

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

## ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2023. Т. 25. № 2. С. 191–206.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2023; 25 (2): 191–206.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.09-047.36

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-191-206

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФЛОПОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ ЗРЕНИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Павел Александрович Елугачев<sup>1</sup>, Федор Александрович Губарев<sup>2</sup>,  
Алексей Андреевич Банников<sup>1</sup>, Андрей Владимирович Мостовщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

**Аннотация.** В работе рассматриваются проблемы, дефекты и методы диагностики состояния пролетных конструкций мостовых сооружений.

В качестве перспективного метода диагностики предлагается использовать *метод корреляции лазерных спекл-изображений* в совокупности со скоростной видеорегистрацией с проведением испытаний на мосту.

Проанализированы результаты определения фактической грузоподъемности моста через р. Бурундук на автомобильной объездной дороге г. Томска и его динамических характеристик с применением измерительной системы «ФАЗА-IT». Определены относительные перемещения поверхности железобетонных балок при различных условиях воздействия подвижных нагрузок методом корреляции лазерных спекл-изображений.

*Анализ результатов* проведенных экспериментов показал эффективность применения технологии и оборудования на реальных строительных объектах.

**Ключевые слова:** амплитуда вертикальных перемещений, спекл, эргономическая спекл-корреляция, спекл-изображение, многоканальная корреляция, дискретный ряд Фурье

**Для цитирования:** Елугачев П.А., Губарев Ф.А., Банников А.А., Мостовщиков А.В. Использование метода корреляции лазерных спекл-изображений для диагностики автодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 191–206. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-191-206.

## ORIGINAL ARTICLE

### ROAD BRIDGE MONITORING USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

Pavel A. Elugachev<sup>1</sup>, Fyodor A. Gubarev<sup>2</sup>,  
Aleksii A. Bannikov<sup>1</sup>, Andrei V. Mostovshchikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

**Abstract.** The paper considers problems, defects and methods of bridge span diagnostics. It is proposed to use the promising digital image correlation method based on laser speckle imaging and high-speed video recording during bridge testing. The analysis is given to test results of the bridge over the Burunduk River in the Tomsk region and its dynamic characteristics using the Faza-1T measuring system. Relative displacements of railway beam surface are determined under live loads when using digital image correlation. According to the analysis the experimental data, the digital image correlation method and described equipment are efficient for using them in sites.

**Keywords:** vertical displacement, speckle, ergonomic speckle correlation, speckle image, multi-channel correlation, discrete Fourier series

**For citation:** Elugachev P.A., Gubarev F.A., Bannikov A.A., Mostovshchikov A.V. Road bridge monitoring using digital image correlation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (2): 191–206. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-191-206.

#### Область исследования, актуальность

Мониторинг мостов – это система наблюдения и контроля для обеспечения безопасного функционирования зданий и сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов основания или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно работоспособное или аварийное состояние [1].

На сегодняшний день основным методом мониторинга является применение специальных геодезических систем, которые позволяют оперативно контролировать состояние мостовой конструкции, смещения и прогибы, возникающие в результате влияния внешних факторов, таких как подвижная временная нагрузка или климатические воздействия. Основной задачей такой системы является быстрое оповещение сотрудников службы эксплуатации

моста о потенциально опасной ситуации в случае превышения допустимых значений в конструкциях сооружения. Это позволяет контролировать безопасное движение транспорта и пешеходов по мосту и под мостом, а также избежать тяжелых последствий в случае возможных чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий. Данные, получаемые с таких систем, позволяют прогнозировать предельно допустимые изменения конструкций, своевременно получать информацию и принимать решения об изменении режима эксплуатации моста или его ремонте.

Однако существующие технологии мониторинга мостовых сооружений имеют ряд недостатков:

- значительная стоимость оборудования;
- зависимость от благоприятных природно-климатических условий;
- отсутствие обратной связи с объектом мониторинга;
- необходимость закладки аппаратной части мониторинга в ходе нового строительства;
- ограниченное количество мест наблюдения в конструкциях.

Такие недостатки ограничивают повсеместное внедрение технологии мониторинга, а значит, снижают безопасность функционирования мостовых сооружений.

По мнению авторов настоящей статьи, будущее развитие систем мониторинга за применением киберфизических систем с использованием специальных сенсоров, одним из которых может стать лазерная система видеорегистрации [2].

В работах [3, 4, 5, 6] метод корреляции лазерных спекл-изображений применялся нами для исследования различных объектов. Объектами исследования являлись как процессы, приводящие к изменениям физико-химических свойств (образование сгустков при свертывании крови или плазмы или химические превращения при высокотемпературном горении) [3, 4], так и механические процессы, в частности колебание мембраны динамика при воспроизведении звука [5, 6]. В последнем случае изменение спеклов происходит за счет изменения угла падения света. Можно полагать, что аналогичный эффект изменения спекл-изображений будет наблюдаться при колебании пролетной конструкции моста или путепровода.

В работе предлагается метод мониторинга пролетных конструкций на основе регистрации лазерных спекл-изображений. Принцип метода основан на том, что объект освещается когерентным лазерным излучением в точках контроля. При отражении луча от поверхности какого-либо сооружения свет меняет фазу, в пространстве между поверхностью и объективом камеры формируются спекл-изображения. Спеклы представляют собой условные темные и светлые пятна, которые складываются в рисунок, или паттерн [7, 8, 9]. Спекл-изображения регистрируются камерой, и проводится компьютерный анализ перемещения паттернов. Достоинством метода является возможность дистанционного мониторинга без установки аппаратной части непосредственно на самом мосту. При этом область мониторинга может изменяться достаточно быстро путем изменения направления лазерного луча.

### Объект исследования, проблемы и дефекты современного состояния сооружения

Объектом исследования является мост через р. Бурундук на автомобильной объездной дороге г. Томска на км 12+000 в Томском районе Томской области.

