

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ  
УДК 624.21:620.178  
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-3>

## Методики обработки экспериментальных данных мониторинга состояния мостовых конструкций



Николай КВАШНИН



Иван БОНДАРЬ



Михаил КВАШНИН

*Николай Михайлович Квашнин<sup>1</sup>, Иван Сергеевич Бондарь<sup>2</sup>, Михаил Яковлевич Квашнин<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ФГУП «ЗащитаИнфоТранс», Москва, Россия.

<sup>2</sup> Международная Образовательная Корпорация, Алматы, Казахстан.

<sup>3</sup> Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан.

✉ <sup>2</sup> [ivan\\_sergeevich\\_08@mail.ru](mailto:ivan_sergeevich_08@mail.ru).

### АННОТАЦИЯ

Надёжность искусственных сооружений транспортной отрасли и пропуск подвижного состава с установленными скоростями должны обеспечиваться необходимой и достаточной несущей способностью, прочностью, жёсткостью и устойчивостью искусственных сооружений.

Целью данной работы являлось обоснование возможности применения широко известных методов контроля напряжённо-деформированного состояния конструкций в автоматизированных системах мониторинга технического состояния пролётных строений мостов.

Это особенно важно применительно к эксплуатации искусственных сооружений транспортной отрасли, спроектированных по нормам первой половины XX века.

В этих условиях экспериментальное определение напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций мостов становится важнейшей составляющей задачи комплексной оценки физического износа и эксплуатационной надёжности сооружения. Мониторинг технического состояния мостов и планирование на этой основе своевременных мероприятий по ремонту, усилению или реконструкции пролётных строений позволяют продлить срок их службы и обеспечить безопасность при эксплуатации.

**Ключевые слова:** транспорт, инфраструктура, искусственные сооружения, мост, пролётное строение, прогиб, напряжение, деформация, мониторинг.

Поскольку для обеспечения плавности движения транспортных средств необходимо контролировать горизонтальные продольные и поперечные перемещения верха опор мостов, а также их вертикальные осадки, выявлены предельно допустимые прогибы пролётных строений от вертикальной временной подвижной нагрузки.

В настоящей работе приведены методики интерпретации данных, измеренных инклинометрами и электрическими тензодатчиками, с целью их использования в автоматизированной системе мониторинга технического состояния железнодорожных мостов. Подробно изложен метод тензометрии в предложенных вариантах установки тензорезисторов на конструкции для измерения напряжений растяжения–сжатия и продольных усилий от временной вертикальной нагрузки.

Мониторинг технического состояния мостовых конструкций с применением предлагаемых авторами в данной статье методик измерений прогибов и деформаций позволит оценить изменение несущей способности сооружения за весь период эксплуатации.

В исследовании использовались нормативные документы и практический опыт Российской Федерации и Республики Казахстан.

*Для цитирования:* Квашнин Н. М., Бондарь И. С., Квашнин М. Я. Методики обработки экспериментальных данных мониторинга состояния мостовых конструкций // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 4 (95). С. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с действующими во многих странах, в том числе в Российской Федерации, правилами и нормами надёжность искусственных сооружений транспортной отрасли и пропуск подвижных нагрузок с установленными скоростями должны обеспечиваться необходимой и достаточной несущей способностью, прочностью, жёсткостью и устойчивостью в течение всего периода эксплуатации.

Длительная эксплуатация искусственных сооружений транспортной отрасли, спроектированных по нормам первой половины XX века на расчётные подвижные нагрузки того периода, привела к появлению дефектов и неисправностей, влияющих на условия пропуска поездов по пролётным строениям мостов и скорости движения подвижного состава. В связи с этим экспериментальное определение напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций мостов становится важнейшей составляющей задачи комплексной оценки физического износа и эксплуатационной надёжности сооружения. Мониторинг технического состояния мостов, возведённых по старым нормам проектирования, и своевременные мероприятия по ремонту, усилению или реконструкции пролётных строений позволят продлить срок их службы и обеспечить безопасность при эксплуатации.

В сводах правил по проектированию мостовых сооружений с целью обеспечения плавности движения транспортных средств установлены предельно допустимые прогибы пролётных строений от подвижной временной вертикальной нагрузки. При проведении мониторинга необходимо контролировать горизонтальные продольные и поперечные перемещения верха опор мостов, а также их вертикальные осадки.

В данное время для мониторинга технического состояния пролётных строений больших и уникальных железнодорожных мостов существует несколько методик.

Целью данной работы являлось обоснование возможности применения широко известных методов контроля напряжённо-деформированного состояния конструкций в автоматизированных системах мониторинга технического состояния пролётных строений мостов.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

При разработке автоматизированных систем мониторинга рекомендуется использовать электронные прогибомеры, инклинометры с электрическим выходным сигналом. Для измерения деформаций (напряжений) применяют электрические тензометры сопротивления – тензодатчики или тензорезисторы. Прогибы пролётных строений мостов под нагрузкой определяют с помощью геодезических инструментов, механических и электронных прогибомеров с проволочной связью, а также инклинометров – датчиков крена и угловых перемещений. В настоящее время инклинометры с электрическим выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика, являются сравнительно новыми приборами, доведёнными до широкого промышленного применения [1, с. 20].

Применение механических и электронных прогибомеров с проволочной связью при испытаниях путепроводов и эстакад позволяет значительно повысить точность и упростить процесс измерения прогибов по сравнению с геодезическими измерениями. Однако необходимость иметь жёсткую связь с землёй, так называемой «мёртвой точкой», относительно которой происходят измерения, делает невозможным их использование для измерения прогибов пролётных строений мостов, расположенных над водными преградами [1, с. 20].

В последние годы, при длительных измерениях (мониторинге) величин прогибов пролётных строений мостов также расширилась возможность использования датчиков крена и угловых перемещений – инклинометров.

