

# Напряжённо-деформированное состояние железобетонного путепровода под нагрузкой



Иван БОНДАРЬ



Михаил КВАШНИН



Динара АЛДЕКЕЕВА

*Бондарь Иван Сергеевич* – Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан.

*Квашнин Михаил Яковлевич* – Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан.

*Алдекеева Динара Танашибековна* – Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан\*.

Балочные пролётные строения являются наиболее уязвимыми элементами мостовой системы, так как они подвергаются прямым воздействиям: подвижной нагрузки, природно-климатическим факторам (температурным и влажностным воздействиям, включая замораживание и оттаивание, усадку, влажность и др.). Появление дефектов конструкций моста в процессе эксплуатации неизбежно, поэтому перед инженерами-строителями вопрос усиления повреждённых конструкций мостов является актуальным и в настоящее время. В статье рассмотрены некоторые результаты расчётных значений и инструментальных измерений напряжённо-деформированного состояния

(НДС) железобетонных балочных пролётных строений железнодорожного путепровода под эксплуатационными нагрузками, при проходе различных единиц подвижного состава. Целью данных исследований является контроль напряжённо-деформированного состояния железнодорожного путепровода для выявления и устранения дефектов на ранних стадиях. Полученные результаты расчёта, выполненные методом конечных элементов (МКЭ) в программе ABAQUS/Standard, хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Эти результаты могут использоваться при мониторинге состояния искусственных сооружений на магистральных линиях АО «НК «ҚТЖ».

*Ключевые слова:* железная дорога, путепровод, балочные пролётные строения, напряжённо-деформированное состояние.

\*Информация об авторах:

**Бондарь Иван Сергеевич** – кандидат технических наук, сениор-лектор кафедры транспортного строительства Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан, [ivan\\_sergeevich\\_08@mail.ru](mailto:ivan_sergeevich_08@mail.ru).

**Квашнин Михаил Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного строительства Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан, [kvashnin\\_mj55@mail.ru](mailto:kvashnin_mj55@mail.ru).

**Алдекеева Динара Танашибековна** – кандидат технических наук, доцент кафедры естественно-научных дисциплин Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан, [aldekeeva69@mail.ru](mailto:aldekeeva69@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 08.11.2019, актуализирована 14.12.2019, принята к публикации 25.01.2020.

For the English text of the article please see p. 75.

**М**остовое полотно является основным несущим элементом, который передаёт нагрузки поперечно опорам, таким как продольная балка, поперечные балки и стрингеры. Поскольку железобетонные балки моста подвергаются прямым воздействиям подвижной (транспортной) нагрузки, а также природно-климатическим факторам – замораживанию и оттаиванию, усадки и влажности, они являются одними из наиболее уязвимых элементов в мостах, где чаще всего появляются повреждения (дефекты), такие как трещины, сколы защитного слоя бетона и коррозия стальной арматуры. Кроме того, постоянные (реальные) нагрузки от перегруженных транспортных средств, которые часто встречаются на магистральных железнодорожных линиях Казахстана и России, приводят к серьёзному усталостному повреждению несущих железобетонных балок. Из-за таких ситуаций средний срок службы железобетонных балочных пролётных строений железнодорожных мостов резко сокращается, а расходы на содержание и техническое обслуживание мостов постоянно увеличиваются.

В конце прошлого века несколько стран, таких как Германия, США, Канада, Япония и Корея поняли, что срок службы железобетонных балок имеет решающее значение для всего моста. Были начаты исследования напряжённо-деформированного состояния балочных пролётных строений железобетонных мостов. Появление дефектов (сколов и трещин бетона, коррозии арматуры) конструкций моста в процессе эксплуатации неизбежно, поэтому перед инженерами-строителями вопрос усиления повреждённых конструкций мостов является актуаль-

ным и в настоящее время [1, с. 1705–1708; 2, с. 484–513; 3, с. 35–49].

