



Расчёт напряжённо-деформированного состояния путепроводов



Иван БОНДАРЬ
Ivan S. BONDAR

Султан БУРОМБАЕВ
Sultan A. BUROMBAEV



Динара АЛДЕКЕЕВА
Dinara T. ALDEKEEVA

Бондарь Иван Сергеевич — старший преподаватель кафедры транспортного строительства Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

Буромбаев Султан Адам-баевич — начальник филиала Алматинской дистанции пути (ПЧ-46) АО «НК «Казахстанские железные дороги», Алматы, Казахстан.

Алдекеева Динара Танаибековна — кандидат технических наук, доцент кафедры естественно-научных дисциплин КазАТК им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

Calculation of Stress-Strain State of Overpasses

(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 65)

В статье рассмотрены результаты расчётного анализа несущих конструкций путепроводов с однопутной железнодорожной линией. Полученные напряжённо-деформированные состояния в элементах железобетонных пролётных строений и промежуточных опор при заданных нагрузках с использованием пространственных конечно-элементных моделей позволяют провести их сравнение с нормируемым диапазоном нагрузок и уровнем реальной устойчивости и надёжности мостовых объектов. При этом возникает и потребность в мониторинге подобных состояний для поддержания жизнеспособности эксплуатируемых конструкций.

Ключевые слова: железная дорога, путепровод, балочные пролётные строения, расчёт, метод конечных элементов, напряжённо-деформированное состояние.

Создавая расчётную модель для анализа напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций путепроводов, следует учитывать, что нормативная нагрузка в различных странах отличается.

В США до настоящего времени используется схема Купера, состоящая из пятиосного паровоза, четырёхосного тендера и равномерно распределённой вагонной нагрузки. Давление от оси на рельсы в этой схеме принято пропорционально некоторому постоянному коэффициенту. В 1922 году там проектировали мосты под нагрузку E10, в 1935 году — E72, а теперь проектируют под нагрузку E80.

Кроме США, модель Купера используют при проектировании мостов в Мексике и Австралии. Аналогичные схемы вертикальных нормативных нагрузок подвижного состава, состоящие из сосредоточенных грузов и равномерно распределённой вагонной нагрузки, применялись в Бельгии, Франции, Италии, Югославии, Мозамбике, Норвегии, Польше, Швейцарии [1, с. 117–120].

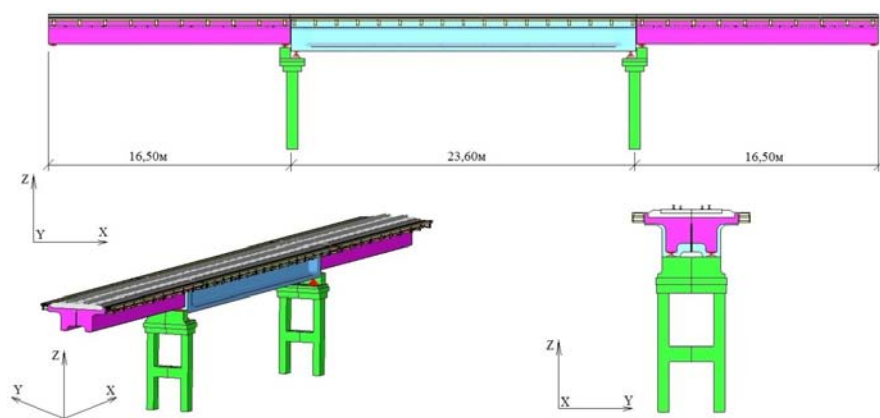


Рис. 1. Деформируемая конечно-элементная модель путепровода. Общий вид.