Анализ напряжённого состояния элементов натуральных конструкций, как правило, реализуется на основе измерения деформаций на поверхностях объектов исследования. Среди экспериментальных методов измерения деформаций (механический, акустический, электрический, оптический, методы муара, сеток и др.) подавляющее большинство исследователей отдаёт предпочтение измерениям с применением электрических тензометров сопротивления – тензодатчиков или тензорезисторов [2, с. 13]. Тензорезистор наилучшим образом удовлетворяет критерию «стоимость–эффективность», обладая оптимальным сочетанием характеристик, традиционно применяемых для оценки тензометри-



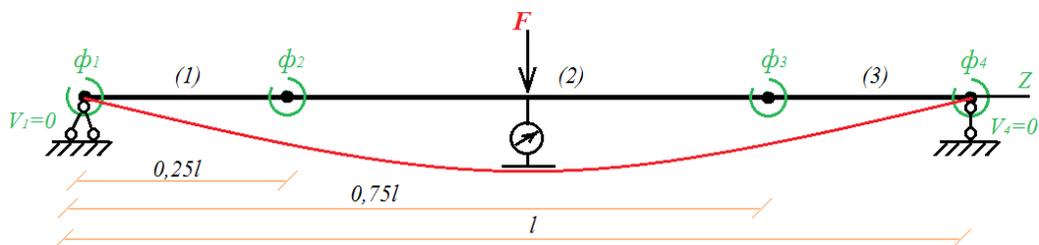


Рис. 1. Расчётная схема пролётного строения (Отчёт об опытно-конструкторской работе по теме «Создание системы мониторинга потенциально опасных объектов железнодорожного транспорта с использованием систем ГЛОНАСС/GPS/GALILEO». – М.: ФГУП «ЗащитаИнфоТранс», 2020. – 154 с.).

ческой системы. Такими характеристиками являются:

- градуировочная константа датчика, которая должна обладать температурной и временной стабильностью;
- погрешность измерения деформаций, которая не должна превышать 1 мкм/м в диапазоне деформаций ±5 % (±50 000 мкм/м);
- длина и ширина датчика, которые должны быть достаточно малы для адекватного измерения деформации в точке;
- инерционность датчика, которая должна быть достаточно мала для регистрации высокочастотных динамических процессов;
- линейность отклика датчика в пределах всего диапазона измерений;
- экономичность датчика и сопряжённых с ним устройств;
- минимальные требования к квалификации обслуживающего персонала, необходимой для установки и проведения измерений [2, с. 13].

В настоящее время тензорезисторы применяются в более чем 80 % исследований напряжённого состояния проводимых в промышленности США, Японии и других развитых стран. Кроме того, тензорезисторы широко распространены в качестве чувствительных элементов датчиков, разработанных для измерения сил, моментов и давления [2, с. 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Методика интерпретации данных, измеренных инклинометрами

Известно, что максимальный прогиб конструкции пролётного строения моста (в середине пролёта) не должен превышать предельной величины:

$$f_{max} \leq f_u, \quad (1)$$

где  $f_u$  – предельная величина прогиба, нормируемая, например, в Российской Федерации и Республике Казахстан, соответственно

п. 5.43 СП 35.13330.2011<sup>1</sup> и п. 5.6.1 СП РК 3.03-112-2013<sup>2</sup>.

Согласно требованиям п. 5.43 СП 35.13330.2011 и п. 5.6.1 СП РК 3.03-112-2013 вертикальные упругие прогибы пролётных строений, вычисленные при действии подвижной временной вертикальной нагрузки, для железнодорожных мостов не должны превышать значений:

$$\frac{1}{800 - 1,25 \cdot l} \cdot l, \quad (2)$$

но не более  $\frac{1}{600} \cdot l,$

где  $l$  – расчётная длина пролёта, м.

Для пролётного строения железнодорожного моста  $l = 126$  м, предельная величина прогиба, нормируемая п. 5.43 СП 35.13330.2011 и п. 5.6.1 СП РК 3.03-112-2013, составляет:

$$\frac{1}{800 - 1,25 \cdot 126} \cdot 126 = 0,196 \text{ м.}$$

При определении прогиба конструкций прямым методом, методом измерения вертикального перемещения в центральной части пролёта необходимо закрепить датчик перемещения на неподвижной опоре. В большинстве случаев, в особенности при больших пролётах, это сделать невозможно. На практике преимущественно применяются косвенные методы измерения величин, по которым вычисляют прогибы конструкции. В этом случае прогиб предлагается определять косвенно, через измеренные значения углов поворота узлов конструкции.

<sup>1</sup> СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849>. Доступ 24.05.2021.

<sup>2</sup> СП РК 3.03-112-2013. Мосты и трубы. Астана, 2013. [Электронный ресурс]: <https://www.egfntd.kz/upload/NTD/%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A/113%20%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A%203.03-112-2013.pdf>. Доступ 24.05.2021.

Таблица 1

№ п/п	Z <sub>2</sub> , мм	Z <sub>3</sub> , мм	α <sub>инт2</sub> , угл. сек	α <sub>инт1</sub> , угл. сек	φ <sub>2</sub> , радиан	φ <sub>3</sub> , радиан	v(l/2), мм
1	31500	94500	-18	-18	-8,722•10 <sup>-5</sup>	-8,722•10 <sup>-5</sup>	-3,14
2	31500	94500	-360	-360	-1,744•10 <sup>-3</sup>	-1,744•10 <sup>-3</sup>	-62,80
3	31500	94500	-1152	-1152	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-200,96
4	31500	94500	-1152	-1152	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-25,63
5	31500	94500	-1152	-1152	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-197,23
6	31500	94500	-1152	-1152	-5,582•10 <sup>-3</sup>	-5,582•10 <sup>-3</sup>	200,96
7	31500	94500	-1152	-1152	-4,846•10 <sup>-3</sup>	-5,330•10 <sup>-3</sup>	162,45

В случае определения прогиба косвенным методом через измеренные значения углов наклона узлов конструкции, неизвестную функцию прогибов по длине балки можно определить, используя методы сопротивления материалов [2, с. 28], рассматривая дифференциальную зависимость прогиба от угла поворота:

$$dv/dz = \varphi(z). \tag{3}$$

Предлагаемая методика определения прогибов через углы наклона применима для балочных элементов с одним пролётом и двумя шарнирными опорами (рис. 1).