Участок автомобильной дороги, на котором расположен мост, относится к II категории. Проектные нагрузки А11; НК-80. Мост расположен в плане на прямой. Статическая конструктивная система моста балочная температурно-неразрезная. Длина моста – 93,30 м. Мост имеет пять пролетных строений по 18 м, габарит моста  $G = 11,50 + 2 \times 0,25 + 2 \times 1,55$  м, общая ширина пролётного строения – 15,10 м, расчетный пролет составляет 17,40 м.

Деформационные швы устроены над опорами № 1; 6 закрытого типа с резиновым компенсатором.

Пролетные строения выполнены из железобетонных балок таврового сечения без диафрагм применительно к типовому проекту серии 3.503.1-73. Высота балки – 1,05 м, толщина ребра по низу – 0,16 м. В поперечном сечении – 8 балок длиной по 18,00 м, поперечная схема:  $K0,70 + 1,70 + 1,70 + 1,69 + 1,70 + 1,70 + 1,68 + 1,70 + K0,70$  (м). Консоли крайних балок добетонированы. Балки уложены на резинометаллические опорные части (РОЧ), установленные на подферменные площадки ригеля опоры. Подферменные площадки имеют переменную высоту для обеспечения поперечного уклона.

Промежуточные опоры № 2–5 выполнены из металлических труб диаметром 1,02 м, заполненных бетоном и объединённых в верхней части сборным железобетонным ригелем, применительно к типовому проекту серии 3.503.1-69. В поперечном сечении – 3 столба, расстояние между осями – 4,20 м. На опорах № 3; 4, на высоте 4,30 м от низа ригеля, установлены распорки из шпунта типа «Ларсен». Опоры № 1; 6 (устои) выполнены из металлических труб диаметром 1,02 м, заполненных бетоном и объединённых в верхней части сборным железобетонным ригелем, применительно к типовому проекту серии 3.503.1-64. В поперечном сечении – 3 столба, расстояние между осями – 4,20 м. Шкафные стенки выполнены из железобетонных блоков по типовому проекту 3.503-64, 3.503.1-30/81. Сборные элементы шкафных стенок объединены омоноличиванием. Укрепление конусов выполнено сборными железобетонными плитами  $0,49 \times 0,49 \times 0,08$  (м).

Направление течения реки – справа налево. Отверстие моста – 72,80 м.

**Основной проблемой и дефектом** мостового сооружения, выявленных при обследовании в 2018 г., является развитие симметричных вертикальных и наклонных трещин с двух сторон на ребре балки пролетного строения преимущественно на расстоянии 4,00–4,40 м от шкафной стенки. Причиной образования трещин, предположительно, стал несанкционированный пропуск сверхнормативной нагрузки.

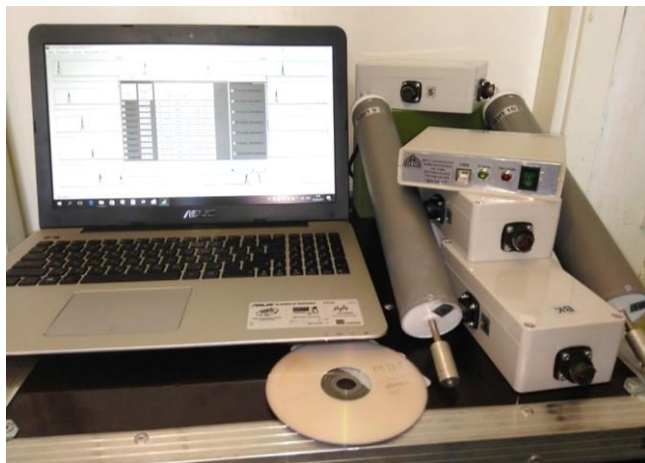
Общее состояние балок пролетного строения в значительной степени определяется нарушением гидроизоляции проезжей части, особенно в районе швов объединения балок. Вследствие сквозного промокания по швам объединения балок в бетоне развиваются процессы выщелачивания цементного камня, что проявляется выносом на нижние поверхности плиты продуктов выщелачивания различной интенсивности.

После проведения работ по ремонту мостового сооружения в 2021 г. большая часть дефектов была устранена. Но в ходе наблюдений за мостом были выявлены повторные появления симметричных вертикальных и наклонных трещин. Было принято решение провести исследования и испытания.

### **Определение фактической грузоподъемности моста и его динамических характеристик контактным методом измерения**

Испытания и исследования проводились на объекте 30.05.2022 г. в ночное время суток. Использовалась испытательная нагрузка в виде КАМАЗа КДМ-7881 массой 20 т. Испытание проводилось как на статическую, так и динамическую нагрузку с фиксацией амплитуды вертикальных перемещений, возникающих вследствие динамической нагрузки и имитации «удара», при наезде автомобиля на яму, расположенную в середине крайних пролетов моста.

Основным исследовательским оборудованием для определения фактической грузоподъемности моста и его динамических характеристик выступала комплексная измерительная система статических и динамических характеристик пролётных строений мостов «ФАЗА-1Т» [10, с. 182]. Система предназначена для измерений вертикальных прогибов и колебаний элементов конструкций инженерных сооружений (пролетные строения мостов, путепроводов и др.) в диапазоне  $\pm 50$  мм. Она может быть использована также в дорожной отрасли при оценке технического состояния пролетных строений. Система обеспечивает одновременные измерения перемещений каждым измерительным каналом [10, с. 181]. Измерения вертикальных прогибов проводились во втором пролете. Датчики располагались в поперечном сечении пролетов  $L/2$ . Пролетное строение имеет 8 балок, представляющих собой балки таврового сечения. Датчики многоканальной измерительной системы вертикальных перемещений «ФАЗА-1Т» (рис. 1) располагались с 2-й по 8-ю балку соответственно, начиная с нижней стороны (рис. 2–4).



