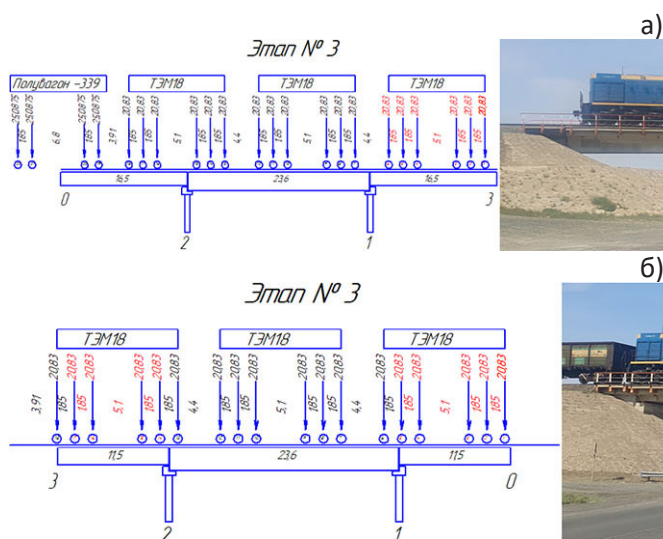
а) путепровод по схеме 16,5+23,6+16,5; б) путепровод по схеме 11,5+23,6+11,5; ПС0-1, ПС1-2, ПС2-3 – пролетные строения путепроводов; ТН1, ТН2, ТН3, ТН4, ТН5, ТН6 – тензорезисторы FLM-60-11; ОН0, ОН1, ОН2, ОН3 – устои обсыпного типа и промежуточные опоры

Рисунок 1 – Схема расположения тензорезисторов на железобетонных пролетных строениях железнодорожных путепроводов



а – пролетное строение 16,5 м; б – пролетное строение 11,5 м

Рисунок 2 – Схемы загрузки железнодорожных путепроводов в 2018 году



а – пролетное строение 16,5 м; б – пролетное строение 11,5 м

Рисунок 3 – Схемы загрузки железнодорожных путепроводов в 2023 году

справа – данные, полученные в 2023 году.

До разработки метода предельных состояний расчет сводился к проверке на растяжение (скалывание) от действия касательных (скалывающих) напряжений, определяемых по простой формуле (в общем случае соответствующей формуле Журавского):

$$\tau = \frac{Q}{bz}, \quad (1)$$

где b – минимальная ширина сечения, z – плечо внутренних сил, принимаемое при-

ближенно равным $0,9h_0$.

Формула Журавского и её производные (1) никак не объясняли разрушение железобетонных элементов с образованием в бетоне косых трещин. Поэтому позднее расчет стал выполняться на совместное действие нормальных и касательных напряжений по главным (косым) растягивающим напряжениям [1]:

$$\sigma_{mt} = \sigma + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + T^2}, \quad (2)$$

где σ – напряжения в элементе, T – величина периода колебания элемента.

Касательные напряжения в выражении (2) по-прежнему определяли по формуле (1) с уточнением плеча z в зависимости от неупругих деформаций бетона сжатой зоны [1].

Сравнивая численные значения полученных экспериментально напряжений от воздействия статической нагрузки от локомотива, можно судить об изменении напряженно-деформированного состояния балочных пролетных строений. Значительная разница в этих значениях, в большую сторону, будет свидетельствовать о наличии дефектов (появление трещин, коррозия арматуры, смещение оси пути от оси путепровода и т.д.), влияющих на несущую способность, таким образом можно отслеживать техническое состояние исследуемого объекта и

прогнозировать износ, влияющий на безопасность.

На рисунке 5 представлены диаграммы напряжений железобетонных пролетных строений длиной 11,5 м ПС 0-1 и ПС 2-3: слева – данные, полученные в 2018 году, справа – данные, полученные в 2023 году.

Обсуждение результатов

Анализируя рисунки 4 и 5, можно сделать следующие заключения:

Во-первых, «разброс» напряжений в 2018 году от испытательной нагрузки (ТЭМ18) для правых блоков пролетных строений 11,5 м находится в диапазоне от 3,7 МПа до 3,71 МПа при разных этапах загрузки, для левых блоков пролетных строений 11,5 м находится в диапазоне от 3,46 МПа до 3,9 МПа при разных этапах загрузки, в 2023 году