В качестве граничных условий приняты прогибы балки над опорами, равные нулю. Метод даёт наибольшую сходимости в случае, когда места измерения углов поворота находятся на расстоянии от опор, равном 25 % пролёта. Недостатком метода являются ограничения, накладываемые на места закрепления датчиков измерения углов поворота. Достоинствами являются высокая степень сходимости (отклонение не более 5 %) и использование малого количества датчиков измерения углов поворота. В данном методе принимается, что функцию прогибов балочного элемента с одним пролётом достаточно описать полиномом третьего порядка с четырьмя неизвестными коэффициентами:

$$v(z) = az^3 + bz^2 + cz + d. \tag{4}$$

Из дифференциальной зависимости (3) функция углов поворота определяется выражением вида:

$$\varphi(z) = 3az^2 + 2bz + c. \tag{5}$$

Для нахождения значений неизвестных коэффициентов требуется решение системы из четырёх уравнений:

$$\begin{cases} v(z_1) = az_1^3 + bz_1^2 + cz_1 + d \\ v(z_4) = az_4^3 + bz_4^2 + cz_4 + d \\ \varphi_2 = \varphi(z_2) = 3az_2^2 + 2bz_2 + c \\ \varphi_3 = \varphi(z_3) = 3az_3^2 + 2bz_3 + c. \end{cases} \tag{6}$$

После решения системы уравнений (6) значения прогибов балки вычисляются по зависимости (4).

Решая систему уравнений (6), для нахождения неизвестных коэффициентов воспользуемся граничными условиями (рис. 1)  $v(z_1) = 0; v(z_4) = 0; z_1 = 0; z_4 = l$  (граничные условия  $z_2 = 1/4 \cdot l$  и  $z_3 = 3/4 \cdot l$  использовать не будем, так как возможны некоторые отклонения при установке измерителей углов поворота). Решая систему уравнений (6) при данных граничных условиях, получаем следующие выражения для неизвестных коэффициентов:

$$\begin{aligned} d &= 0; \\ a &= \frac{\varphi_3(2z_2 - l) + \varphi_2(l + 2z_3)}{3(z_3^2 - z_2^2)(2z_2 - l) + 2(l^2 - 3z_2^2)(z_3 + z_2)}; \\ b &= \frac{[\varphi_3(2z_2 - l) + \varphi_2(l + 2z_3)](l^2 - 3z_2^2)}{[3(z_3^2 - z_2^2)(2z_2 - l) + 2(l^2 - 3z_2^2)(z_3 + z_2)](2z_2 - l)} + \frac{\varphi_2}{(2z_2 - l)}; \\ c &= \frac{\varphi_2(4z_2 - l)}{(2z_2 - l)} - \frac{[\varphi_3(2z_2 - l) + \varphi_2(l + 2z_3)](l^2 - 3z_2^2)}{[3(z_3^2 - z_2^2)(2z_2 - l) + 2(l^2 - 3z_2^2)(z_3 + z_2)](2z_2 - l)}. \end{aligned} \tag{7}$$

Подставляя значения коэффициентов (7) в формулу (4), получаем следующее выражение для определения прогиба в середине пролёта:

$$\begin{aligned} v(l/2) &= \frac{l^2(18z_2^2 - 14z_2l + l^2) \left[ \varphi_3(2z_2 - l) + \varphi_2(l + 2z_3) \right]}{(24(z_3^2 - z_2^2)(2z_2 - l)^2 + 16(l^2 - 3z_2^2)(z_3 + z_2)(2z_2 - l))} + \\ &+ \frac{\varphi_2 l(16z_2 - 3l)}{4(2z_2 - l)}. \end{aligned} \tag{8}$$



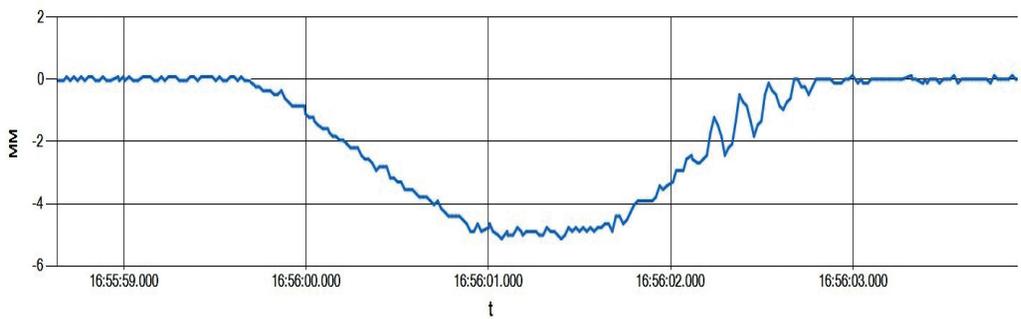


Рис. 2. Пример диаграммы прогиба разрезного пролётного строения (Технический отчёт. Обследование и испытание железнодорожного путепровода по схеме 16,5+23,6+16,5м через автомобильную дорогу II категории на км 56 ПК9+50 железнодорожной линии Кульсары–Тенгиз. Алматы: АО «КазАТК им. М. Тынышпаева». – 2018. – С. 126).

Таблица 2

**Пороговые значения контролируемых прогибов в терминах «норма/тревога/авария»**

№ п/п	Наименование показателя	$f_{max}$ , мм	$K = f_{max}/f_u$
1	Пороговое значение границы «норма»/»тревога»	0...137,2	0...0,7
2	Пороговое значение границы «тревога»/»авария»	137,2...196	0,7...1

\* Приведённые численные значения уточняются по результатам накопления и статистического анализа измеренных в процессе проведения мониторинга прогибов середины пролётного строения, возникающих под реально обещающей подвижной нагрузкой.

Для рассматриваемого пролётного строения железнодорожного моста  $l = 126$  м. Величины  $z_2$  и  $z_3$  измеряются после установки измерителей углов наклона на конструкции пролётного строения. Также необходимо отметить, что в выражение (8) подставляются измеренные инклинометрами значения углов поворота  $\varphi$  в радианах:

$$\varphi = \frac{\pi \alpha_{инн}}{3600 \cdot 180}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{инн}$  – значение угла поворота по показаниям инклинометра ИН-ДЗц-3600 в угловых секундах.

Некоторые значения прогибов, рассчитанные по выражению (8) при различных значениях начальных и измеряемых параметрах, приведены в табл. 1.

При проведении опытной эксплуатации системы мониторинга в программном обеспечении целесообразно предусмотреть модуль визуализации измеренных данных [3–7]. Визуализацию данных, полученных с инклинометров, целесообразно выполнять путём построения диаграмм прогибов пролётного строения моста при движении подвижного состава. Пример диаграммы прогиба разрезного пролётного строения приведён на рис. 2 [8–10].