*Рис. 1. Внешний вид многоканальной системы для измерений вертикальных перемещений «ФАЗА-1Т». Фото А.А. Банникова*

*Fig. 1. Exterior view of the FAZA-1T multichannel system for vertical displacement measurements. Photograph by A.A. Bannikov*

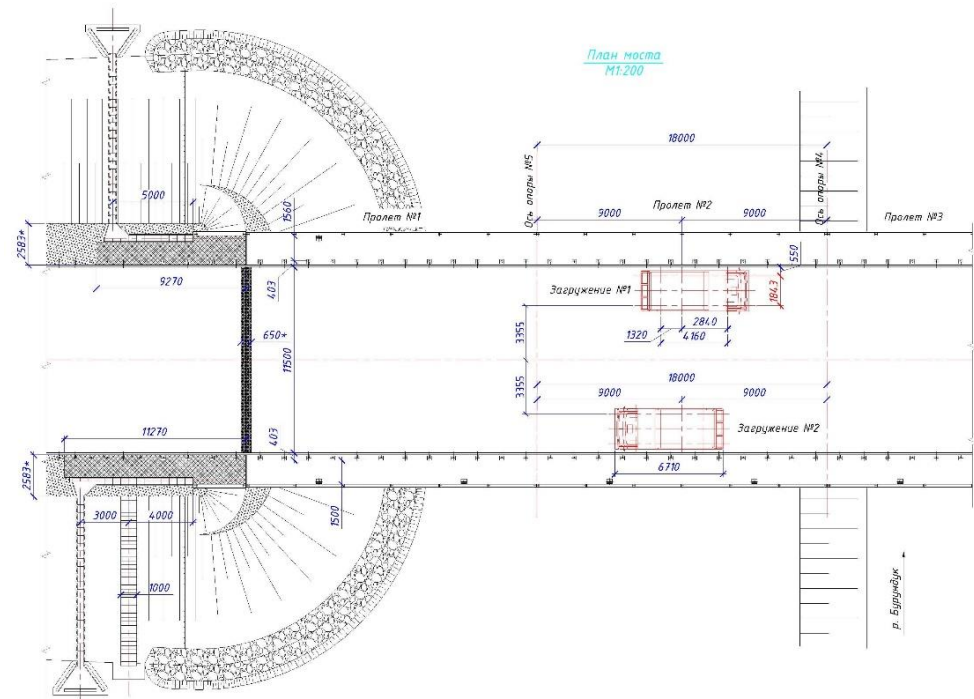


Рис. 2. План моста со схемой расположения испытательной нагрузки в 2 вариантах загрузки. Схема выполнена А.А. Банниковым

Fig. 2. Schematic of bridge with load arrangement in 2 variants. Schematic by A.A. Bannikov

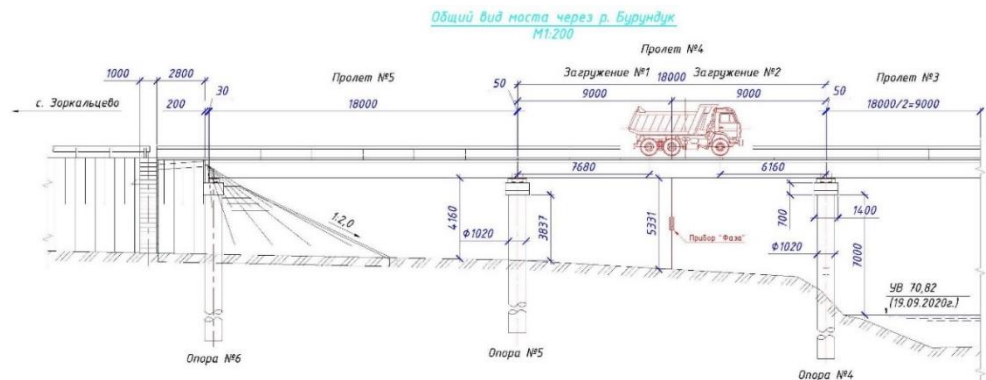


Рис. 3. Фасад моста со схемой расположения испытательной нагрузки и прибора «ФАЗА-1Т». Схема выполнена А.А. Банниковым

Fig. 3. Bridge front with test load arrangement and FAZA-1T device location. Schematic by A.A. Bannikov

При испытаниях по схеме загрузки № 1 максимальное значение прогибов на 7-й балке равнялось 8,4 мм. При проведении второй части испытаний по схеме загрузки № 2 были получены значения прогибов балок с максимальным значением на балке № 1, равным 10,5 мм.

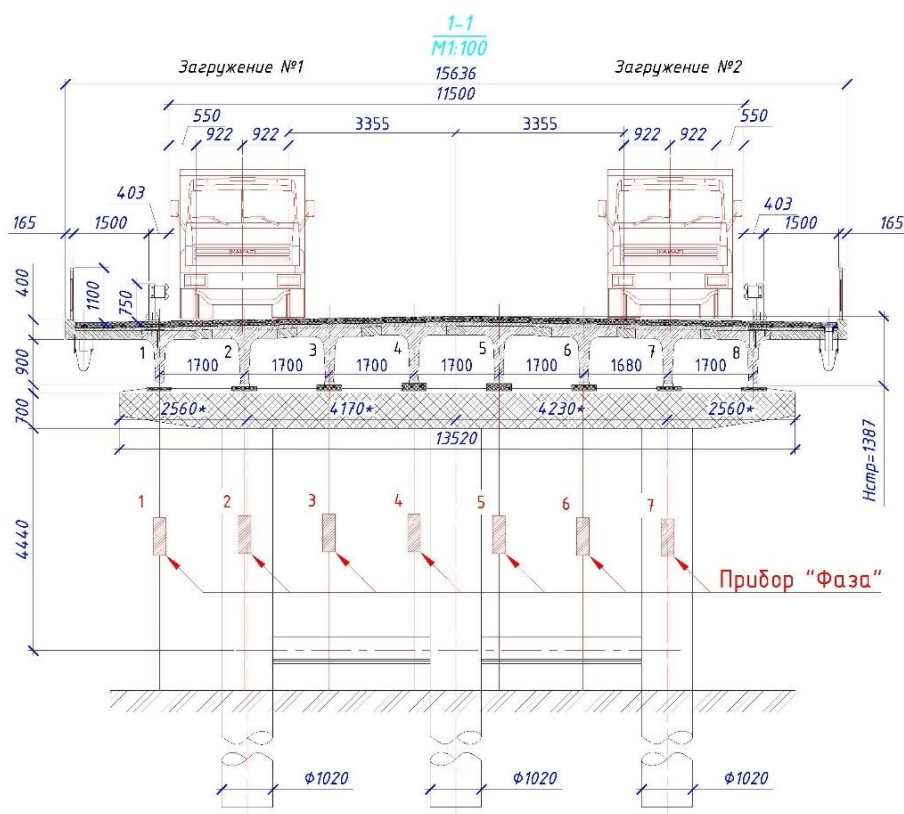


Рис. 4. Поперечный профиль пролетного строения со схемой расположения испытательной нагрузки и прибора «ФАЗА-1Т». Схема выполнена А.А. Банниковым  
 Fig. 4. Cross-section of bridge span with load and FAZA-1T arrangement. Schematic by A.A. Bannikov

