

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 4. С. 220–229.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (4): 220–229.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-220-229

EDN: WQUBSU

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА  
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ  
МОДЕЛИ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА,  
ПОЛУЧИВШЕГО ПОВРЕЖДЕНИЯ  
ПРИ ВРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**Сергей Иванович Герасимов, Виктор Михайлович Тихомиров,  
Сергей Анатольевич Бахтин**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, Россия*

*Аннотация. Актуальность.* Характеристики конструкций моста в поврежденном состоянии изучены недостаточно, поэтому существует высокий риск их непредсказуемого поведения, что может привести к сбоям в работе, которые станут причиной серьезных аварий и техногенных катастроф. Масштабы такой опасности значительно возрастают в условиях экстремального климата Сибири и Севера. Повреждения и разрушения сооружений подтверждаются многими фактами.

*Цель работы* состоит в экспериментальном моделировании несущей способности моста после полученного повреждения, изучении состояния конструкций моста в различных условиях и определении мер по его восстановлению.

*Методы.* Для определения усилий в стержнях фермы применялся расчетный метод конечных элементов и метод экспериментального моделирования на базе системы PASCО.

*В результате* выявлены закономерности перераспределения усилий в стержнях пролетного строения при выключении из работы его некоторых элементов, установлен критический вид разрушения фермы.

**Ключевые слова:** экспериментальное моделирование, пролетное строение моста, повреждения, инженерный конструктор PASCО

**Для цитирования:** Герасимов С.И., Тихомиров В.М., Бахтин С.А. Экспериментальная оценка перераспределения усилий в элементах модели пролетного строения моста, получившего повреждения при временной нагрузке от подвижного состава // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 220–229. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-220-229. EDN: WQUBSU

ORIGINAL ARTICLE

**EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF FORCE  
REDISTRIBUTION IN ELEMENTS OF DAMAGED BRIDGE  
MODEL UNDER TEMPORARY LOAD FROM ROLLING STOCK**

**Sergey I. Gerasimov, Viktor M. Tikhomirov, Sergey A. Bakhtin**  
*Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The relevance of the work lies in the fact that properties of damaged structures were sufficiently studied. Therefore, there is a high risk of their unpredictable behavior, which can lead to malfunctions, including serious accidents and man-made disasters. The risk of such danger increases significantly in the extreme climate of Siberia and the North. Damage and destruction of structures are confirmed by many facts.

**Purpose:** The aim of the work is to experimentally simulate the bridge bearing capacity after damage in order to understand how the bridge behaves in various conditions and what measures can be taken to restore it.

**Methodology:** The finite element method and experimental modeling in the PASCO digital laboratory were used to determine forces in the truss rods.

**Research findings:** The redistribution of forces in the rods of the superstructure was detected when some of its elements are out of operation, and critical destruction is identified.

**Keywords:** experimental modeling, bridge superstructure, damage, PASCO digital laboratories

**For citation:** Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Bakhtin S.A. Experimental Assessment of Force Redistribution in Elements of Damaged Bridge Model under Temporary Load from Rolling Stock. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 220–229. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-220-229. EDN: WQUBSU

Мосты имеют большое значение для решения транспортных проблем в большинстве стран мира [1, 2, 3]. Они способствуют безопасной и бесперебойной работе транспорта, обеспечивая перемещение грузов и людей через различные естественные преграды: реки, железные и автомобильные дороги, каналы и др. [4]. Аварийное повреждение моста приводит к опасным последствиям, включая прекращение транспортного движения и потенциальную угрозу здоровью и жизни людей [5, 6, 7, 8].

Анализ напряженно-деформированного состояния пролетного строения моста в настоящее время проводится двумя основными методами: натурные испытания и компьютерное моделирование [9, 10].