Оценку работы конструкций сооружения по фактически измеренным значениям про-

гиба при каждом прохождении подвижного состава по мосту рекомендуется выполнять в соответствии с приложением В СП 79.13330.2012<sup>3</sup> и с приложением Г СП РК 3.03-113-2014<sup>4</sup> с помощью коэффициента, вычисляемого по формуле:

$$K = f_{max}/f_u \quad (10)$$

где  $f_{max}$  – максимальное значение прогиба в середине пролёта, определённое согласно выражению (8);

$f_u$  – предельная величина прогиба, нормируемая п. 5.43 СП 35.13330.2011 и п. 5.6.1 СП РК 3.03-112-2013.

Значения коэффициента  $K$ , больше единицы, вычисленные по величинам максимальных прогибов, однозначно указывают на существенное отличие работы элементов сооружения от принятых в расчётах предпосылок (элементы сооружения не работают в упругих пределах). В этих случаях необходимо срочно разрабатывать меры по обеспечению надёж-

<sup>3</sup> СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07.-86. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095530>. Доступ 24.05.2021.

<sup>4</sup> СП РК 3.03-113-2014. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Астана, 2014. [Электронный ресурс]: <https://www.egfntd.kz/upload/NTD/%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A/114%20%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A%203.03-113-2014+.pdf>. Доступ 24.05.2021.

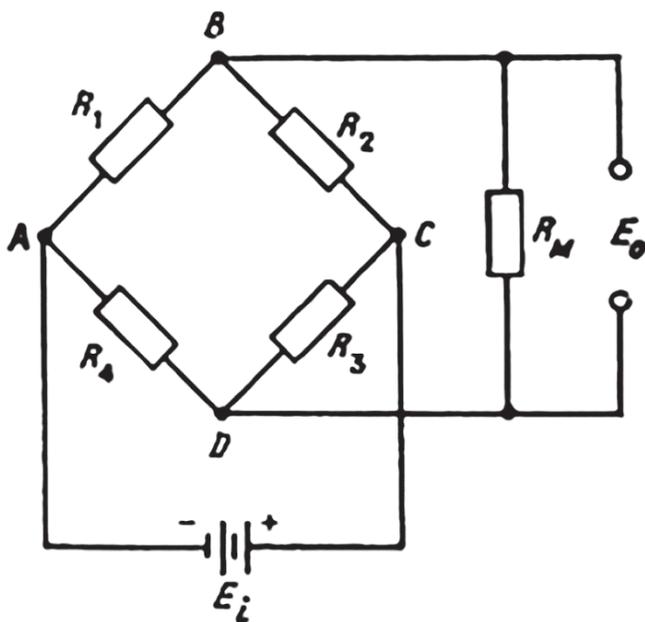


Рис. 3. Мост Уитстона с источником постоянного напряжения [2, с. 38].

ной работы элементов. На период опытной эксплуатации рекомендуется принять пороговые значения контролируемых прогибов в терминах «норма/тревога/авария», приведённые в табл. 2.

### Методика интерпретации данных, измеренных тензометрами

Согласно требованиям п. 6.9, 6.18 СП 79.13330.2012<sup>3</sup> и п. 7.2.6, 7.3.6 СП РК 3.03-113-2014<sup>4</sup>, усилия (силы, моменты) в частях и элементах конструкций железнодорожных эксплуатируемых мостов от подвижной временной вертикальной нагрузки при динамических испытаниях (при прохождении подвижного состава) не должны превышать усилий от временной вертикальной нагрузки, определённой расчётным путём по действующим нормативным документам.

Для определения усилий от подвижной временной вертикальной нагрузки, возникающих при прохождении подвижного состава, необходимо измерить деформации, а затем, используя закон деформирования для рассматриваемого материала, вычислить напряжения и усилия. Деформации измеряются тензорезисторами, которые легко закрепить на поверхности материала конструкции.

Тензорезисторы – сложные электрические устройства, позволяющие измерять деформации. Так как диапазон измерения сопротив-

ления тензорезистора очень мал, он достигает для 120 Ом датчика около 0,00024 Ом на деформацию 1 мкм/м. Значит, деформация 1000 мкм/м поменяет сопротивление 120 Ом датчика на 0,240 Ом. Для того чтобы измерить такие маленькие напряжения, в измерительных приборах чаще всего используют мостовые схемы. Данные схемы работают от источника постоянного тока либо напряжений.

На рис. 3 приведена схема работы измерительного моста, запитанного от источника постоянного напряжения (моста Уитстона). Мост Уитстона изображён равносторонним ромбом, в котором стороны – плечи, а вершины – узлы моста. Источник напряжения и четыре тензорезистора ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ) образуют мост.  $R_M$ -резистор позволяет электрическому току протекать через мост без затрат энергии.

Выходное напряжение  $E_0$  измерительного моста (разность напряжений точек  $B$  и  $D$ ) определяется соотношением [3, с. 211]:

$$E_0 = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot E_i. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что  $E_0 = 0$ , если выполняется условие:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ или } R_1/R_2 = R_4/R_3. \quad (12)$$

При соблюдении равенства (12) мост называется сбалансированным. Это означает, что малое напряжение разбаланса, вызванное



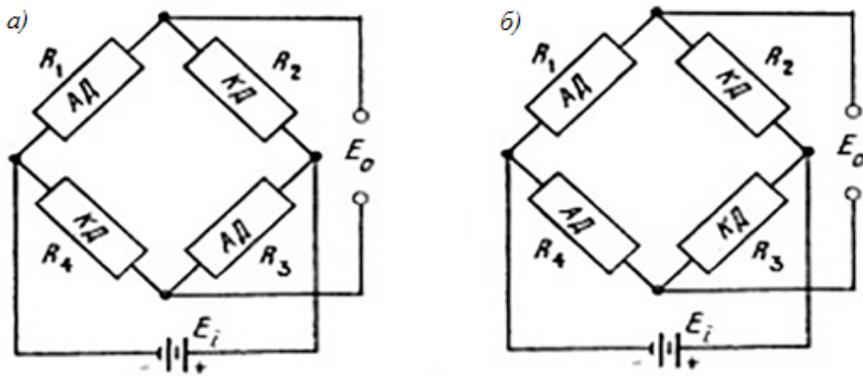


Рис. 4. Варианты включения тензодатчиков в полный мост при измерении деформаций [2, с. 56]. АД – активный датчик; КД – компенсационный датчик. а) для измерения деформаций растяжения–сжатия  $\epsilon N$ ; б) для измерения деформаций изгиба  $\epsilon M$ .