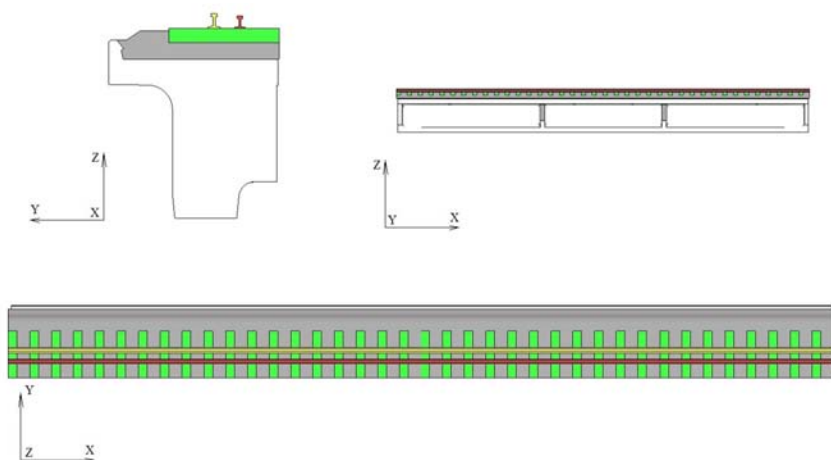


Рис. 2. Верхнее строение пути (пролётные строения 16,5 м и ВСП на них не показаны).

ОПИСАНИЕ РАСЧЁТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Расчётные модели для анализа напряжённо-деформированного состояния сооружения построены по данным, предоставленным в виде рабочей документации для путепровода на однопутной железнодорожной линии. Параметры путепровода 16,5 + 23,6 + 16,5 м. Общий вид расчётной деформируемой модели рассматриваемого сооружения представлен на рис. 1.

Модели железобетонных элементов несущих конструкций путепровода учитывают совместную работу армирующих элементов и бетонного заполнения [2, с. 222–224; 3, с. 53; 5, с. 54–55]. Бетонное заполнение блоков пролётных строений 16,5 м и 23,6 м, а также рам и тумб промежуточных опор путепровода заданы объёмными элементами. Армирующие элементы пролётных конструкций (каркасы, сетки,

пучки проволок для предварительного напряжения бетона) и строений промежуточных опор заданы стержневыми элементами и учитывают их пространственное расположение в бетонном заполнении.

ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ ПУТИ

Упруго-массовые характеристики балласта и рельсошпальной решётки (рельсы, контррельсы, шпалы) в расчётных моделях учтены путём их непосредственного задания объёмными элементами с соответствующими физико-механическими свойствами материалов (рис. 2). Сечение деревянной шпалы 180×250 мм (тип IA).

БОКОВЫЕ ТРОТУАРЫ

Упруго-массовые модели боковых тротуаров (металлические консоли, железобетонный настил) и перильного ограждения заданы упрощённо (рис. 3).

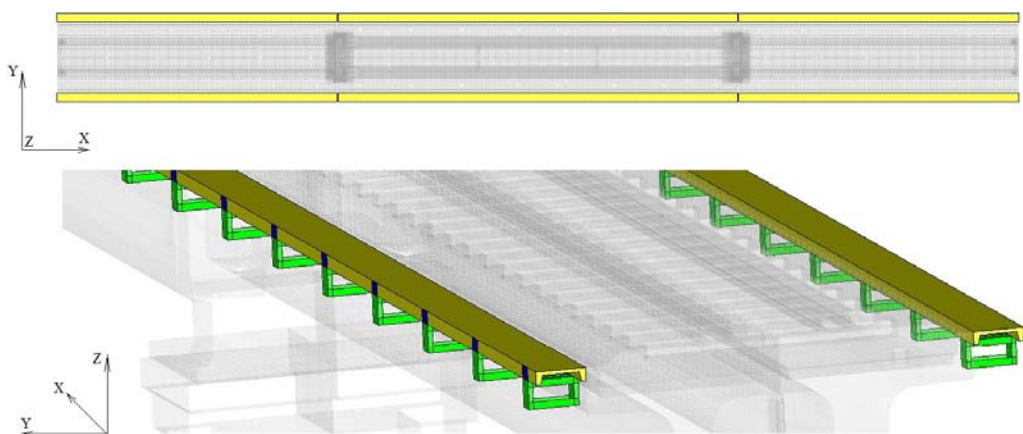


Рис. 3. Боковые тротуары и перильное ограждение.

ОПОРНЫЕ ЧАСТИ

Каждая опорная часть пролётного строения представлена упрощённо — объединением группы узлов бетона, примыкающих к окаймляющей коробке или опорному листу, в единое жёсткое тело. Массы опорных частей обозначены при помощи точечных элементов типа MASS.

Между жёстким телом тумбы промежуточной опоры и соответствующим жёстким телом блока пролётного строения заданы кинематические связи, реализующие следующие типы опирания:

- в местах установки неподвижных опорных частей — «цилиндрический шарнир»;
- в местах установки подвижных опорных частей — «каток» (цилиндрический шарнир + поступательная степень свободы вдоль локальной оси, изначально параллельной оси пути).