Согласно СП 35.13330.2011 (п. 5.43), предельное значение вертикального упругого прогиба пролетного строения составляет 30 мм, полученные в ходе испытаний показания входят в допустимые рамки значений по прогибам.

Результаты испытания с динамической нагрузкой представлены на рис. 5. Приведенные данные показывают, что амплитуда от имитации «удара», при наезде автомобиля на яму, составляет 7,81 Гц в течение 3 с после наезда. Допустимые колебания, согласно СП 35.13330.2011 (п. 5.47), составляют 0,24 Гц.

Недостатками использования прибора «ФАЗА-1Т» являются: необходимость фиксации контактных проволок на неподвижной опоре (или грузе); отсутствие дистанционного управления, сигналы от приборов проходят по специальным проводам, что ограничивает и затрудняет сферу их применения; большое число кабелей связи уменьшает отклик записывающего оборудования; зависимость от погодных условий; сложности при монтаже и демонтаже, большие затраты времени на монтаж и демонтаж приборов; требование работников для фиксации измерений. В настоящее время необходимы более совершенные и инновационные технологии для быстрого и объективного измерения технических параметров мостовых сооружений.

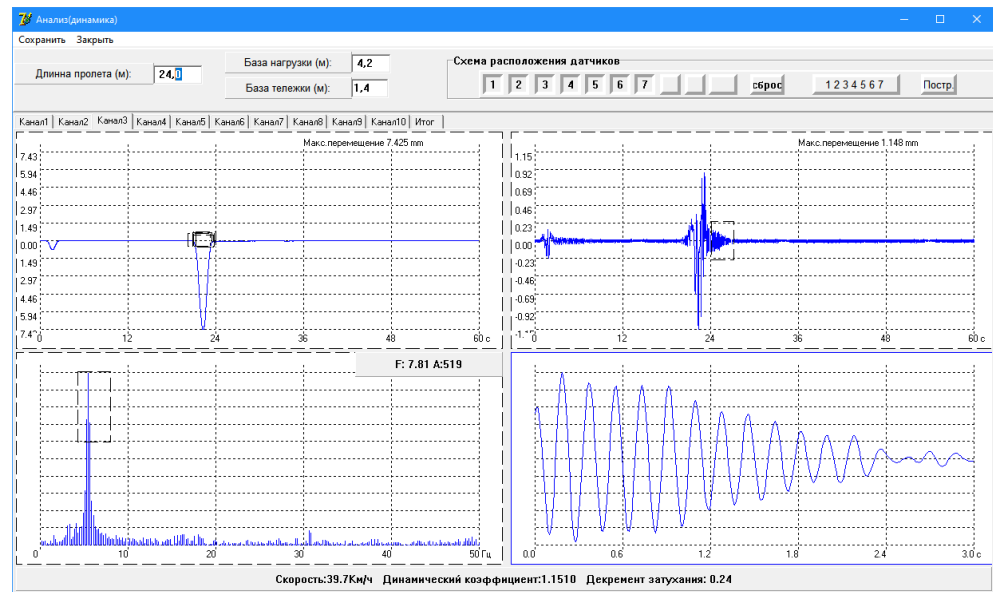


Рис. 5. Расчет динамических характеристик пролетного строения моста при динамической нагрузке. Схема выполнена А.А. Банниковым

Fig. 5. Dynamic characteristics of bridge under dynamic loading. Diagram by A.A. Bannikov

### Исследование конструкции моста при движении автотранспорта с использованием лазерной системы для дистанционного мониторинга

Исследование возможности применения оптической системы на основе метода лазерной спекл-корреляции для мониторинга конструкции моста при движении автотранспорта проходило в начале июня 2022 г. Объектом для апробации новой технологии служил тот же мост через р. Бурундук возле поселка Петрово Томского района. Была разработана методика проведения эксперимента с учетом особенностей работы на местности, определена последовательность работы:

1. Собирается блок визуализации, который состоит из лазера, цифровой камеры с объективом, оптомеханических элементов для позиционирования лазера и камеры. Для удобства размещения предлагается использовать фотографический штатив с тремя степенями свободы, на который устанавливается платформа, к ней на держателях оптики крепятся лазер, макрообъектив и камера. Сложностью работы при мониторинге реального моста является угол наклона (лазер светит под углом вверх), поэтому требуется прочный устойчивый штатив.

2. Осуществляется подключение кабелей питания и передачи данных в персональный компьютер, запускается программное обеспечение для управления скоростной камерой; подключается дизель-генератор или другой источник питания ~220 В, 50 Гц.

3. Юстируется система таким образом, чтобы лазер освещал область интереса (точку мониторинга) и формируемые спекл-паттерны занимали 80–100 % изображения в окне сервисной программы скоростной камеры. Юстировка под углом на практике оказалась значительно сложнее по сравнению с лабо-



раторными условиями, когда платформа с лазером и камерой располагается перпендикулярно штативу, а луч направляется практически параллельно полу лаборатории.

4. Примерно за 100 м до въезда проезжающего автомобиля на мост включается запись скоростной камеры, по окончании записи последовательность изображений передается в персональный компьютер для хранения. Для корректного проведения эксперимента на мосту дежурит наблюдатель, который сообщает оператору о приближении транспортных средств, их виде и количестве или осуществляет видеозапись дорожной обстановки во время мониторинга.