изменением сопротивления, измеряется относительно нулевого или почти нулевого уровня. Этот сигнал легко может быть усилен до высокого уровня для последующей регистрации.

Выходное напряжение  $E_0$  возникает при изменении сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4$  на величины  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ . Такие изменения сопротивления возникают, например, вследствие деформации или температурных расширений тензорезисторов. В соответствии с уравнением (11) изменение выходного напряжения  $E_0$ , вызванное указанными малыми изменениями сопротивления, составляет [2, с. 42]:

$$E_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1-\eta) \cdot E_i, \quad (13)$$

где  $\eta$  – член, характеризующий погрешность (нелинейность моста), описываемый соотношением:

$$\eta = \frac{1}{\left( \frac{1+(1+r)}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + r \left( \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)} \right)}, \quad (14)$$

где  $r$  – отношение сопротивлений  $R_2/R_1$  или  $R_3/R_4$ .

Из выражений (13) и (14) следуют важные для практических приложений свойства измерительного моста:

- деформации, действующие на тензорезисторы противоположных плеч моста, суммируются в пределах измерительного моста;
- деформации, действующие на тензорезисторы смежных плеч моста, вычитаются в пределах измерительного моста;
- погрешность моста  $\eta$  (нелинейность) пропорциональна алгебраической сумме всех

деформаций, воспринимаемых тензорезисторами в пределах измерительного моста [2, с. 43].

Для простого случая присутствуют равенства всех четырёх сопротивлений (то есть,  $r = 1$ ). Как легко увидеть из выражений (13) и (14), член, соответствующий погрешности  $\eta$ , обращается в ноль, когда  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_4$  равны по величине и противоположны по знаку при  $\Delta R_2 = \Delta R_3 = 0$ , а также когда  $\Delta R_2$  и  $\Delta R_3$  равны по величине и противоположны по знаку при  $\Delta R_1 = \Delta R_4 = 0$ . Этот результат имеет важное значение, так как нелинейное функционирование моста не существенно, когда используются одновременно два активных датчика в противоположных плечах  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_4$  или  $\Delta R_2$  и  $\Delta R_3$ . При одном активном датчике нелинейность приводит к погрешности 1 %, если  $\Delta R_1/R_1$  меньше 0,02 (величина, обычно соответствующая деформации 10000 мкм/м) [2, с. 43].

Влияние нагрузочного резистора  $R_M$  на величину идеального выходного напряжения  $E_0$  может быть определено путём анализа сопротивления нагрузки, последовательно подключённой к мосту. Результат выражается в виде:

$$E_{01} = \frac{R_M}{R_M + R_B} \cdot E_0 = \frac{E_0}{\left( \frac{1+R_B}{R_M} \right)}, \quad (15)$$

где  $E_{01}$  – фактическое выходное напряжение, а величина представляет собой эффективное сопротивление моста [2, с. 43]:

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)}. \quad (16)$$

Как следует из уравнения (16), если все плечи моста имеют одинаковое сопротивление  $R_g$ , то  $R_B = R_g$ . Таким образом, при  $R_M > 100 R_g$  для моста с одинаковыми плечами

погрешность не превышает 1 %. Это условие легко реализуется при использовании большинства серийных измерительных приборов, поскольку  $R_M$  обычно превышает  $100 R_g$ . Следует отметить, что рассмотренное влияние нагрузки может быть учтено соответствующей методикой градуировки [2, с. 43].

На рис. 4 показаны схемы включения тензодатчиков в измерительный мост по полномостовой схеме при использовании двух активных и компенсационных датчиков в четырёх плечах моста, используемых в практике измерения деформаций конструкций. В этом случае активные датчики наклеиваются на конструкцию диаметрально противоположно (то же относится и к компенсационным датчикам).

Вариант *a* используется для измерения деформаций растяжения–сжатия  $\epsilon_M$ , возникающих в конструкции главной балки пролётно-го строения моста при прохождении подвижного состава. Вариант *b* использовался при определении чувствительности измерительной системы к деформациям изгиба  $\epsilon_M$ . Следует отметить, что с точки зрения чувствительности выходного напряжения, возникающего на измерительном мосту при деформировании, варианты *a* и *b* абсолютно эквивалентны друг другу, что следует из анализа выражения (13).

В данных вариантах включения тензодатчиков в измерительный мост используются тензорезисторы, имеющие равное сопротивление (из одной партии), так что  $r$  равно 1. Основные преимущества данного варианта исполнения моста – температурная компенсация, линейность (если все приращения  $\Delta R$  одинаковы по величине) и возможность конструирования измерительных схем, лишённых нежелательной чувствительности к изгибающему или осевому нагружению.

Так как тензометрическая схема используется для измерения весьма малых изменений сопротивления, происходящих в мостовом датчике, то любое воздействие, способное изменить сопротивление различных компонентов моста, имеет существенное значение, поскольку оно воздействует на величину выходного напряжения. Основными компонентами измерительной схемы являются датчики деформаций (тензорезисторы), соединительные провода и места соединений (как паянных, так и клеммовых). Хотя соединения пайкой, контакты и клеммы способны вносить существенные погрешности, соот-

ветствующие проблемы могут быть решены путём их минимизации и соответствующей методикой градуировки.

Более сложная проблема связана с электрическим шумом. Электрический шум, наводимый на измерительном мосту и линиях передачи сигнала магнитными полями от линии энергоснабжения, может представлять серьёзную проблему. Величина напряжения, наведённого в линиях передачи сигнала током, протекающим в линии электроснабжения, пропорциональна площади витка, образованного линиями, и обратно пропорциональна расстояниям между линиями. Для уменьшения шума необходимо применять следующие меры предосторожности [2, с. 66]:

1. Для уменьшения площади витка надо применять только скрученные проводники. В скрученных соединительных проводах наводимый шум практически одинаков в обоих проводах, что ведёт к существенному ослаблению синфазного шума. Длина проводников должна быть сокращена до минимума путём размещения дифференциального усилителя вблизи моста тензодатчиков. Проводники с избыточной длиной не должны образовывать витков во избежание появления индуктивности [2, с. 66].