БЛОК ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ 23,6 М

Конечно-элементная сетка бетона блока учитывает наличие отверстий для водоотводных трубок. Армирующие элементы выделены в группы согласно назначенным классам:

- напрягаемая арматура (пучки из 24 проволок Ø5 ВП с установкой в массив бетона при помощи каркасно-стержневых анкеров);
- арматура классов AI, AII.

Для блоков из предварительно напряжённого железобетона заданы напряжения

в армирующих пучках согласно данным рабочей документации:

- верхние прямолинейные пучки 7100 кгс/см²;
- полигональные пучки 10500 кгс/см²;
- нижние прямолинейные пучки 10400 кгс/см².

БЛОК ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ 16,5 М

Конечно-элементная сетка бетона блока учитывает наличие отверстий для водоотводных трубок. Армирующие элементы выделены в группы согласно назначенным классам AI, AII.

Бетон монтажных стыков блоков выделен в отдельную группу элементов (рис. 4).

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ ОПОРА

Модель промежуточной опоры состоит из рамы Р-2 и опорной тумбы. Армирующие элементы выделены в группы согласно назначенным классам AI, AII, AIII.

ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Уровень грунта от перемычек рам Р-2 промежуточных — порядка 1,0 м. Для узлов стоек рам не выше указанного уровня заданы закрепления от любых перемещений.

Ввиду симметричности сооружения и наблюдаемых нагрузок относительно плоскости симметрии пути в расчётных моделях для анализа напряжённо-деформированных состояний предусмотрены условия симметрии (закрепления соответствующей группы узлов от перемещений вдоль поперечной оси пути).

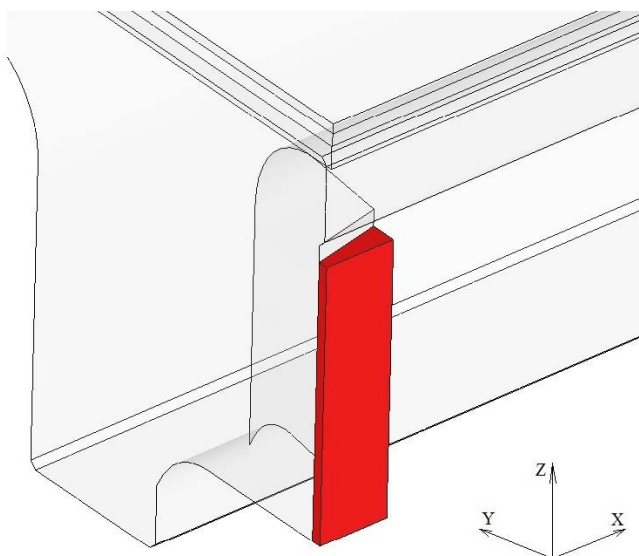


Рис. 4. Деформируемая конечно-элементная модель пролётного строения 16,5 м. Бетон монтажных стыков торцевых диафрагм.

Для расчётного анализа форм и частот собственных колебаний сооружения рассмотрена модель без условий симметрии поперёк оси пути.

НАГРУЗКИ

Все значения нагрузок приняты без учёта различных коэффициентов СП [6, с. 33] и СНиП [7, с. 12] (условий работы, надёжности по нагрузкам, надёжности по ответственности и др.).

Собственный вес конструкций сооружения учитывается заданием инерционной нагрузки — гравитации [8–12].

Временные нагрузки заданы согласно следующим видам воздействий:

- статическая нагрузка от веса сцепа по схеме «локомотив-вагон»;
- статическая нагрузка от веса сплочки из трёх локомотивов.

Воздействие от веса локомотива задано в виде сосредоточенных сил 202,7 кН/ось в узлы модели рельсового пути в соответствии с расстояниями:

- 16900 мм между осями автосцепок;
- 8800 мм между шкворнями тележек (база локомотива);
- 1850 мм между осями тележки.

Воздействие от веса вагона задано в виде сосредоточенных сил 228,7 кН/ось в узлы модели рельсового пути в соответствии с расстояниями:

- 11520 мм между осями автосцепок;

- 7200 мм между шкворнями тележек (база вагона);
- 1850 мм между осями тележки.