5. Выполняется следующий эксперимент, аналогично п. 4.

6. Осуществляется цифровая обработка записанных последовательно спекл-изображений и графическое представление результатов расчетов.

Для мониторинга моста лазерный луч направлялся на балку пролетного строения моста, чтобы зафиксировать прогибы и колебания при прохождении транспорта. Фотографии и схема эксперимента приведены на рис. 6. Расстояние от области контроля до объектива камеры составляло 15 м. Система питалась от дизель-генератора мощностью ~1 кВт. Мощность лазера, формирующего спекл-изображения, составляла 200 мВт. Эта мощность была максимально возможной для используемого лазера. В работе применялся DPSS-лазер (твердотельный лазер с диодной накачкой) с длиной волны 532 нм и регулируемой выходной мощностью до 200 мВт. Такая мощность была максимально возможной для этого лазера. Лазер обладает малыми массой и габаритами и может быть закреплен на штативе. Спекл-изображения регистрировались скоростной цифровой камерой Phantom Miro C110 с установленным макрообъективом Canon Macro Lens EF 180 мм. Скорость съемки составляла 400 кадров в секунду.

Отраженные спекл-изображения регистрировались с использованием скоростной камеры в течение 22 с с разрешением 512×512 пикселей, проводилась обработка информации с применением разработанного программного обеспечения в среде программирования Matlab. Программа позволяла определять относительное смещение пикселей спекл-изображений при колебании поверхности. В основу метода обработки положено определение максимума коэффициента корреляции спекл-изображений [11] с последующим определением его смещения по отношению к исходному значению.

В условиях помещения с искусственным освещением достаточно мощности лазерного излучения 15–20 мВт для получения спеклов высокой контрастности, как показано на рис. 7. В условиях на местности освещенность объекта и сенсора цифровой камеры оказывается существенно выше, поэтому следовало ожидать, что мощности излучения лазера 20 мВт, достаточной для лабораторных условий, будет недостаточно для условий на местности. На рис. 7 приведены спекл-изображения, полученные при различной мощности лазера подсветки (20, 80, 200 мВт) на местности при солнечном освещении. Для сравнения приведены также спекл-изображения при минимальной мощности 20 мВт в помещении при нормальном искусственном освещении. Расстояние от системы мониторинга до объекта в лабораторных условиях выбрано 15 м, аналогично расстоянию на местности.

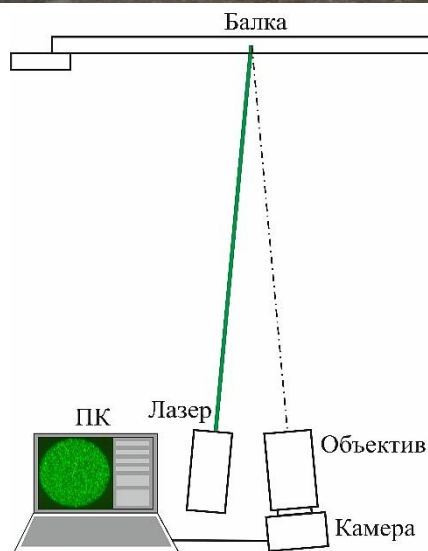


Рис. 6. Схема мониторинга балки пролетного строения моста. Автор фото и схемы Ф.А. Губарев:

1 – область мониторинга; 2 – узел визуализации (лазер, камера, объектив); 3 – портативный компьютер; 4 – дизель-генератор

Fig. 6. Schematic of bridge girder monitoring. Photograph and schematic by F.A. Gubarev:  
1 – monitoring area; 2 – visualization system (laser, camera, lens); 3 – portable computer; 4 – diesel generator

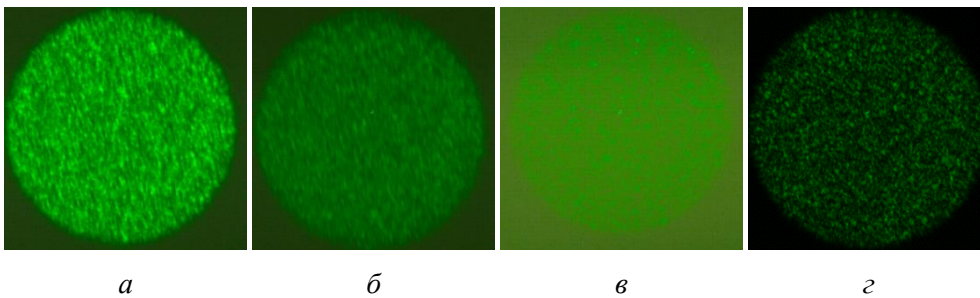


Рис. 7. Спекл-изображения при различных условиях. Фото Ф.А. Губарева:  
*a* – 200 мВт, поле; *б* – 80 мВт, поле; *в* – 20 мВт, поле; *г* – 20 мВт, помещение с искусственным освещением  
 Fig. 7. Speckle images in different conditions. Photograph by F.A. Gubarev:  
*a* – 200 mW field; *b* – 80 mW field; *c* – 20 mW field; *d* – 20 mW, room with artificial light

Приведенные данные показывают, что для получения высококонтрастных спекл-изображений в данных полевых условиях необходима мощность излучения >200 мВт, в то время как для лабораторных условий достаточно 20 мВт. Таким образом, одним из требований к устройству визуализации является мощность используемого лазера. Можно полагать, что для мониторинга более удаленных конструкций мощность лазера должна быть выше. Еще одним требованием является объектив, который должен формировать достаточно крупное изображение спекл-паттерна от поверхности, находящейся на значительном расстоянии. В текущих экспериментах макрообъектива с фокусным расстоянием 180 мм было достаточно. Можно полагать, что при увеличении дальности мониторинга понадобится объектив с большим фокусным расстоянием.