2. Следует использовать только экранированные кабели. Экран должен быть подключён к отрицательному полюсу источника питания. В этом случае не возникают токи, протекающие от «земли», и экран сохраняет потенциал близкий к нулю. Источник питания не должен соединяться с «землёй» устройства во избежание возникновения витков заземления в источнике питания [2, с. 66].

3. Надо применять только дифференциальные усилители с эффективным подавлением помех общего вида [2, с. 66].

Система для измерения деформаций обычно включает один или более тензодатчиков, резисторы, дополняющие схему до мостовой, балластные резисторы моста, один или более источников питания, усилитель и регистрирующие устройства. Каждый из перечисленных элементов вносит свой вклад в результирующую чувствительность, поэтому градуировка (калибровка) всей системы предпочтительнее, чем дорогостоящая градуировка каждого её компонента [2, с. 66].

Показания регистрирующего устройства  $d_r$  связаны с деформацией в каждом плече моста следующим соотношением [2, с. 66]:



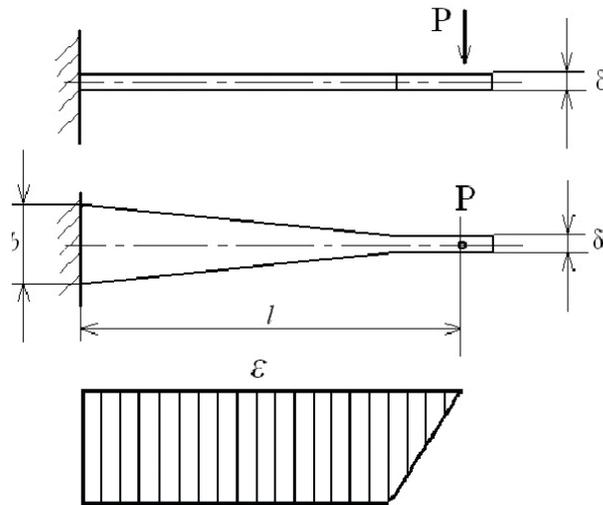
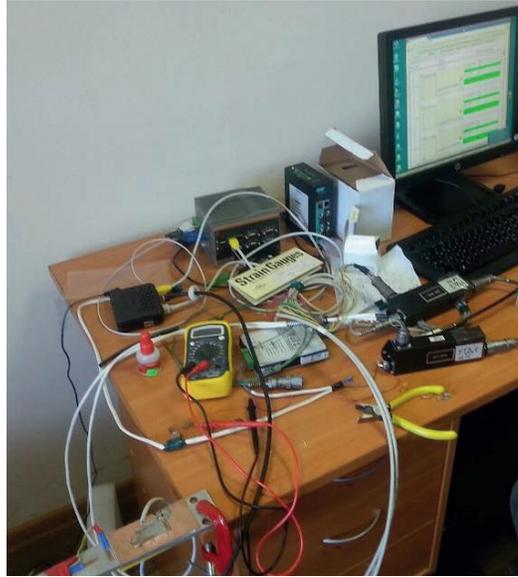


Рис. 5. Схема тарировочной балки равного сопротивления<sup>5</sup>.

$$d_r = \frac{rGEi(1-\eta)S_g}{(1+r)^2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = S_R \varepsilon_B, \quad (17)$$

где  $r$  – отношение сопротивлений  $R_2/R_1$  или  $R_3/R_4$ ;

$G$  – коэффициент усиления усилителя и регистрирующего устройства;

$E_i$  – напряжение питания моста;

$\eta$  – нелинейный член;

$S_g$  – коэффициент тензочувствительности, или чувствительность тензорезистора, – паспортный параметр тензорезистора, отражающий поведение системы «решетка/основа/клей» – определяется как отношение приращения сопротивления наклеенного тензорезистора к относительной деформации образца, измеренной в направлении оси тензорезистора:

$$S_g = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_i$  – деформация в  $i$ -м плече моста;

$S_R$  – общая чувствительность системы;

$\varepsilon_B$  – эффективная деформация, измеренная прибором.

<sup>5</sup> Отчёт об опытно-конструкторской работе по теме «Создание системы мониторинга потенциально опасных объектов железнодорожного транспорта с использованием систем ГЛОНАСС/GPS/GALILEO». – М.: ФГУП «ЗащитаИнфоТранс», 2020. – 154 с.

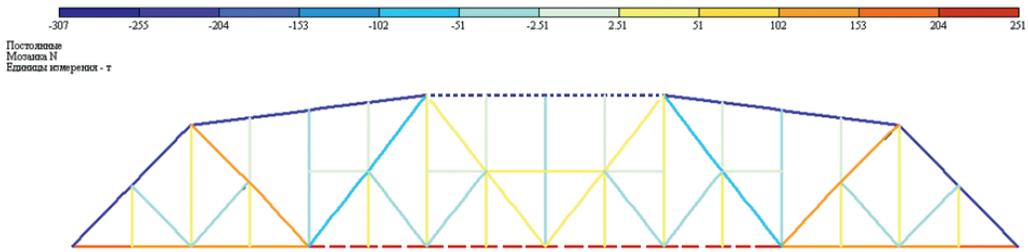


Рис. 6. Мозаика продольных усилий в элементах главной фермы пролетного строения ПС 2, под действием постоянной нагрузки  $N_n$  (собственный вес конструкций и вес проезжей части по справочнику). Синим точечным пунктиром (-307 – -255) обозначены сжимающие усилия, внизу красным штриховым пунктиром (204–251) – растягивающие<sup>6</sup>.

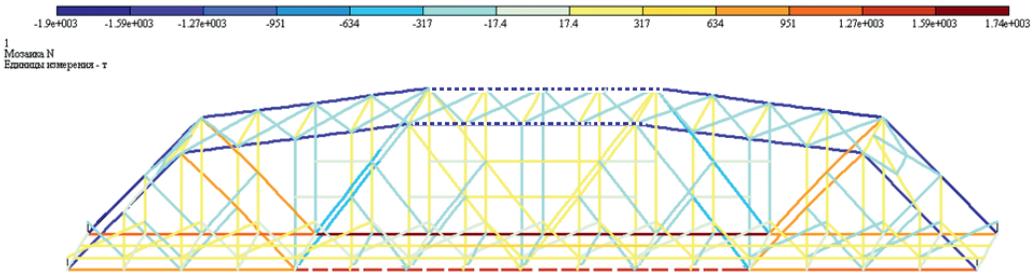


Рис. 7. Мозаика продольных усилий в элементах пролетного строения моста от действия сочетания постоянной нагрузки и временной вертикальной нагрузок ( $N_B + N_n$ ). Синим точечным пунктиром сверху (-307 – -255) обозначены сжимающие усилия, внизу красным штриховым пунктиром (204–251) – растягивающие<sup>6</sup>.