В ряде стран принято производить мониторинг искусственных сооружений, своевременно устранять дефекты (повреждения) железобетонных балочных пролётных строений мостов и производить усиление их конструктивных элементов углеволокном или композитными материалами [4, с. 2769–780; 5, с. 258–266; 6, с. 302–310].

Далее приведены расчётные и экспериментальные результаты определения напряжённого состояния железобетонных балочных пролётных строений железнодорожного путепровода (рис. 1) под действием известных нагрузок (сцепы – тепловоза ТЭМ-18 и вагона хоппер-дозатора для перевозки щебня, модель 19–9870; сплотки – из трёх тепловозов ТЭМ-18), при статических испытаниях путепровода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОГО СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Выполнены расчёты напряжённого состояния элементов сооружения при заданных сочетаниях нагрузок (расчётных случаях) [7, с. 101–120].

Всего было рассмотрено 12 расчётных случаев:

- 1 случай – П0. «Натяжение арматуры блоков 23,6 м + собственный вес»;
- 2 случай – С1. «П0 + сцеп (середина локомотива над серединой ПС0–1)»;
- 3 случай – С2. «П0 + сцеп (середина вагона над серединой ПС0–1)»;
- 4 случай – С3. «П0 + сцеп (середина вагона над опорой № 1)»;
- 5 случай – С4. «П0 + сцеп (середина сцепы над серединой ПС1–2)»;

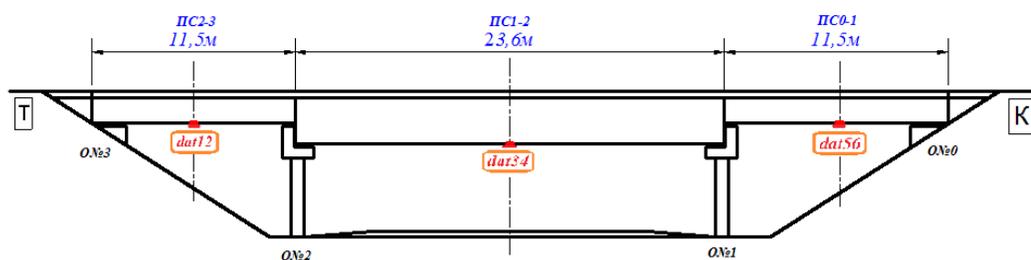


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на пролётных строениях железнодорожного железобетонного путепровода, на 97 км ПК5+20, ПС0–1, ПС1–2, ПС2–3 – пролётные строения путепровода; дат 1, 2, 3, 4, 5, 6 – тензорезисторы FLM-60–11; О № 1, О № 2 – рамные, двухстоечные промежуточные опоры; О № 0, О № 3 – устои обсыпного типа (авторский).