Результаты мониторинга различной дорожной обстановки представлены на рисунках ниже. Записывались последовательности спекл-изображений скоростной камерой и делались отметки, каким автомобилям они соответствовали. На рис. 8 приведен фрагмент последовательности спекл-изображений в процессе мониторинга (эксперимент 1). На рис. 9 приведены расчетные кривые относительного смещения пикселей изображений.

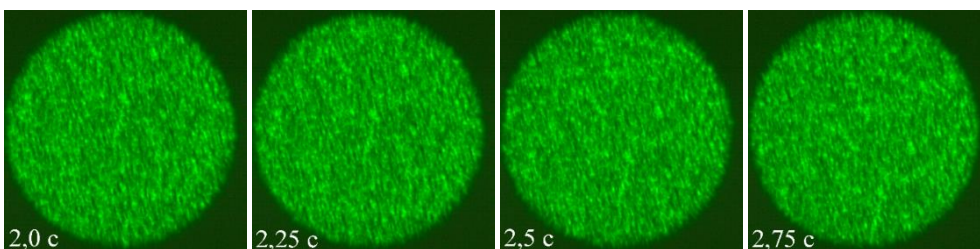


Рис. 8. Спекл-изображения в различные моменты времени (эксперимент 1 на рис. 9). Фото Ф.А. Губарева  
 Fig. 8. Speckle images at different time points (experiment 1 in Fig. 9). Photograph by F.A. Gubarev

На рис. 9, *a* прохождение одного большегрузного автомобиля регистрируется как одно низкочастотное колебание с одним абсолютным максимумом и одним минимумом.

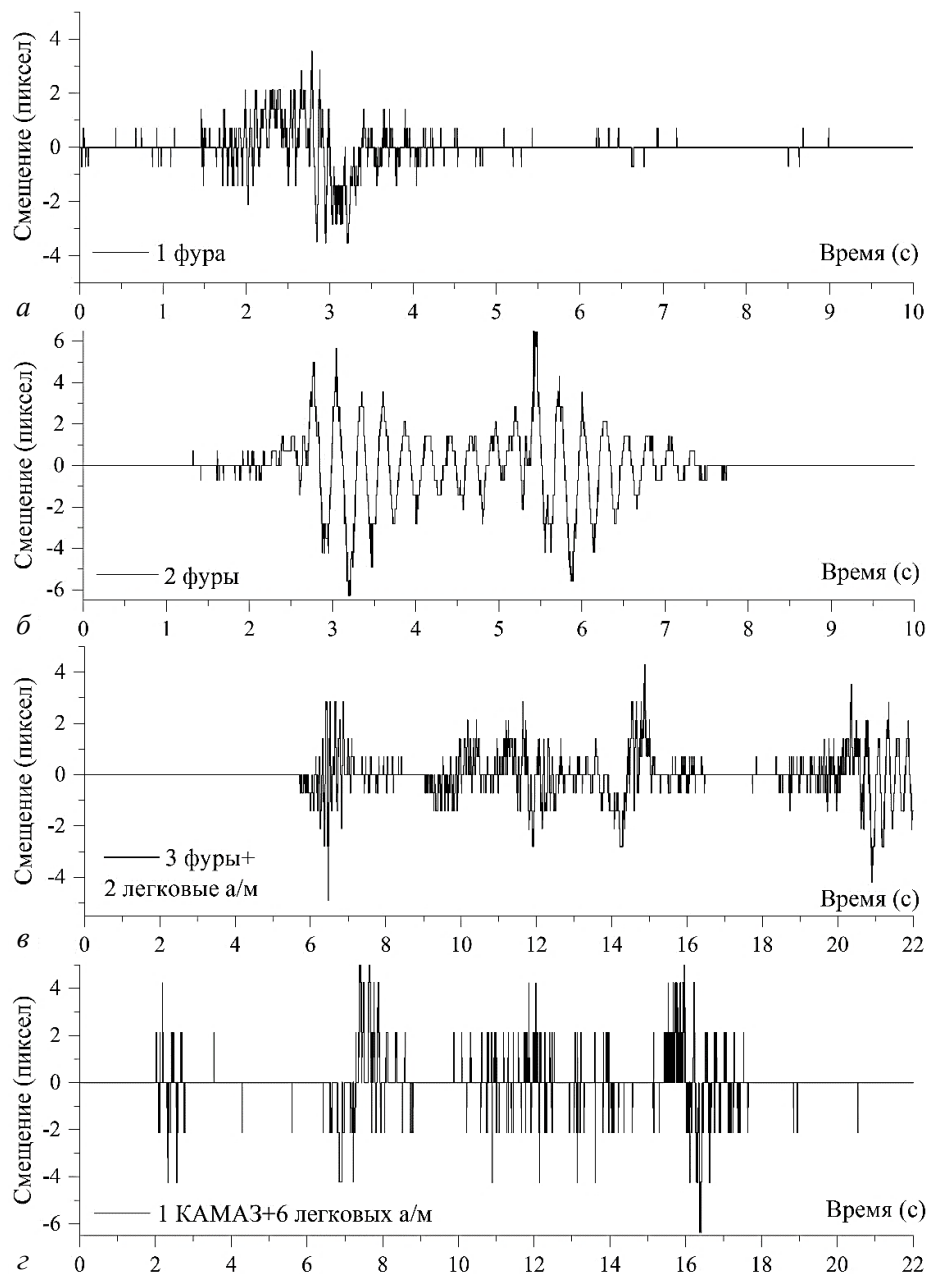


Рис. 9. Смещение спекл-изображений при мониторинге дорожной обстановки. Графики выполнены Ф.А. Губаревым:

*a* – эксперимент 1; *б* – эксперимент 2; *в* – эксперимент 3; *г* – эксперимент 4  
 Fig. 9. Speckle image shift in traffic monitoring. Diagrams by F.A. Gubarev:  
*a* – experiment 1; *b* – experiment 2; *c* – experiment 3; *d* – experiment 4

При прохождении двух большегрузных автомобилей наблюдаются два пика. При прохождении по мосту автомобилей, значительно различающихся по массе, колебания имеют различную амплитуду смещения пикселей. В случае, представленном на рис. 9, в, в моменты времени 6, 13,5 и 20 с по мосту проезжали большегрузные автомобили, в моменты времени 9 и 11 с проезжали легковые автомобили. На рис. 9, з проезжал один порожний грузовик марки «КАМАЗ» и 6 легковых автомобилей. Проезд грузовика отличается от проезда других транспортных средств и соответствует моменту времени 15,5 с. В интервале 6–9 с проезжали два легковых автомобиля одновременно в области наблюдения, что вызвало увеличение амплитуды. В интервале от 10 до 14,5 с проезжали два автомобиля с незначительной разницей во времени.