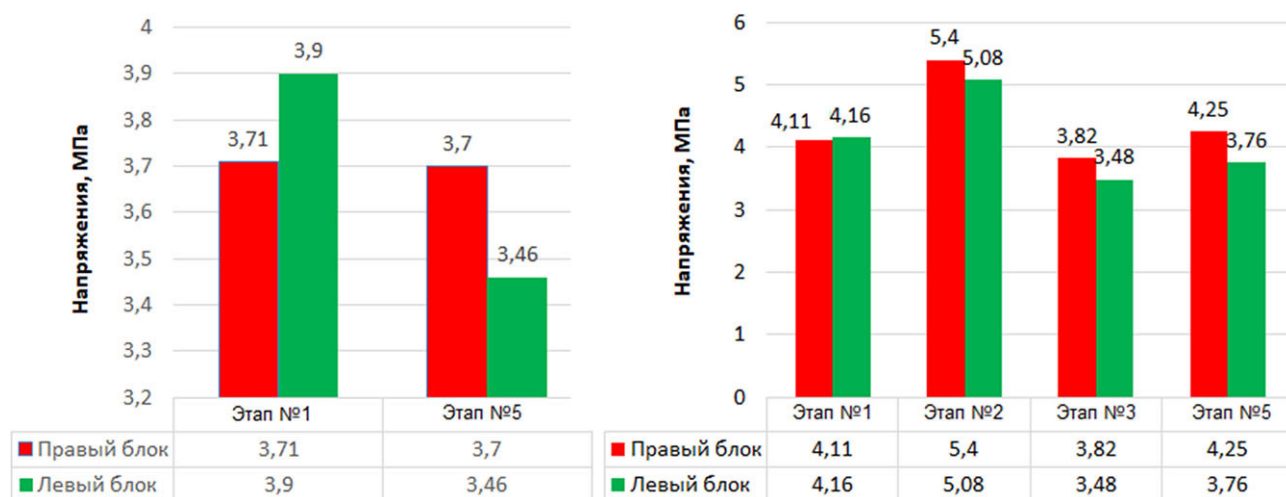


Рисунок 4 – Диаграммы напряжений пролетных строений ПС 0-1 и ПС 2-3 длиной 16,5 м в 2018 году (слева) и 2023 году (справа)

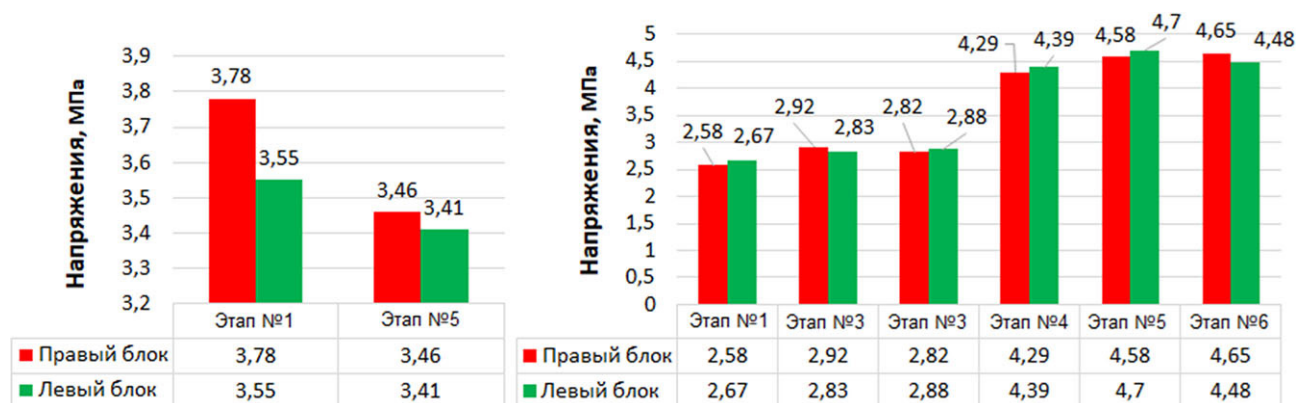


Рисунок 5 – Диаграммы напряжений пролетных строений ПС 0-1 и ПС 2-3 длиной 11,5 м в 2018 году (слева) и 2023 году (справа)

для правых блоков пролетных строений 11,5 м находится в диапазоне от 2,58 МПа до 4,65 МПа при разных этапах загрузки, для левых блоков пролетных строений 11,5 м находится в диапазоне от 2,67 МПа до 4,7 МПа при разных этапах загрузки.

Во-вторых, в 2018 году блоки пролётных строений загружены неравномерно, что говорит о смещении оси пути в сторону от оси транспортного сооружения (разница напряжений в блоках для 11,5 м ПС 0-1 – этап №1 = 5,12%; этап №5 = 6,48%; для 16,5 м ПС 0-1 – этап №1 = 6,09%; этап №5 = 1,44%;).

В-третьих, в 2023 году блоки пролётных строений «работают» равномерно, это значит, что ось пути и ось транспортного сооружения расположены в створе (совпадают).

Выявленные различия в численных значениях напряжений в элементах конструкций пролетных строений свидетельствуют о наличии дефектов либо неисправностей (возможно, смещение оси пути от оси моста, или это следствие неравномерного износа

конструкций от воздействия климатических факторов).