Натурные эксперименты довольно дорогостоящие и зависят от качества измерительной аппаратуры. При этом практически невозможно изучение влияния на работу моста различных его повреждений. При моделировании нагрузки от подвижного состава по проезжей части моста методом конечных элементов совместное динамическое взаимодействие конструкции пролета и грузового поезда или автомобильного транспорта учитывается, однако имеются проблемы с заданием параметров взаимодействия, особенно имитации взаимодействия подвижной нагрузки и статичного пролетного строения, что не дает приемлемой точности. Альтернативой этим методам может стать

экспериментальное моделирование динамического воздействия движущейся нагрузки на элементы мостового сооружения с учетом их фактического состояния.

В настоящей работе данный метод был применен для изучения перераспределения усилий и изменения характеристик колебаний в стержнях фермы пролетного строения при разрушении некоторых ее элементов. Рассматривалась конструкция пролетного строения первого железнодорожного моста, расположенного в месте пересечения главного хода Транссибирской магистрали с р. Обью (рис. 1) [2].



Рис. 1. Вид конструкции первого моста через р. Обь в г. Новосибирске  
Fig. 1. Structure of the first bridge over the Ob River in Novosibirsk

Масштабная 3D-модель пролетного строения представлена на рис. 2. Она построена с помощью инженерного конструктора PASCО [11]. В данном случае опоры, на которые устанавливалась ферма, представляли собой стержневые конструкции и имитировали шарнирно-неподвижные и шарнирно-подвижные опорные части справа и слева. Специальная конструкция модели проезжей части железнодорожного пролетного строения передавала нагрузку от подвижного состава строго по узлам фермы и за счет своей пространственной жесткости существенно перераспределяла усилия между элементами. Для реального железнодорожного пролетного строения постоянная нагрузка составляет примерно 5 т на 1 пог. м моста, а временная от подвижного состава – примерно 14 т на 1 пог. м моста. В данном эксперименте соотношение этих нагрузок оказалось более жестким – 6,8 г/см для фермы и 35,5 г/см – для локомотива.

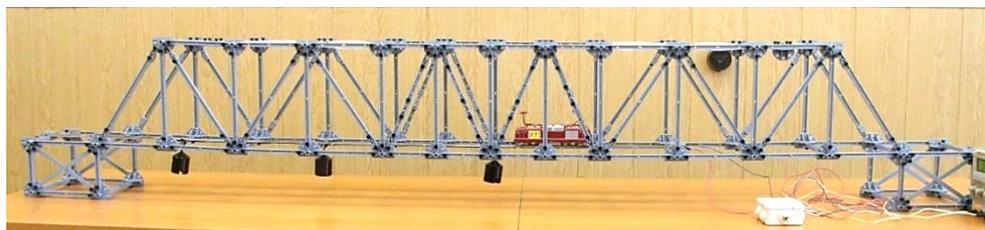


Рис. 2. Вид модели пролетного строения, установленного на опоры  
Fig. 2. Model of span structure mounted on supports

Нагружалась модель пролетного строения с помощью движения модели четырехосного электровоза по рельсам нижнего пояса фермы. Движение задавалось от опоры к опоре последовательно в обоих направлениях. При этом производилось возбуждение колебаний в элементах фермы как при беспрепятственном движении модели электровоза, так и при преодолении искусственного порожка. Порожек был установлен вблизи левой опоры и имитировал возвышение одного рельса над другим. Высота порожка задавалась такой, чтобы выбоина на проезжей части рельсового пути имела глубину величиною четверть от высоты головки рельса. Модель электровоза пересекала порожек с постоянной скоростью. При этом возникали значительные амплитуды колебаний пролетного строения, вместе с тем хорошо видна собственная частота пролетного строения и наблюдается значительный динамический коэффициент.

Для измерения усилия в стержнях фермы были установлены четыре специальных датчика измерения усилий конструктора PASCO. Схема расположения датчиков представлена на рис. 3. Датчики д1 (Force 1) и д2 (Force 2) устанавливались симметрично на горизонтальных стержнях нижнего пояса фермы, датчик д3 (Force 3) – на стержне верхнего пояса, датчик д4 (Force 4) – на подвеске.