Анализ полученных графиков смещений на рис. 10 с использованием дискретного ряда Фурье показал, что основные колебания (амплитуда больше 0,1) происходят с частотами до 17 Гц. Примеры результатов расчетов приведены на рис. 10. Полагаем, что спектральный анализ графиков смещения поверхности, полученных с помощью предложенного метода, в будущем позволит анализировать факторы, воздействующие на объект и приводящие к появлению дефектов.

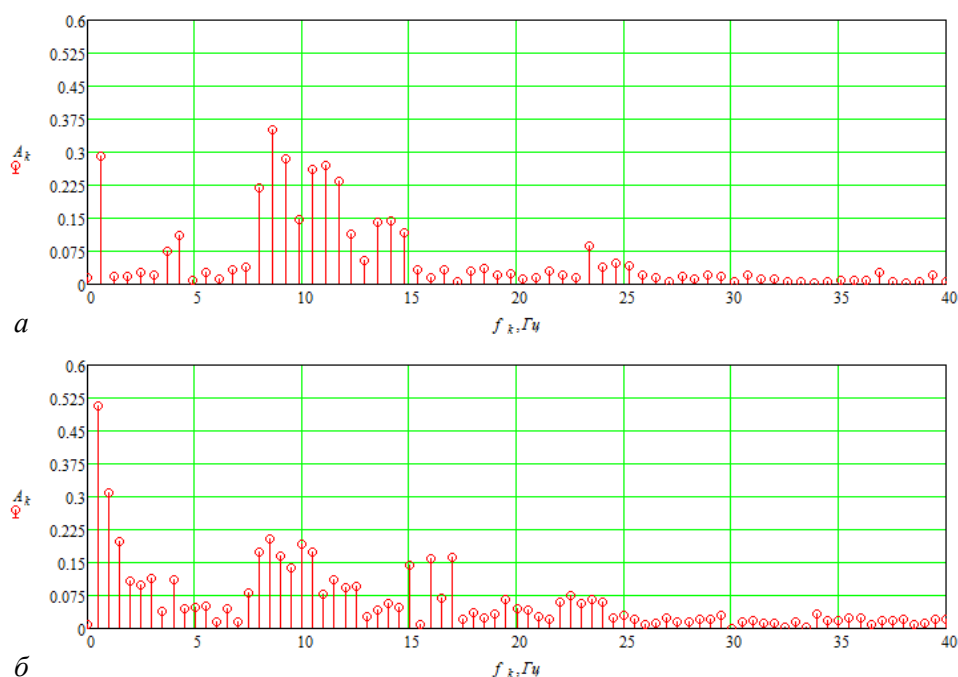


Рис. 10. Спектральный анализ колебаний поверхности балки моста. Графики выполнены Ф.А. Губаревым:

*a* – колебание на рис. 9, *a*; *b* – первое колебание на рис. 9, *в*;  $A_k$  – модуль спектральной составляющей;  $f_k$  – частота соответствующей спектральной составляющей

Fig. 10. Spectral analysis of girder surface vibrations. Diagrams by F.A. Gubarev: *a* – vibration in Fig. 9a; *b* – first vibration in Fig. 9c;  $A_k$  – modulus of spectral component;  $f_k$  – frequency of spectral component

Перспективная методика и лабораторная установка лазерной дистанционной диагностики колебаний/деформаций пролетных конструкций мостов построена на основе метода корреляции лазерных спекл-изображений. Для мониторинга пролетной конструкции на расстоянии 15 м мощность лазера подсветки должна составлять 80–200 мВт. При меньшей мощности контраст спекл-изображений низкий, и цифровая обработка требует более сложных и ресурсозатратных методов. Скорость съемки цифровой камеры должна обеспечивать регистрацию относительно быстрых процессов. Эксперименты показали, что скорости съемки 400 кадров в секунду достаточно для последующего анализа. Минимально допустимая скорость съемки будет подбираться в дальнейшем при оптимизации метода и оборудования для создания приборного варианта системы мониторинга. Вся оптическая часть системы мониторинга помещается на фотографическом штативе и имеет компактные размеры. В полевых условиях система может питаться электроэнергией от дизель-генератора. Потребляемая мощность не превышает 1 кВт, включая портативный компьютер, скоростную камеру и лазер.

### Заключение

В работе сопоставляются действующие и перспективные методики определения состояния мостового сооружения при воздействии на него статических и динамических нагрузок, а именно: определение прогибов основных элементов пролетного строения, амплитуда, возникающая при воздействии динамической и «ударной» нагрузки.

Анализ результатов пробных экспериментов показал перспективу применения методики и оборудования на реальных объектах. Эксперименты проводились на действующем мосту через р. Бурундук в Томской области. Согласно полученным результатам, предлагаемый метод мониторинга позволяет вести подсчет проходящих автомобилей по мосту, при этом различать автомобили различной массы, в частности, возможно отличить легковые автомобили от грузовых.

Проведенные на данном этапе работы показали возможности метода, а также сложности при работе на местности. Продолжение работы в данном направлении связано с оптимизацией оборудования для работ на местности, конструированием прибора для улучшения эргономических и эксплуатационных характеристик, в том числе связанных с настройкой и разработкой новой версии программного обеспечения, которое позволило бы сократить время обработки спекл-изображений.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Банников А.А. Обследование и испытание моста через реку Ангару – памятника архитектуры в Иркутске // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 7 томах, Томск, 21–24 апреля 2020 г. Томск : Изд-во Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2020. С. 12–14. – EDN RVKYLZ.
2. Elugachev P., Esharov E., Shumilov B., Kuduev A. Mathematical Modeling of Cyber-Socially-Physical Systems in Transport // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. V. 246. P. 419–427. DOI 10.1007/978-3-030-81619-3\_48. EDN XUJZKF.