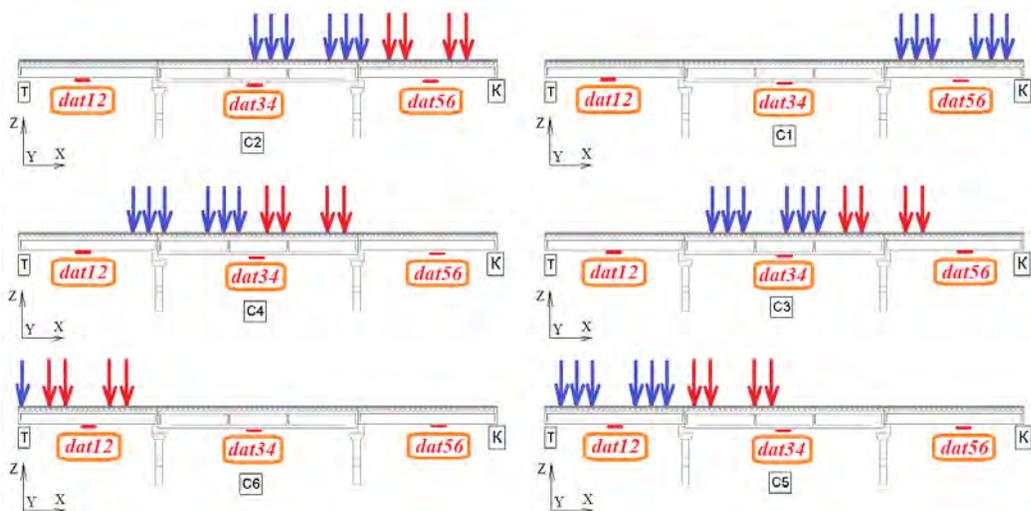


Рис. 2. Схемы временных нагрузок от сцепа «локомотив-вагон» (С1–С6), *dat 1, 2, 3, 4, 5, 6* – тензорезисторы установленные на пролётных строениях путепровода; К, Т – станции до и после путепровода (подготовлены авторами).



Рис. 3. Фотография установки сцепа «локомотив-вагон» на пролётное строение 0–1 (нагрузка С1) (сделана авторами).

6 случай – С5. «П0 + сцеп (середина сцепа над опорой № 2)»;

7 случай – С6. «П0 + сцеп (середина вагона над серединой ПС2–3)» (см. рис. 2, 3);

8 случай – L1. «П0 + сплотка (середина локомотива № 1 над серединой ПС2–3)»;

9 случай – L2. «П0 + сплотка (середина локомотива № 2 над опорой № 2)»;

10 случай – L3. «П0 + сплотка (5-я ось 2-го локомотива над серединой ПС1–2)»;

11 случай – L4. «П0 + сплотка (2-я ось 3-го локомотива над серединой ПС1–2)»;

12 случай – L5. «П0 + сплотка (2-я ось 3-го локомотива над серединой ПС0–1)» (см. рис. 4, 5).

Расчётная модель рассматриваемого искусственного сооружения составлена в программе ABAQUS/Standard. Результаты расчё-

тов представлены в виде значений деформаций в контрольных точках, полученных при помощи виртуальных датчиков (податливых стержневых элементов начальной длиной 60 мм с линейно-упругими свойствами стали), установленных на бетоне пролётных строений путепровода. Контрольные точки выбраны на нижнем поясе в серединных сечениях пролётных строений сооружения: «*dat 1, 2*» – датчики в середине пролётного строения ПС0–1; «*dat 3, 4*» – датчики в середине пролётного строения ПС1–2; «*dat 5, 6*» – датчики в середине пролётного строения ПС2–3 (где ПС0–1 – пролётное строение 11,5 м, со стороны станции К; ПС1–2 – пролётное строение 23,6 м; ПС2–3 – пролётное строение 11,5 м, со стороны станции Т).