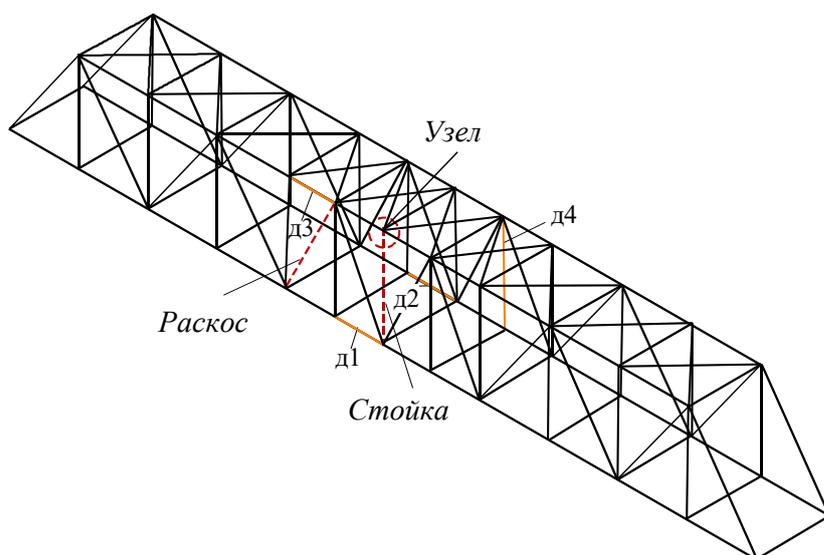


Рис. 3. Схема расположения датчиков и разрушенных элементов стержней, узлов  
 Fig. 3. Location of sensors and destroyed elements of rods and nodes

Для четырех вариантов состояния пролетного строения (табл. 1) фиксировались показания четырех датчиков (д1–д4) PS-2200 в виде диаграмм «усилие – время». В системе PASCOCapstone 2.0 были выбраны единицы измерения силы в ньютонах, времени – в секундах. Частота дискретизации данных – 1000 Гц. После каждого опыта проверялись остаточные усилия (табл. 2) и проводилась калибровка нуля всех датчиков.

Результаты измерения остаточных усилий демонстрируют качественное закрепление стержней фермы во всех ее узлах.

Таблица 1

## Варианты состояния фермы

Table 1

## Different states of support

Номер опыта	Состояние пролета	Направление движения нагрузки
1	Без повреждения элементов фермы	Справа налево ( $\leftarrow$ )
		Слева направо ( $\rightarrow$ )
2	Разрушена стойка фермы	Справа налево ( $\leftarrow$ )
		Слева направо ( $\rightarrow$ )
3	Разрушен раскос фермы	Справа налево ( $\leftarrow$ )
		Слева направо ( $\rightarrow$ )
4	Разрушен узел фермы	Справа налево ( $\leftarrow$ )
		Слева направо ( $\rightarrow$ )

Таблица 2

## Остаточные усилия после проведения опытов

Table 2

## Residual forces after experiments

Номер датчика	Номер опыта			
	1	2	3	4
	Усилие $N$ , Н			
Датчик 1	0,25	0,25	0,10	0,05
Датчик 2	0,10	0,00	0,05	0,00
Датчик 3	0,00	0,10	0,10	0,00
Датчик 4	0,00	0,00	0,00	0,00

На рис. 4 показан вид диаграмм, зафиксированных на экране измерительного блока PASCО при проведении опыта 1. На диаграмме начало движения соответствует 2-й секунде, а конец – 11-й. В связи с особенностями обработки показаний в системе PASCОCapstone отрицательные значения соответствуют деформации растяжения стержня, а положительные – сжатия.

Видно, что направление движения практически не сказывается на показаниях датчиков.

На рис. 5, 6 и 7 показаны диаграммы усилий при проведении опытов 2, 3 и 4 соответственно. В табл. 3 представлены результаты перераспределения усилий для всех вариантов разрушения элементов фермы. Знак «плюс» соответствует увеличению максимального абсолютного значения, «минус» – уменьшению.