Рассмотренные схемы временных нагрузок представлены на рис. 5 и 6 (всего шесть схем для сцепа «локомотив-вагон» и пять схем для сплочки «три локомотива»).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОГО СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Выполнены расчёты напряжённо-деформированного состояния элементов сооружения при заданных сочетаниях нагрузок [13, с. 101–120].

Рассмотрено 12 расчётных случаев:

- П0. «Натяжение арматуры блоков 23,6 м + собственный вес»;
- С1. «П0 + сцеп (середина локомотива над серединой ПС0–1)»;
- С2. «П0 + сцеп (середина вагона над серединой ПС0–1)»;
- С3. «П0 + сцеп (середина вагона над опорой К)»;
- С4. «П0 + сцеп (середина сцепа над серединой ПС1–2)»;
- С5. «П0 + сцеп (середина сцепа над опорой Т)»;
- С6. «П0 + сцеп (середина вагона над серединой ПС2–3)»;
- Л1. «П0 + сплочка (середина локомотива № 1 над серединой ПС0–1)»;
- Л2. «П0 + сплочка (середина локомотива № 2 над опорой К)»;

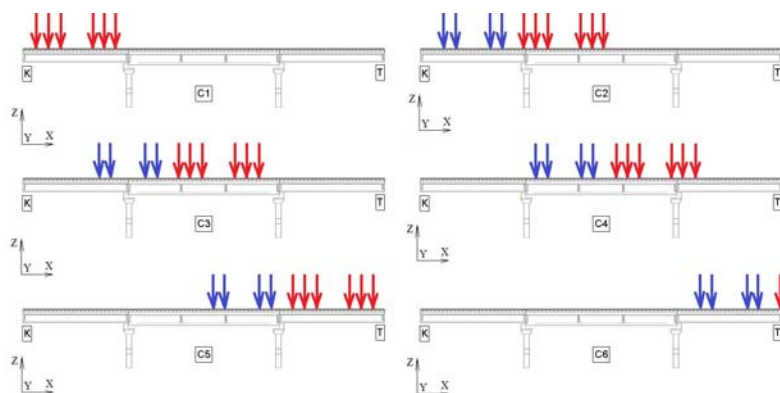


Рис. 5. Схемы временных нагрузок от сцепа «локомотив-вагон» (C1–C6).

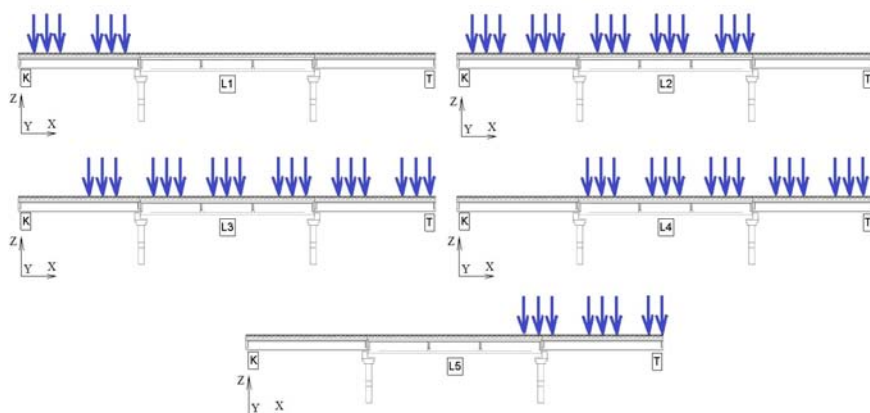


Рис. 6. Схемы временных нагрузок от сплочки «три локомотива» (L1–L5).

- L3. «П0 + сплотка (5-я ось 2-го локомотива над серединой ПС1–2)»;
 - L4. «П0 + сплотка (2-я ось 3-го локомотива над серединой ПС1–2)»;
 - L5. «П0 + сплотка (2-я ось 3-го локомотива над серединой ПС2–3)»,
- где обозначены: К, Т – станции до и после путепровода; ПС0–1 – пролётное строение со стороны станции К; ПС1–2 – пролётное строение 23,6 м; ПС2–3 – пролётное строение со стороны станции Т.

Результаты расчётов представлены в виде значений перемещений и 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 срединных сечениях пролётных строений сооружения:

- «dat1,2» – датчики в середине пролётного строения ПС0–1;

- «dat3,4» – датчики в середине пролётного строения ПС1–2;
- «dat5,6» – датчики в середине пролётного строения ПС2–3.