Результаты расчётов элементов сооружения при заданных нагрузках (С1–С6

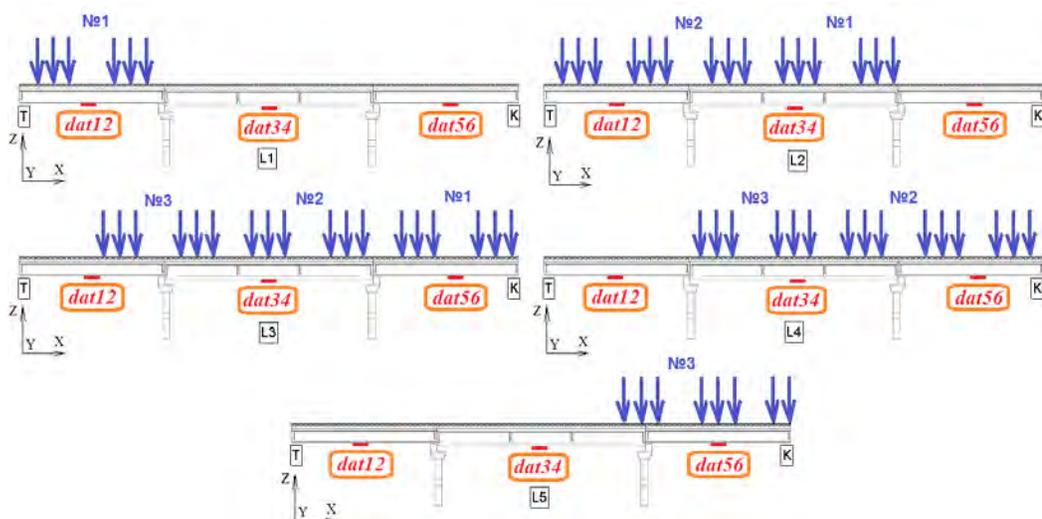


Рис. 4. Схемы временных нагрузок от сплочки «3 локомотива» (L1–L5), dat 1, 2, 3, 4, 5, 6 – тензорезисторы установленные на пролётных строениях путепровода; K, T – станции до и после путепровода (авторский).



Рис. 5. Фотография установки сплочки «3 локомотива» на пролётное строение 1–2 (нагрузка L4) (сделана авторами).

и L1–L5), представлены в виде распределений напряжений в арматуре и бетоне блоков пролётных строений путепровода для расчётного случая П0 и в виде значений напряжений в контрольных точках и виртуальных датчиках для всех рассмотренных расчётных случаев,  $S_a$  – натяжение арматуры (табл. 1). Полученные расчётные данные согласуются с полученными экспериментально авторами [8, с. 163–166; 6, с. 64–67].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Натурные испытания однопутного железнодорожного путепровода через автодорогу в производственной зоне проводи-

лись весной 2018 года при помощи тензометрического программно-аппаратного комплекса (ТПАК) [10, с. 43–47]. Путепровод построен в 1988 году, по схеме: 11,5 + 23,6 + 11,5 м на 96 км ПК5–20 железнодорожной линии Кульсары–Тенгиз, из сборных железобетонных конструкций.

Тензорезисторы (dat 1, 2, 3, 4, 5, 6) установлены на каждом блоке пролётных строений в средней части (нечётные на правых блоках, чётные на левых блоках), также произведена защита наклеенных тензорезисторов от внешних воздействий окружающей среды с целью дальнейшего мониторинга в течение 8–10 лет.



Расчётные значения напряжений в контрольных точках пролётных строений путепровода

Расчётный случай	Напряжение, МПа			Приращение напряжения от временной нагрузки, МПа		
	dat12	dat34	dat56	dat12	dat34	dat56
S <sub>a</sub>	0,00	-22,88	0,00	—	—	—
П0	3,17	-17,98	3,14	—	—	—
Сцеп – тепловоз ТЭМ-18 и вагон хоппер-дозатор						
C1	3,17	-17,98	7,75	0,00	0,00	4,61
C2	3,17	-14,65	6,34	0,00	3,33	3,21
C3	3,17	-14,01	6,57	0,00	3,97	3,43
C4	4,54	-14,10	3,14	1,37	3,88	0,00
C5	8,59	-14,76	3,14	5,41	3,22	0,00
C6	8,56	-17,16	3,14	5,39	0,82	0,00
Сплотка – из 3-х тепловозов ТЭМ-18						
L1	6,40	-17,98	3,14	3,23	0,00	0,00
L2	3,17	-17,98	7,41	0,00	0,00	4,27
L3	3,17	-14,09	8,61	0,00	3,89	5,47
L4	8,53	-14,25	7,35	5,35	3,73	4,21
L5	6,27	-14,50	6,16	3,10	3,48	3,02