Выводы

Мониторинг, производимый с помощью измерительной системы «ТЕНЗО», позволил измерить фибровые деформации конструкции пролетных строений двух железобетонных путепроводов в 2018 и 2023 годах, по этим данным возможно прогнозировать об изменениях состояния пролетных строений за время эксплуатации. Исходя из полученных натурных испытаний, следует: физическое состояние балок железнодорожных путепроводов удовлетворяет требованиям Правил технической эксплуатации железных дорог Республики Казахстан. Благодаря защите тензодатчиков от воздействия окружающей среды, возможно производить мониторинг за техническим состоянием пролетных строений, что в свою очередь позволяет выявлять дефекты и прогнозировать появление новых. Подробная методика приведена в работах [3, 8-10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокарев С.А. Автоматизированные информационно-аналитические системы управления техническим состоянием мостов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2005. № 1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannye-informatsionno-analiticheskie-sistemy-upravleniya-tehnicheskim-sostoyaniem-mostov> (дата обращения: 02.10.2024).
2. Abdullayev S., Bondar I., Bakyt G., Ashirbayev G., Budiukin A., Baubekov Ye. (2021). Interaction of frame structures with rolling stock. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 445, 22-28. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.3>
3. Яшнов А.Н., Баранов Т.М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга Академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник ТГАСУ. 2017. № 1 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-rezultaty-raboty-sistemy-dinamicheskogo-monitoringa-akademicheskogo-mosta-cherez-r-angaru-v-irkutske> (дата обращения: 02.10.2024).
4. Технический отчет. Обследование и испытание железнодорожного путепровода по схеме 16,5+23,6+16,5 м через автомобильную дорогу II категории на км 56 ПК9+50 железнодорожной линии Кульсары-Тенгиз. – Алматы: АО «КазАТК им. М. Тынышпаева», 2018. – 126 с.
5. Lanis A., Razuvaev D., Lomov P. (2016). Conjugation of approach fill with bridge and overbridge. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2 (48), 110-120. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120)
6. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. (2011). Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges. Structural Control Health Monitoring. 19, 565-578. <https://doi.org/10.1002/stc.448>
7. Yang Y., Li S., Yan B. (2017). Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. Advances in Mechanical Engineering. 9 (1), 1-10. <http://doi.org/10.1177/1687814016684272>
8. Belyi A., Karapetov E., Efimenko Yu. (2017). Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance. 189, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.024>
9. Бондарь И.С. Влияние подвижной нагрузки на деформации пролетного строения железнодорожного моста // Сборник трудов с международным участием. Выпуск 7 – Инженерные сооружения на

транспорте. – М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – С. 64-67.

10. Бондарь И.С., Махметова Н.М., Квашнин М.Я., Хасенов С.С. Определение напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 92-100. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_92.

Темір жол өтпелерінің техникалық жай-күйінің мониторингі

^{1*}**БОНДАРЬ Иван Сергеевич**, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор,
ivan_sergeevich_08@mail.ru,

¹**МАМЕДОВА Жасмин Эльдаровна**, студент, Mamedova_Zh@gmail.ru,

¹**АЛДЕКЕЕВА Динара Танашбековна**, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор,
aldekeeva69@mail.ru,

¹**НҰРАХМЕТОВА Күлзира Құмарғалиқызы**, PhD, ассистент-профессор,
nurahmetova52@mail.ru,

¹«Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ университеті» АҚ, Шевченко көшесі, 97,
Алматы, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жасанды құрылыстарды олардың қалыпты жұмыс істеуі және объектіге ықтимал экстремалды әсер етуі кезінде оның жұмысын ешқандай шектеусіз қамтамасыз ететін күйде ұстау маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Зерттеудің мақсаты – Қазақстан Республикасының темір жолдарын техникалық пайдалану қағидаларының талаптарына сәйкес қауіпсіз пайдалану үшін әртүрлі осьтік жүктемелер кезінде пайдаланылатын жасанды құрылыстардың (кейде осы 25 т) техникалық жай-күйі туралы деректерді алу. Жұмыста 2018 жылғы сәуір және 2023 жылғы мамыр айларында екі өткелдің темірбетон аралық құрылыстарының кернеулі-деформацияланған жай-күйіне мониторинг нәтижелері ұсынылған. Статикалық жүктемелердің әсерінен ауытқулар, деформациялар мен кернеулер эксперименталды түрде алынды (ТЭМ18 тепловозы жүктеме ретінде таңдалды). Иілуді азайту үшін БПАО иілу өлшегіштері қолданылды, тензометрия құралдары (деформация және кернеу) негізінде бастапқы түрлендіргіштердің цифрлық тіркеуі мен жазбалары «ТЕНЗО» аппараттық-бағдарламалық кешенімен анықталды. Авторлар теміржол көлігінің пайдалану қызметтеріне жасанды құрылыстардың техникалық жай-күйін бақылауға көмектесетін типтік конструкциялардың екі өткелінің темірбетон аралық құрылыстарының кернеулі-деформацияланған жай-күйіне тәуелділіктер алды. Сондай-ақ, бұл деректерді теміржол көпірлерінің ұқсас аралық құрылыстарын зерттеу және сынау үшін, пайдалану жүктемелерінің артуы кезінде олардың техникалық жай-күйіне одан әрі мониторинг жүргізу үшін пайдалану ұсынылады.