Результаты расчётов элементов сооружения при заданных нагрузках присутствуют в виде распределений перемещений и напряжений в арматуре и бетоне блоков пролётных строений путепровода для расчётного случая П0 и в виде значений перемещений, деформаций и напряжений в контрольных точках и виртуальных датчиках для всех рассмотренных расчётных случаев, S_a – натяжение арматуры (таблица 1). Расчётные данные согласуются с полученными экспериментально авторами [14, с. 165; 15, с. 45; 16, с. 48–51; 17, с. 67; 18, с. 278].

ВЫВОДЫ

Из анализа полученных расчётным путём перемещений, деформаций и напряжений балочных железобетонных пролётных строений путепровода следует, что для определения напряжённо-деформирован-

Таблица 1

**Расчётные значения перемещений, деформаций и напряжений в контрольных точках
пролётных строений путепровода**

Расчётный случай	Перемещение, мм			Приращение перемещения от временной нагрузки, мм		
	ПС0–1	ПС1–2	ПС2–3	ПС0–1	ПС1–2	ПС2–3
S _a	0,00	24,63	0,00	—	—	—
Π0	-4,36	17,41	-4,36	—	—	—
C1	-9,23	17,46	-4,36	4,87	0,05	0,00
C2	-8,92	13,55	-4,34	4,57	3,86	0,02
C3	-6,18	11,38	-4,30	1,82	6,03	0,06
C4	-4,29	11,52	-5,18	0,07	5,89	0,81
C5	-4,34	14,48	-9,14	0,02	2,93	4,78
C6	-4,36	17,44	-8,88	0,00	0,03	4,51
L1	-9,21	17,46	-4,36	4,86	0,05	0,00
L2	-9,62	11,69	-4,29	5,26	5,72	0,08
L3	-7,59	11,75	-9,01	3,23	5,66	4,65
L4	-4,28	11,70	-9,53	0,07	5,71	5,17
L5	-4,36	17,10	-8,93	0,00	0,31	4,57
Расчётный случай	Деформация, мкм/м			Приращение деформации от временной нагрузки, мкм/м		
	dat12	dat34	dat56	dat12	dat34	dat56
S _a	0	-666	0	—	—	—
Π0	146	-524	146	—	—	—
C1	300	-524	146	154	0	0
C2	291	-443	146	145	81	0
C3	204	-408	146	58	115	0
C4	146	-410	169	0	113	24
C5	146	-466	299	0	57	153
C6	146	-524	290	0	0	144
L1	299	-524	146	153	0	0
L2	316	-410	146	171	113	0
L3	260	-411	301	114	113	155
L4	146	-410	317	0	113	172
L5	146	-519	313	0	5	168
Расчётный случай	Напряжение, МПа			Приращение напряжения от временной нагрузки, МПа		
	dat12	dat34	dat56	dat12	dat34	dat56
S _a	0,00	-22,87	0,00	—	—	—
Π0	4,50	-17,97	4,50	—	—	—
C1	9,26	-17,97	4,50	4,76	0,00	0,00
C2	8,98	-15,20	4,50	4,48	2,77	0,00
C3	6,29	-14,01	4,50	1,79	3,96	0,00
C4	4,50	-14,08	5,23	0,00	3,89	0,73
C5	4,50	-16,00	9,24	0,00	1,97	4,74
C6	4,50	-17,97	8,96	0,00	0,00	4,46
L1	9,24	-17,97	4,50	4,74	0,00	0,00
L2	9,77	-14,08	4,50	5,27	3,89	0,00
L3	8,02	-14,10	9,30	3,52	3,87	4,80
L4	4,50	-14,08	9,80	0,00	3,89	5,30
L5	4,50	-17,81	9,68	0,00	0,16	5,18





ного состояния пролётных строений железнодорожного путепровода с целью сравнения с нормируемым диапазоном в качестве статической нагрузки были применены сцепка (локомотив + вагон) и сплотка (три локомотива).

Данные о перемещении, деформации и напряжении балочных железобетонных пролётных строений путепровода можно использовать в расчётах подобных сооружений на сейсмостойкость, а также в динамических расчётах устойчивости при увеличении эксплуатационной нагрузки на железнодорожные мосты.