Эффективная деформация  $\varepsilon_B$  выражается следующим образом:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = n_\varepsilon, \quad (19)$$

где  $n = 1$  для одного активного датчика (АД),  $n = 2$  для двух АД.

Чувствительность измерительной системы, применённой в опытном образце системы мониторинга, определялась механическим методом градуировки (калибровки). Градуировка осуществлялась следующим образом: на вход измерительной системы подавались заранее известные значения деформации, а на выходе фиксировались реакции системы на эти воздействия.

Источником эталонной деформации служила тарированная консольная балка равного сопротивления (рис. 5). Тензорезисторы приклеивались на балку равного сопротивления по схеме  $b$  рис. 4, соединительные провода (длина, тип и т.п.) соответствовали используемым при измерениях на конструкциях моста [11–12].

Величина деформации балки равного сопротивления определялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{6Pl}{E\delta^2b}, \quad (20)$$

где  $P$  – действующая на конец консоли сосредоточенная сила;

$l$  – расстояние от точки приложения силы  $P$  до любого произвольного сечения;

$b$  – ширина сечения в заделке;

$\delta$  – толщина балки;

$E$  – модуль упругости материала балки.

Коэффициент тензочувствительности для используемой партии тензорезисторов  $S_g = 2,09$  задавался в базовых настройках регистрирующего устройства. После подключения мостовой схемы к модулю проводились балансировка измерительного моста, установка индикатора прибора в нулевое положение. Нагрузка создавалась грузами, которые накладывались на гиревой подвес, надетый на свободный конец балки. Грузы подбирались так, чтобы эталонные деформации, вычисленные по формуле (20), составляли величины 100, 200, 500, 1000 мкм/м. Коэффициент пропорциональности (цена деления шкалы измерительного прибора) для калибруемой измерительной системы определялся по формуле:

$$K_{\Pi} = \varepsilon_{\text{кал}}/d_r. \quad (21)$$

При проведении калибровки установлено, что система имеет линейный коэффициент общей чувствительности в диапазоне измерения деформаций от 100 до 1000 мкм/м, в данном диапазоне коэффициент пропорциональности  $K_{\Pi} = 2000$ .



## Пороговые значения контролируемых прогибов в терминах «норма/тревога/авария»

№ п/п	Наименование показателя	N, т	$K = N_{max}/N_{pac}$
1	Пороговое значение границы «норма»/»тревога»	0...1190	0...0,8
2	Пороговое значение границы «тревога»/»авария»	1190...1489	0,7...1

\* Приведённые численные значения уточняются по результатам накопления и статистического анализа измеренных в процессе проведения мониторинга продольных усилий возникающих под реально обещаемой подвижной нагрузкой.

При запуске системы контроля деформаций на объекте контроля проводится балансировка установленных измерительных мостов для каждого используемого модуля (установка индикаторов приборов в нулевое положение). Расчёт величины измеренных деформаций растяжения–сжатия  $\varepsilon_N$ , возникающих при прохождении подвижного состава от временной вертикальной нагрузки, в процессе мониторинга выполняется по следующей формуле:

$$\varepsilon_N = d_r \cdot K_{II} = 2000 d_r f \varepsilon_N] = [\text{мкмк/м}]. \quad (22)$$

Расчёт напряжений растяжения–сжатия  $\sigma_N$ , возникающих при прохождении подвижного состава от временной вертикальной нагрузки, выполняется по измеренным таким образом величинам деформаций  $\varepsilon_N$  согласно закону Гука:

$$\sigma_N = \frac{\varepsilon_N E}{1000000}, [\sigma_N] = [\text{МПа}], \quad (23)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала конструкции  $[E] = [\text{МПа}]$ .

Модуль упругости при расчёте напряжений по формуле (23) принят равным 206000 МПа, согласно нормативным данным таблицы 8.13 СП 35.13330.2011<sup>1</sup>.

Расчёт продольных усилий  $N$ , возникающих в элементах конструкции главной балки нижнего пояса фермы пролётного строения моста при прохождении подвижного состава от временной вертикальной нагрузки, выполняется по вычисленным величинам напряжений  $\sigma_N$  по формуле:

$$N = 100 \cdot \sigma_N \cdot S, [N] = [m], \quad (24)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения конструкции,  $m^2$ .

Согласно имеющейся проектной документации, площадь поперечного сечения конструкции главной балки нижнего пояса фермы пролётного строения железнодорожного моста на контролируемом участке равна:

$$S = \frac{4 \cdot 140 \cdot 12 \cdot 2 + 2 \cdot 1000 \cdot 14 + 2 \cdot 1000 \cdot 12}{1000000}$$

$= 0,065 [m^2]$ .

Оценку работы конструкций сооружения по измеренным таким образом значениям де-

формациям, напряжениям растяжения–сжатия и продольным усилиям, возникающим в конструкции при прохождении подвижного состава, рекомендуется выполнять в соответствии с Приложением В СП 79.13330.2012<sup>3</sup> с помощью коэффициента, вычисляемого по формуле:

$$K = \frac{\varepsilon_{Nmax}}{\varepsilon_{pac}} = \frac{\sigma_{Nmax}}{\sigma_{pac}} \cdot \frac{N_{max}}{N_{pac}}, \quad (25)$$

где  $\varepsilon_{Nmax}$ ,  $\sigma_{Nmax}$ ,  $N_{max}$  – соответственно, максимальные измеренные значения деформаций, напряжений растяжения–сжатия и продольных усилий от временной вертикальной нагрузки;  $\varepsilon_{pac}$ ,  $\sigma_{pac}$ ,  $N_{pac}$  – соответственно, значения деформаций, напряжений растяжения–сжатия и продольных усилий от временной вертикальной нагрузки, определённые расчётным путём по действующим нормативным документам.