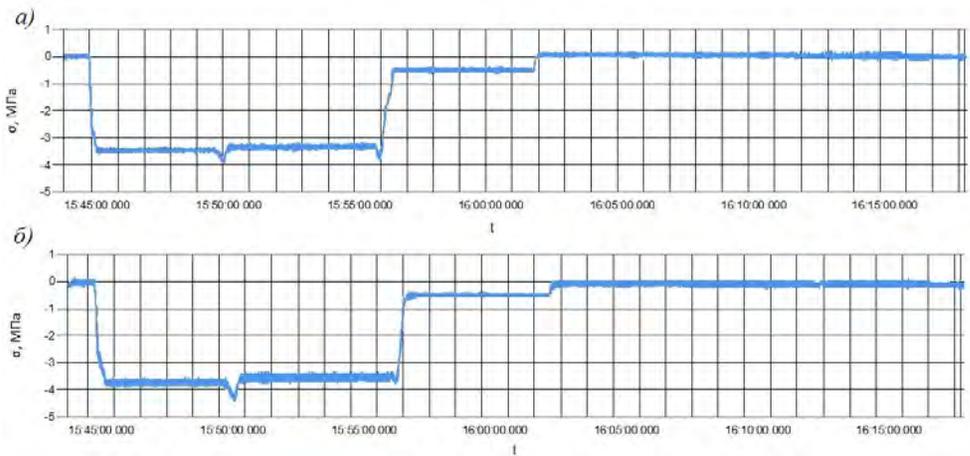


Рис. 6. Диаграммы фибровых напряжений растянутой зоны ПС 0–1 (dat 5, 6, нагрузка С1): а – в правом блоке; б – в левом блоке (построены авторами).

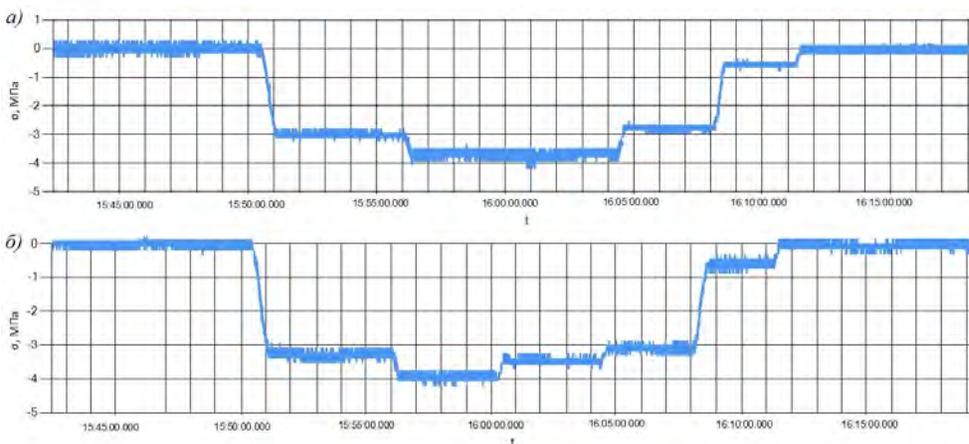


Рис. 7. Диаграммы фибровых напряжений растянутой зоны ПС 1–2 (dat 3, 4, нагрузка С4): а – в правом блоке; б – в левом блоке (построены авторами).

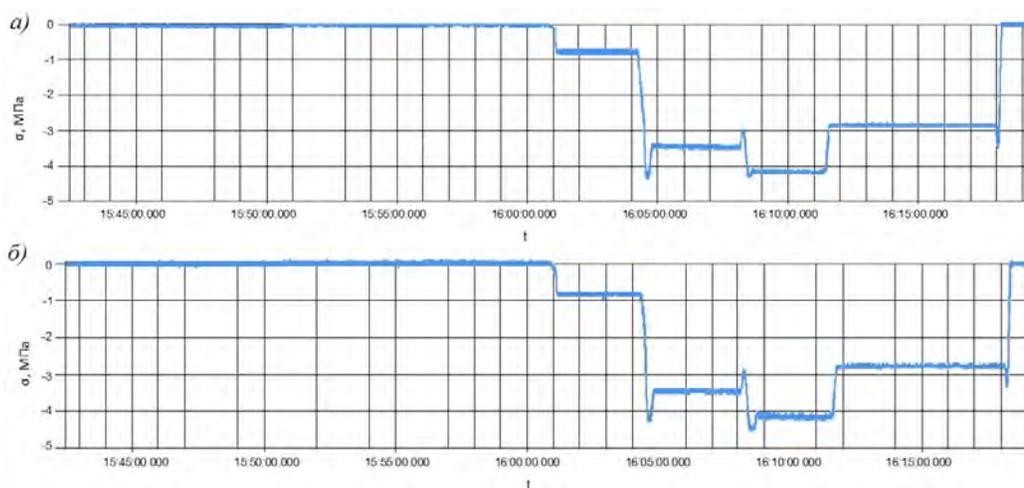


Рис. 8. Диаграммы фибровых напряжений растянутой зоны ПС 2–3 (dat 1, 2, нагрузка С6): а – в правом блоке; б – в левом блоке (построены авторами).