Для определения фактического технического состояния конструкций мостов и наиболее эффективной оценки их надёжности, установления соответствия между расчётной схемой и действительной работой сооружений на магистральных линиях Казахстана и России целесообразно осуществлять периодический мониторинг напряжённо-деформированного состояния мостовых сооружений под эксплуатационными нагрузками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рупасова И. В., Кондратов В. В. Нагрузки, принимаемые при проектировании железнодорожных мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. Техника и технологии. — 2012. — № 4. — С. 117–124.
2. Шапошников Н. Н., Римский Р. А., Полторак Г. В., Бабаев В. Б. Применение метода конечных элементов к решению динамических задач // Расчёты на прочность. — 1986. — Вып. 27. — С. 220–237.
3. Шапошников Н. Н., Кашаев С. К., Бабаев В. Б., Долганов А. А. Расчёт конструкций на действие подвижной нагрузки с использованием метода конечных элементов // Строительная механика и расчёт сооружений. — 1986. — № 1. — С. 50–54.
4. Иванченко И. И., Грошев Д. Г. Применение метода конечных элементов для изучения колебаний несущих конструкций при действии подвижных нагрузок / МГУПС (МИИТ). — М., 1999. — Деп. в ВИНТИ 28.05.1999, № 1678-B99. [Электронный ресурс]: <http://tekhnosfera.com/issledovanie-deystviya-podvizhnoy-nagruzki-na-sterzhnevye-i-kombinirovannye-konstruktsii-s-ispolzovaniem-konechnyh-elementov#ixzz5V7blfs00>. Доступ 29.10.2018.
5. Катаев С. К. Применение метода конечных элементов при расчёте конструкций на подвижную нагрузку / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 1984. — 127 с.
6. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. — М., 2011.

7. СНиП 3.06.07-86. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. — М., 1987.

8. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. — М.: Наука, 1977. — 224 с.

9. Agrati S. Estimation of Structural Parameters from Ambient Vibration Test, Master thesis 1994, Danish Technical University. [Электронный ресурс]: <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniyastalezhelezobetonnyh-proletnyh-roeniyzheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskimpam#ixzz3TzXl0SO0>. Доступ 29.10.2018.

10. Aktan A. E. Issues in Instrumented Bridge Health Monitoring, IABSE Symposium San Francisco 1995. [Электронный ресурс]: <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogosostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniyzheleznodorozhnyh-mostov-pod-dinamicheskimpam#ixzz3TzWd5HBE>. Доступ 29.10.2018.

11. Aktan A. E., Lee K. L., Chuntavan C., Aksel T. Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities. Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference, 1994, pp. 462–468.

12. COSMOSM user manual version 1.75. Santa Monica, CA: Structural Research and Analysis Corporation. 1996. [Электронный ресурс]: <http://tekhnosfera.com/otsenkatehnicheskogo-sostoyaniyastalezhelezobetonnyhproletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-podinamicheskimpam#ixzz3TzWoNuNY>. Доступ 29.10.2018.

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

14. Квашнин М. Я., Буромбаев С. А., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Влияние вибродинамического воздействия локомотивов с высокими осевыми нагрузками на железнодорожный путь и балочные железобетонные пролётные строения мостов // Труды XII международной научно-техн. конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». — М.: МИИТ, 2015. — С. 163–166.

15. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Рыстыгулов П. А., Кыстаубаев С. Б. Экспериментальные исследования конструкций железнодорожных мостов, усиленных композитным материалом // Труды 16-й научно-практ. конференции «Безопасность движения поездов». — М.: МИИТ, 2015. — Т. II. — С. 43–47.

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

17. Бондарь И. С. Влияние подвижной нагрузки на деформации пролётного строения железнодорожного моста // Инженерные сооружения на транспорте: Сб. трудов. — М.: МИИТ, 2016. — Вып. 7. — С. 64–67.

18. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Мониторинг воздействия подвижного состава на балочные пролётные строения железнодорожных мостов // Транспортная наука и инновации: Материалы Международной научно-практ. конференции. — Алматы: КазАТК, 2015. — С. 275–279. ●

Координаты авторов: **Бондарь И. С.** – ivan_sergeevich_08@mail.ru,
Буромбаев С. А. – sultan_burombaev@mail.ru, **Алдекеева Д. Т.** – aldekeeva_69@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018, принята к публикации 06.12.2018.