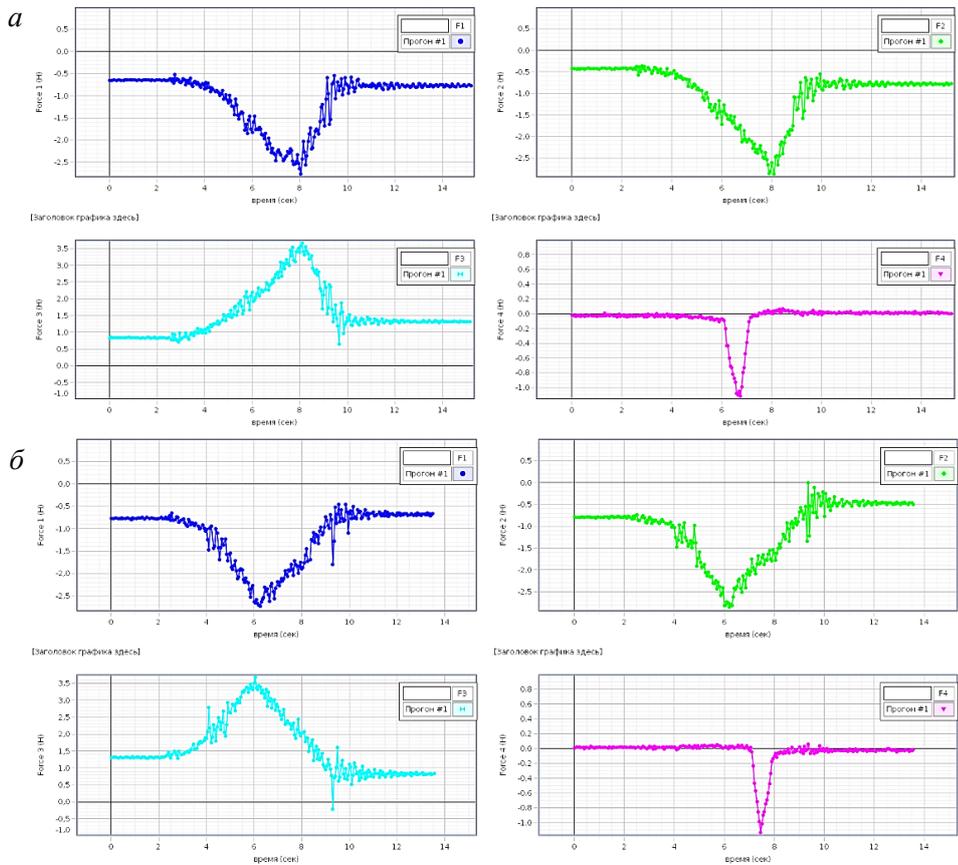


Рис. 4. Диаграммы усилий в стержнях фермы без повреждений:  
 а – движение локомотива справа налево; б – движение локомотива слева направо  
 Fig. 4. Diagrams of forces in truss rods without damage:  
 a – locomotive movement from right to left; b – locomotive movement from left to right