Таблица 2

**Фибровые напряжения от временных нагрузок сцепа «тепловоз ТЭМ-18 и вагон хоппер-дозатор» и сплотки «из трёх тепловозов ТЭМ-18» (статические испытания)**

Железнодорожный путепровод 11,5+23,6+11,5 м на 96 км ПК5–20						
Схема расстановки временной нагрузки	ПС 0–1		ПС 1–2		ПС 2–3	
	Правый блок dat 1	Левый блок dat 2	Правый блок dat 3	Левый блок dat 4	Правый блок dat 5	Левый блок dat 6
	σ, МПа	σ, МПа	σ, МПа	σ, МПа	σ, МПа	σ, МПа
Сцеп – тепловоз ТЭМ-18 и вагон хоппер-дозатор						
C1	3,71	3,90	0	0	0	0
C2	3,99	4,12	1,94	1,61	0	0
C3	1,54	1,59	3,37	2,97	0	0
C4	0	0	3,42	3,73	0,52	0,45
C5	0	0	1,63	1,75	3,70	3,46
C6	0	0	0	0	3,88	3,61
Сплотка – из 3-х тепловозов ТЭМ-18						
L1	3,12	3,05	0,02	0,03	0,00	0,10
L2	0,07	0,08	0,03	0,04	3,02	3,06
L3	0,15	0,03	3,38	3,18	4,19	4,11
L4	4,12	4,15	3,26	3,19	3,99	3,96
L5	2,34	2,50	2,98	2,91	2,86	2,82

В качестве примера приведены диаграммы измеренных фибровых напряжений в растянутой зоне (нижняя часть ребра) в средней части железобетонных пролётных строений железнодорожного путепровода (рис. 6–8), возникающие при воздействии временных нагрузок от сцепа «тепловоз ТЭМ-18 и вагон хоппер-дозатор» (статические испытания, табл. 2). Подробное описание технической части (первичные и вто-

ричные преобразователи) и программного обеспечения используемого аппаратно-программного комплекса «ГЕНЗО» излагается в работе [11, с. 275–279].

Расчётные данные согласуются с экспериментальными данными, полученными на различных объектах на магистральных линиях АО «НК «ҚТЖ», приведённых в работах [12, с. 163–166; 13, с. 43–47; 14, с. 38–57; 15, с. 64–67; 16, с. 275–279].





## ВЫВОДЫ

Из сравнения напряжений, полученных расчётным путём с применением метода конечных элементов, и напряжений, полученных при натурных испытаниях балочных железобетонных пролётных строений путепровода следует, что описание напряжённо-деформированного состояния пролётных строений железнодорожного путепровода вполне адекватно отражает воздействие нагрузки на пролётные строения и отклик конструкции на это воздействие. Полученные напряжения в балочных железобетонных пролётных строениях путепровода, можно использовать в расчётах подобных (типовых) балочных пролётных строений на сейсмостойкость и динамических расчётах устойчивости при увеличении эксплуатационной нагрузки на железнодорожные мосты.