В частности значения коэффициента  $K$ , больше единицы, указывают на потерю несущей способности вследствие высокого коррозионного износа конструкции (уменьшения рабочей площади сечения балки). В этом случае необходимо срочно разрабатывать меры по обеспечению надёжной работы и усилению элементов конструкций.

Согласно результатам расчёта продольных усилий в элементах главной фермы пролётного строения моста [13, с. 124], выполненного методом конечных элементов, максимальные расчётные усилия от действия временной вертикальной нагрузки на контролируемом участке составляют:

$$N_{pac} = (N_B + N_{II}) - N_B = 1740 - 251 = 1489 \text{ т.}$$

Расчёт выполнялся путём математического моделирования по существующей проектной документации на сооружение, без учёта фактического износа конструкций, с допусками согласно СП 35.13330.2011 и СП РК 3.03-112-2013. Из мозаики продольных усилий (рис. 6, 7), видно, что согласно расчёту наибольшие постоянные и временные растягивающие усилия испытывает нижний пояс фермы.

Рекомендуемые на период опытной эксплуатации пороговые значения в терминах «норма/тревога/авария», для измеряемых продольных усилий от временной вертикальной нагрузки, приведены в табл. 3.

## КРАТКИЙ ВЫВОД

Авторами выполнен анализ экспериментальных и расчётных данных более 30 мостов и путепроводов [14–17]. Предлагаемые в данной работе методики рекомендуется использовать при разработке автоматизированных систем мониторинга технического состояния пролётных строений больших и уникальных железнодорожных мостов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хазанов М. Л. Анализ напряжённо-деформированного состояния мостовых конструкций с использованием компьютерной измерительной системы // Дис... канд. техн. наук. – М.: МАДИ. – 2007. – 130 с. [Электронный ресурс]: <https://www.disscat.com/content/analiz-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-mostovykh-konstruktsii-s-ispolzovaniem-komp>. Доступ 24.05.2021.

2. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Монография в 2 кн.: Кн. 1 / Пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.

3. Kaloor, M., Hu, Jong. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique. Journal of Sensors, 2016, Article ID 7494817, 14 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.

4. Yang, Y.; Li, S.; Yan, B. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. Advances in Mechanical Engineering, 2017, Vol. 9 (1), pp. 1–10. DOI: <http://doi:10.1177/1687814016684272>.

5. Lienhart, W., Ehrhart, M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring: System Reliability for Verification and Implementation – Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM, 2015. DOI: <https://doi:10.12783/SHM2015/58>.

6. Belyi, A., Karapetov, E., Efimenko, Yu. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example). Procedia Engineering, 2017, Vol. 189, pp. 145–151. DOI: <https://doi:10.1016/j.proeng.2017.05.024>.

7. Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Косенко С. А. Диагностика и мониторинг балочных пролётных строений железнодорожных мостов. Политранспортные системы. Материалы IX Международной научно-техн. конф. по направлению «Научные проблемы реализации

транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – СГУПС, Новосибирск, 2017. – С. 35–43.

8. Бондарь И. С. Измерение деформаций балочных пролётных строений мостов // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 6. – С. 36–51. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1086>. Доступ 24.05.2021.

9. Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Алдекеева Д. Т., Зайцев А. А. Инструментальная диагностика металлических железнодорожных мостов // Тр. XV Международной научно-техн. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца. – М.: МГУПС (МИИТ), 2018. – С. 259–265.

10. Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Алдекеева Д. Т. Напряжённо-деформированное состояние железобетонного путепровода под нагрузкой // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 68–81. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-68-81>.

11. Bonessio, N., Lomiento, G., Benzoni, G. Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges. Structural Control Health Monitoring, 2011, Vol. 19, pp. 565–578. DOI: <https://doi:10.1002/stc.448>.

12. Lanis, A., Razuvaev, D., Lomov, P. Conjugation of approach fill with bridge and overbridge. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2016, Vol. 2 (48), pp. 110–120. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120).

13. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Филиппова В. О. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 1. Причины // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 6. DOI: <http://doi:10.15862/07KO615>.

14. Solonenko, V. G., Makhmetova, N. M., Nikolaev, V. A., Kвашnin, M. Ya., Bekzhanova, S. E., Bondar, I. S., Mirzabaev, S. A. Analysis of the stress-strain state of travel pipes with the use of hardware and software complex. News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences, 2020, Vol. 1, Iss. 439, pp. 181–188. DOI: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.22>.

15. Abdullayev, S. S., Bondar, I. S., Bakyt, G. B., Ashirbayev, G. K., Budiukin A. M., Baubekov Ye. Ye. 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, 2021, Vol. 1, Iss. 445, pp. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.3>.

16. Abdullayev, S. S., Bakyt, G. B., Aikumbekov, M. N., Bondar, I. S., Auyesbayev, Ye. T. Determination of natural modes of railway overpasses. Journal of Applied Research and Technology, 2021, Vol. 19, Iss. 1, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2021.19.1.1487>.

17. Квашнин М. Я., Бекжанова С. Е., Акбаева А. С., Бондарь И. С., Курбенова А. К. К вопросу безопасной эксплуатации искусственных сооружений железнодорожных магистралей // Вестник КазГАСА. – Алматы, 2021. – № 1 (79). – С. 229–241. DOI: <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2021.1-30>. ●

### Информация об авторах:

**Квашнин Николай Михайлович** – кандидат технических наук, главный инженер проектов НТЦ Дирекции развития ФГУП «ЗащитаИнфоТранс», Москва, Россия, [kvashnin\\_nm@mail.ru](mailto:kvashnin_nm@mail.ru).

**Бондарь Иван Сергеевич** – кандидат технических наук, PhD по транспортному строительству, ассоциированный профессор Факультета общего строительства Международной Образовательной Корпорации (КазГАСА), Алматы, Казахстан, [ivan\\_sergeevich\\_08@mail.ru](mailto:ivan_sergeevich_08@mail.ru).

**Квашнин Михаил Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент, ассоциированный профессор кафедры транспортного строительства Академии логистики и транспорта (АЛУТ), Алматы, Казахстан, [kvashnin\\_mj55@mail.ru](mailto:kvashnin_mj55@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 16.03.2021, одобрена после рецензирования 24.05.2021, принята к публикации 08.06.2021.