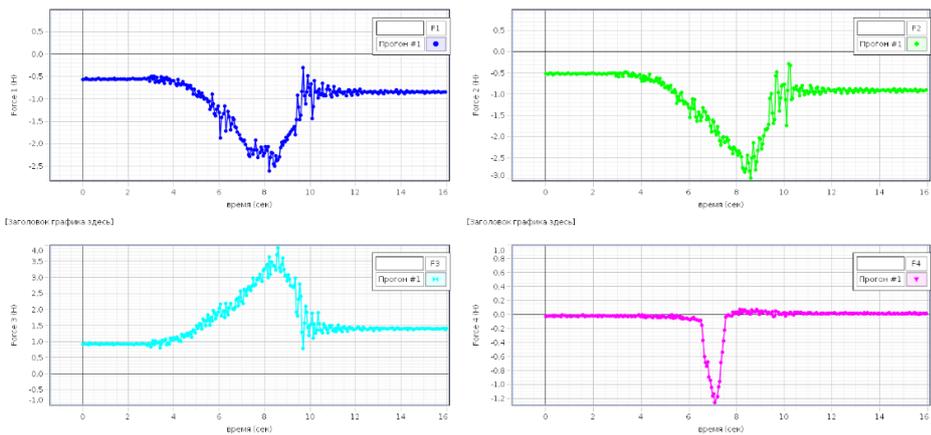


Рис. 5. Диаграммы усилий при разрушении стойки фермы  
 Fig. 5. Force diagrams after failure of the truss strut

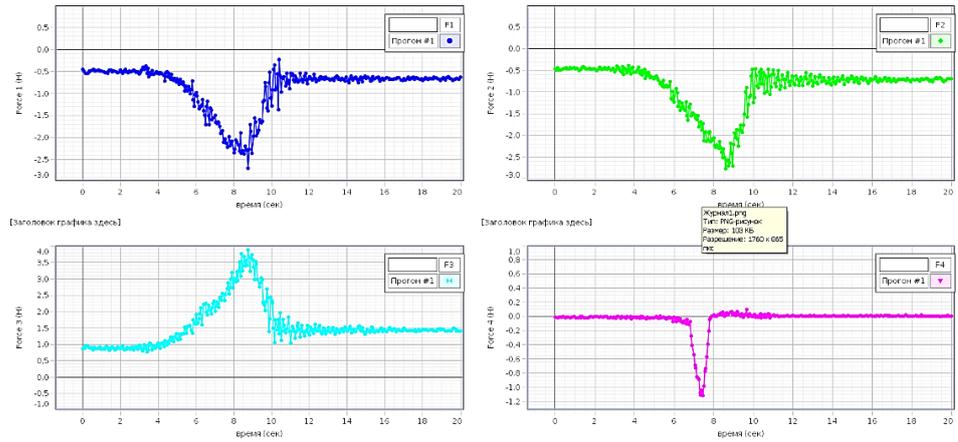


Рис. 6. Диаграммы усилий при разрушении раскоса  
Fig. 6. Force diagrams after strut fracture

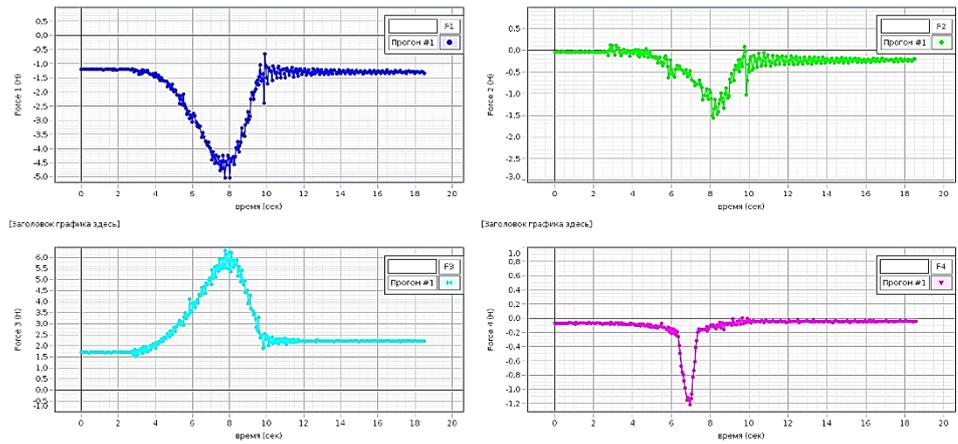


Рис. 7. Диаграммы усилий при разрушении узла  
Fig. 7. Force diagrams after assembly fracture

Таблица 3

Результаты перераспределения усилий

Table 3

Force redistribution

Номер стержня	Номер опыта			
	1	2	3	4
	Изменение усилий, %			
Стержень 1	0	-9,2	-9,8	+72
Стержень 2	0	-2,4	-7,5	-42
Стержень 3	0	+1,9	+1,0	+72
Стержень 4	0	+14	0,0	+11