Для определения фактического технического состояния конструкций и наиболее эффективной оценки надёжности конструкций мостов и установления соответствия между расчётной схемой и действительной работой искусственных сооружений необходимо осуществлять контроль изменения напряжённо-деформированного состояния искусственных сооружений под эксплуатационными нагрузками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nam, Jeong; Yoon, Soon; Moon, Hwan; Ok, Dong; Hong, Soon. Development of FRP-Concrete Composite Bridge Deck in Korea. *Key Engineering Materials*, January 2006, Vol. 326–328, pp. 1705–1708. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.1705>.
2. MacGregor, J. G. Safety and limit states design for reinforced concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, December 1976, Vol. 3, Iss. 4, pp. 484–513. DOI: <https://doi.org/10.1139/176-055>.
3. Winter, G. Safety and Serviceability Provisions in the ACI Building Code. *Concrete Design: U.S. and European Practices*, American Concrete Institute, Detroit, 1979, Vol. 59, pp. 35–49. [Электронный ресурс]: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/17764>. Доступ 14.12.2019.
4. Gibson, R. F. Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures. *Composites Science and Technology*, 2000, Vol. 60, Iss. 15, pp. 2769–2780. [Электронный ресурс]: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/modal-vibration-response-measurements-for-characterization-of-ar6uW7WxP>. Доступ 14.12.2019.
5. Eamon, C., Nowak, A. S. Effects of Edge-Stiffening Elements and Diaphragms on Bridge Resistance and Load Distribution. *Journal of Bridge Engineering*, September 2002, Vol. 7, Iss. 5, pp. 258–266. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:5(258).
6. Deniaud, C., Cheng, J. J. R. Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Fiber Reinforced

Polymer Sheets. *Journal of Composites for Construction*. 2003, Vol. 7, Iss. 4, pp. 302–310. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:4(302).

7. Васильев А. И. Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов // *Труды ЦНИИС*. – 2002. – Вып. 208. – С. 101–120.

8. Квашнин М. Я., Буромбаев С. А., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Влияние вибродинамического воздействия локомотивов с высокими осевыми нагрузками на ж.д. путь и балочные ж.б. пролётные строения мостов // *Труды XII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути»*. Чтения, посвящённые памяти профессора Г. М. Шахунянца. – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – С. 163–166.

9. Бондарь И. С. Влияние подвижной нагрузки на деформации пролётного строения железнодорожного моста // *Сб. трудов с Международным участием*. Вып. 7 «Инженерные сооружения на транспорте». – М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – С. 64–67.

10. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Рыстыгулов П. А., Кыстаубаев С. Б. Экспериментальные исследования конструкций железнодорожных мостов, усиливаемых композитным материалом // *Труды XVI научно-практ. конференции «Безопасность движения поездов»*. – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – Т II. – С. 43–47.

11. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Мониторинг воздействия подвижного состава на балочные пролётные строения железнодорожных мостов // *Материалы Международной научно-практ. конференции «Транспортная наука и инновации»*, посвящённой посланию Президента РК Н. А. Назарбаева «Нұрлы жол – путь в будущее». – Алматы: КазАТК, 2015. – С. 275–279.

12. Бондарь И. С., Буромбаев С. А., Алдекеева Д. Т. Расчёт напряжённо-деформированного состояния железнодорожных путепроводов // *Мир транспорта*. – 2019. – № 1. – С. 58–69.

13. Бондарь И. С. Измерение деформаций балочных пролётных строений мостов // *Мир транспорта*. – 2016. – № 6. – С. 36–51.

14. Буромбаев С. А., Квашнин М. Я. Диагностика и мониторинг искусственных сооружений магистральных линий АО «НК «ҚТЖ» // *Вестник КазАТК*. – 2016. – № 3. – С. 38–57.

15. Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Алдекеева Д. Т., Зайцев А. А. Инструментальная диагностика металлических железнодорожных мостов // *XV Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути»*. Чтения, посвящённые памяти профессора Г. М. Шахунянца. – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – С. 259–265.

16. Бондарь И. С., Алдекеева Д. Т., Нурахова А. К. Напряжённо-деформированное состояние железнодорожного путепровода под эксплуатационными нагрузками // *Сб. научных трудов VII Международной научно-практ. конференции «Автомобильные дороги и транспортная техника: проблемы и перспективы развития» КазАДИ им. Л. Б. Гончарова*. – Алматы, 2019. – С. 19–24.