3. *Goodman J.W.* Speckle phenomena in optics: Theory and applications. Englewood, USA : Roberts and Company Publishers, 2007. 387 p.
4. *Peiponen K.E., Myllylä R., Priezhev A.V.* Optical measurement techniques: Innovations for industry and the life sciences. (Springer Series in Optical Sciences, vol. 136). Berlin : Springer, 2009. 158 p.
5. *Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике / под ред. В.П. Рябухо, В.В. Тучина.* Саратов : Сателлит, 2009. 127 с.
6. *Li L., Gubarev F.A., Cao Y., Liushnevskaya I.D., Mostovshchikov A.V.* Laser speckle correlation technique application for remote characterization of metal nanopowders combustion // *Applied Optics*. 2021. V. 60. № 22. P. 6585–6592.
7. *Ли Л., Сытник Ю.Д., Губарев Ф.А., Пеккер Я.С.* Оценка свертываемости плазмы крови методом корреляции лазерных спекл-изображений // *Медицинская техника*. 2018. Т. 52. № 3. С. 23–25.
8. *Li L., Gubarev F.A., Klenovskii M.S., Bloshkina A.I.* Vibration measurement by means of digital speckle correlation // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, 2016. Art. № 7491753.
9. *Bloshkina A.I., Li L., Gubarev F.A., Klenovskii M.S.* Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation // XVII International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Novosibirsk, 2016. P. 637–641.
10. *Важнейшие научные результаты, полученные в 2019–2020 годах в ходе выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, готовые к практическому применению : информационный сборник.* Москва : Российская академия наук, 2022. [182]. ISBN 978-5-907366-45-9. URL : <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=276bc40f-6196-4bff-9b2d-605aeed1d783#content>.
11. *Gubarev F., Li L., Klenovskii M., Glotov A.* Speckle pattern processing by digital image correlation // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 48. Art. № 04003.

#### REFERENCES

1. *Bannikov A.A.* Inspection and testing of bridge over the Angara river, an architectural monument in Irkutsk. In: *Proc. 17th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'*, in 7 vol., Tomsk, 2020. Pp. 12–14. EDN RVKYLZ. (In Russian)
2. *Elugachev P., Esharov E., Shumilov B., Kuduev A.* Mathematical modeling of cyber-socially-physical systems in transport. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 246: 419–427. DOI 10.1007/978-3-030-81619-3\_48. EDN XUJZKF.
3. *Goodman J.W.* Speckle phenomena in optics: Theory and applications. Englewood, USA: Roberts and Company Publishers, 2007. 387 p.
4. *Peiponen K.E., Myllylä R., Priezhev A.V.* Optical measurement techniques: Innovations for industry and the life sciences. (Springer Series in Optical Sciences, vol. 136). Berlin: Springer, 2009. 158 p.
5. *Ryabukho V.P., Tuchin V.V. (Eds)* Coherent-optical methods in measuring technique and biophotonics (in Russian). Saratov: Satellit, 2009. 127 p. (In Russian)
6. *Li L., Gubarev F.A., Cao Y., Liushnevskaya I.D., Mostovshchikov A.V.* Laser speckle correlation technique application for remote characterization of metal nanopowders combustion. *Applied Optics*. 2021; 60 (22): 6585–6592.
7. *Lee L., Sytnik J.D., Gubarev F.A., Pecker J.S.* Assessment of blood plasma coagulation by laser speckle imaging correlation. *Medical Engineering*. 2018; 52 (3): 23–25. (In Russian)
8. *Li L., Gubarev F.A., Klenovskii M.S., Bloshkina A.I.* Vibration measurement by means of digital speckle correlation. In: *Proc. Int. Siberian Conf. on Control and Communications*. Omsk, 2016. 7491753.
9. *Bloshkina A.I., Li L., Gubarev F.A., Klenovskii M.S.* Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation. In: *Proc. 17th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices*. Novosibirsk, 2016. Pp. 637–641.

10. The most important scientific results 2019-2020. Moscow: Russian Academy of Sciences. Available: [www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=276bc40f-6196-4bff-9b2d-605aeea1d783#content](http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=276bc40f-6196-4bff-9b2d-605aeea1d783#content) (In Russian)
11. *Gubarev F., Li L., Klenovskii M., Glotov A.* Speckle pattern processing by digital image correlation. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 48: 04003. (In Russian)

#### **Сведения об авторах**

*Елугачев Павел Александрович*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

*Губарев Федор Александрович*, докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, [gfaddtpu@tpu.ru](mailto:gfaddtpu@tpu.ru)

*Банников Алексей Андреевич*, магистр, инженер-исследователь, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [Lexsew@mail.ru](mailto:Lexsew@mail.ru)

*Мостовщиков Андрей Владимирович*, докт. техн. наук, директор, Научно-исследовательский институт строительных материалов, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [mostovshchikov@tsuab.ru](mailto:mostovshchikov@tsuab.ru)

#### **Authors Details**

*Pavel A. Elugachev*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

*Fyodor A. Gubarev*, DSc, Professor, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya Str., 299053, Sevastopol, Russia, [gfaddtpu@tpu.ru](mailto:gfaddtpu@tpu.ru)

*Aleksei A. Bannikov*, Master of Science, Research Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [Lexsew@mail.ru](mailto:Lexsew@mail.ru)

*Andrei V. Mostovshchikov*, DSc, Director, Research Institute of Building Materials, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [mostovshchikov@tsuab.ru](mailto:mostovshchikov@tsuab.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 15.12.2022  
Одобрена после рецензирования 25.12.2022  
Принята к публикации 20.03.2023

Submitted for publication 15.12.2022  
Approved after review 25.12.2022  
Accepted for publication 20.03.2023