Из данных табл. 3 следует, что повреждение одного элемента (или стойки, или раскоса) вызывает небольшие изменения усилий в наблюдаемых элементах фермы. Таким образом, данная конструкция при таких условиях повреждения обладает большим запасом живучести. Наиболее опасным повреждением модели пролетного строения является полное разрушение узла, расположенного в средней части пролета, когда из работы выключаются шесть стержней. При этом в наиболее нагруженных горизонтальных стержнях верхнего и нижнего поясов наблюдается наибольшая статическая перегрузка – до 72 %. Это может привести к прогрессирующему разрушению других элементов и в итоге к обрушению всего пролетного строения моста [12].

По полученным диаграммам также можно экспериментально оценить значение динамического коэффициента:

$$k_{\text{дин}} = 1 + \mu = 1 + \frac{A_{\text{дин}}}{A_{\text{ст}}},$$

где  $A_{\text{дин}}$  – динамическая составляющая амплитуды усилий;  $A_{\text{ст}}$  – статическая составляющая усилий; а  $\mu = A_{\text{дин}}/A_{\text{ст}}$  – динамическая добавка.

При движении модели электровоза по рельсам, имеющим неровности, на диаграммах усилий наблюдается всплеск. Проанализируем показания датчиков 1 и 2 при проведении опыта 4 (см. рис. 7). На 10-й секунде движения электровоза видно резкое изменение показаний. Для первого стержня динамическая добавка составила  $\mu = 0,67$ , а для второго –  $\mu = 2,9$ .

### Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие краткие выводы:

1. Представленная экспериментальная методика может быть использована при оценке живучести мостового сооружения на аварийный отказ как одного элемента, так и нескольких при статической и динамической подвижной транспортной нагрузке.

2. Проведены исследования перераспределения усилий в элементах модели пролетного строения при трех вариантах повреждений: разрушение стойки, раскоса и верхнего узла фермы, расположенных в средней части пролетного строения. Определено, что наиболее опасным повреждением является выход из строя узла фермы, при котором в наиболее нагруженных элементах фермы наблюдается наибольшая перегрузка до 72 %.

3. Методика экспериментального моделирования позволила оценить динамический коэффициент при движении модели электровоза по железнодорожному пути, имеющему неровности. Наибольший динамический коэффициент был зафиксирован при максимально опасном повреждении пролетного строения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахтин С.А., Громов К.А., Шабанов А.П. Разработка новых совмещенных пролетных строений под перспективные железнодорожные и автомобильные нагрузки // *Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта*. 2022. № 4 (7). С. 111–117.
2. Власов Г.М. Мосты Новосибирска. Новосибирск : Приобские ведомости, 2023. 191 с.

3. Anitori G., Casas J. R., Ghosn M. Redundancy and Robustness in the Design and Evaluation of Bridges: European and North American Perspectives // *Journal of Bridge Engineering*. 2013. V. 18. № 12. P. 1241–1251.
4. Бокарев С.А., Проценко Д.В. Экспериментально-теоретические исследования пролетного строения сборно-разборного моста ТАЙПАН // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2017. № 8 (704). С. 24–33.
5. Шибков Н.Р., Яшинов А.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния балочной клетки в железнодорожных мостах с ездой поверху // *Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта*. 2022. № 4 (7). С. 73–79.
6. Попов А.М., Зиновьев В.Б., Герасимов С.И., Сподарева Л.А. Исследование элементов мостовых конструкций методом голографической интерферометрии во встречных пучках // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 6 (65). С. 210–219.
7. Gerasimov S., Tikhomirov V. Investigation of Low Temperature Deformation Measurement Problem by the Contact Holographic Interferometers // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. V. 130. P. 186–192. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_19)
8. Gerasimov S.I. Experimental Analysis of Elasto-Plastic Deformations Using Contact Holographic Interferometry // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2504. P. 020004. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0132444>
9. Жосан А., Папин В. Проблемы современного мостостроения // *Инженерные исследования*. 2021. № 1 (1). С. 20–25.
10. Said H., Marzouk M., El-Said M. Application of Computer Simulation to Bridge Deck Construction: Case Study // *Automation in Construction*. 2009. V. 18. № 4. P. 377–385.
11. Turdiyev Sh.R. The Need for the Implementation of PASCO Digital Laboratories, Which Provides the Possibility of Digitalization of STEAM Sciences // *American Journal of Pedagogical and Educational Research*. 2023. № 19. P. 161–164.
12. Бокарев С.А., Ращепкин А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2006. № 2. С. 177–186.