Кілт сөздер: теміржол көпірі, теміржол көлігі, бақылау, кернеулі-деформацияланған күй, иілу, деформация, кернеу.

Monitoring of the Technical Condition of Railway Crossings

^{1*}**BONDAR Ivan**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, ivan_sergeevich_08@mail.ru,

¹**MAMADOVA Jasmine**, Student, Mamedova_Zh@gmail.ru,

¹**ALDEKEEVA Dinara**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, aldekeeva69@mail.ru,

¹**NURAKHMETOVA Kulzira**, PhD, Assistant Professor, nurahmetova52@mail.ru,

¹JSC «Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University», Shevchenko Street, 97, Almaty, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The maintenance of artificial structures in a condition that ensures its operation without any restrictions, during their normal operation and possible extreme impacts on the object is one of the most important tasks. The purpose of this study was to obtain data on

the technical condition of artificial structures operated under various axial loads (sometimes 25 tons per axle) for safe operation in accordance with the requirements of the Rules of Technical Operation of Railways of the Republic of Kazakhstan. The paper presents the results of monitoring the stress-strain state of reinforced concrete superstructures of two overpasses in April 2018 and May 2023. Deflections, deformations and stresses from the effects of static loads were experimentally obtained (the TEM18 diesel locomotive was chosen as the load). To reduce deflections, 6PAO deflection meters were used, digital registration and recording of primary transducers based on strain gauges (deformations and stresses) were determined by the TENZO hardware and software complex. The authors obtained the dependences of the stress-strain state of reinforced concrete superstructures of two overpasses of standard structures, which help railway transport operational services to monitor the technical condition of artificial structures. It is also recommended to use these data for surveys and tests of similar railway bridge spans, for further monitoring of their technical condition with increasing operational loads.

Keywords: railway bridge, railway transport, control, stressed-deformed state, bending, deformation, tension.

REFERENCES

1. Bokarev S.A. Avtomatizirovannye informacionno-analiticheskie sistemy upravleniya tekhnicheskimi sostoyaniem mostov // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2005. No. 1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannye-informatsionno-analiticheskie-sistemy-upravleniya-tehnicheskimi-sostoyaniem-mostov> (data obrashcheniya: 02.10.2024).
2. Abdullayev S., Bondar I., Bakyt G., Ashirbayev G., Budiukin A., Baubekov Ye. (2021). Interaction of frame structures with rolling stock. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 445, 22-28. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.3>
3. Yashnov A.N., Baranov T.M. Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa Akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutske // Vestnik TGASU. 2017. No. 1 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-rezultaty-raboty-sistemy-dinamicheskogo-monitoringa-akademicheskogo-mosta-cherez-r-angaru-v-irkutske> (data obrashcheniya: 02.10.2024).
4. Tekhnicheskij otchet. Obsledovanie i ispytanie zheleznodorozhnogo puteprovoda po skheme 16,5+23,6+16,5 m cherez avtomobil'nyuyu dorogu II kategorii na km 56 PK9+50 zheleznodorozhnoj linii Kul'sary-Tengiz. – Almaty: AO «KazATK im. M. Tynyshpaeva», 2018. – 126 p.
5. Lanis A., Razuvaev D., Lomov P. (2016). Conjugation of approach fill with bridge and overbridge. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2(48), 110-120. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120)
6. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. (2011). Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges. Structural Control Health Monitoring. 19, 565-578. <https://doi.org/10.1002/stc.448>
7. Yang Y., Li S., Yan B. (2017). Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. Advances in Mechanical Engineering. 9 (1), 1-10. <http://doi.org/10.1177/1687814016684272>
8. Belyi A., Karapetov E., Efimenko Yu. (2017). Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance. 189, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.024>
9. Bondar I.S. Vliyanie podvizhnoj nagruzki na deformacii proletnogo stroeniya zheleznodorozhnogo mosta // Sbornik trudov s mezhdunarodnym uchastiem. Vypusk 7 – Inzhenernye sooruzheniya na transporte. – Moscow: MGUPS (MIIT), 2016. – Pp. 64-67.
10. Bondar I.S., Mahmetova N.M., Kvashnin M.Ya., Hasenov S.S. Opredelenie napryazhennogo sostoyaniya i dinamicheskikh koefficientov balochnykh mostov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 4 (67). Pp. 92-100. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_92.