## REFERENCES

1. Bakhtin S.A., Gromov K.A., Shabanov A.P. Development of New Combined Superstructures for Prospective Railway and Automobile Loads. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta*. 2022; 7(4): 111–117. DOI: 10.52170/2712-9195\_2022\_4\_111 (In Russian)
2. Vlasov G.M. Bridges in Novosibirsk: Priobskие vedomosti, 2023. 191 p. (In Russian)
3. Anitori G., Casas J.R., Ghosn M. Redundancy and Robustness in the Design and Evaluation of Bridges: European and North American Perspectives. *Journal of Bridge Engineering*. 2013;18(12): 1241–1251.
4. Bokarev S.A., Protsenko D.V. Experimental and Theoretical Studies of TIPAN Demountable Bridge Span. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019; (9): 43–50. (In Russian)
5. Shibkov N.R., Yashnov A.N. Stress-Strain State of Railway Bridge Deck. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta*. 2022; 7(4): 73–79. DOI: 10.52170/2712-9195\_2022\_4\_73 (In Russian)
6. Popov A.M., Zinov'ev V.B., Gerasimov S.I., Spodareva L.A. Examination of Bridge Elements Using Holographic Interferometry in Colliding Beams. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (6): 210–219. (In Russian)
7. Gerasimov S., Tikhomirov V. Investigation of Low Temperature Deformation Measurement Problem by The Contact Holographic Interferometers. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 130: 186–192. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_19)
8. Gerasimov S.I. Experimental Analysis of Elasto-Plastic Deformations Using Contact Holographic Interferometry. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2504: 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0132444>
9. Zhosan A., Papin V. Problems of Modern Bridge Construction. *Inzhenernye issledovaniya*. 2021. (1): 20–25. Available: <http://eng-res.ru/archive/2021/1/20-25.pdf> (In Russian)
10. Said H., Marzouk M., El-Said M. Application of Computer Simulation to Bridge Deck Construction: Case Study. *Automation in Construction*. 2009; 18 (4). 377–385.

11. *Turdiyev Sh.R.* The Need for the Implementation of PASCO Digital Laboratories, Which Provides the Possibility of Digitalization of STEAM Sciences. *American Journal of Pedagogical and Educational Research*. 2023. (19): 161–164.
12. *Bokarev S.A., Rashepkin A.A.* Improvement of Estimation Technique of Carrying Capacity of Railway Bridge Spans. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2006; (2): 177–186. (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Герасимов Сергей Иванович*, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 912267@mail.ru

*Тихомиров Виктор Михайлович*, докт. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, twm@stu.ru

*Бактин Сергей Анатольевич*, канд. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, bsa-stu@yandex.ru

#### Authors Details

*Sergey I. Gerasimov*, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 912267@mail.ru

*Victor M. Tikhomirov*, DSc, A/Professor, Siberian Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, twm@stu.ru

*Sergey A. Bakhtin*, PhD, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, bsa-stu@yandex.ru

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.05.2024  
Одобрена после рецензирования 21.05.2024  
Принята к публикации 14.06.2024

Submitted for publication 07.05.2024  
Approved after review 21.05.2024  
Accepted for publication 14.06.2024