



УДК 624.21

Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста

И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Чаплин И. В., Паторняк А. В., Ефимов С. В. Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 831–838. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838

Аннотация

Статья посвящена актуальным проблемам проектирования, эксплуатации и мониторинга мостовых сооружений в контексте цифровизации транспортной отрасли. **Цель:** Разработка и применение цифровых двойников для повышения надежности и безопасности эксплуатируемых мостовых сооружений. **Метод:** На примере эксплуатируемого железнодорожного моста выделены недостатки традиционных подходов к управлению инфраструктурой. Авторы предлагают решение, основанное на применении цифровых двойников — комплексной системы виртуальных (цифровой информационной и расчетной) моделей и фактического сооружения с обеспечением взаимосвязи между ними за счет различных элементов (систем автоматизированного и периодического мониторинга, надзорных мероприятий и др.) для контроля технического состояния объектов в режиме реального времени. **Результаты:** В статье описана цифровая информационная модель моста, адаптированная для контроля и мониторинга отдельных показателей (деформации, частоты и др.). Особенностью модели является динамическая детализация элементов, что снижает вычислительную нагрузку. Кроме того, предложена автоматизированная оценка не только показания датчиков систем мониторинга с расчетными граничными параметрами, но и с требованиями действующих нормативных документов. Такой подход позволяет оперативно выявлять отклонения, в первую очередь существенно снижающие безопасность движения подвижного состава. **Практическая значимость:** Исследование подтверждает, что цифровые двойники повышают надежность мостов за счет прогнозирования дефектов и оперативного реагирования. Авторы статьи акцентируют внимание на необходимости развития отечественной нормативной базы и внедрения машинного обучения для анализа долгосрочных тенденций изменения технического состояния сооружений. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности цифровых двойников как инструмента обеспечения устойчивости транспортной инфраструктуры в условиях растущих нагрузок.

Ключевые слова: Информационное моделирование, Технологии информационного моделирования (ТИМ), Building Information Modeling (BIM), мостовые сооружения, транспортная инфраструктура, надежность, цифровой двойник, мониторинг.

Введение

Сферы проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений достаточно широко регламентированы, поскольку мосты

относятся к наиболее важным ответственным объектам, составляющим основу транспортной отрасли нашей страны. Мостовые сооружения должны обеспечивать безопасный пропуск обра-

щающейся нагрузки на всем протяжении своего жизненного цикла, что достигается развитием системы эксплуатации и мониторинга [1].

Множество компаний в разных сферах активно внедряют цифровые технологии, включая применение цифровых двойников. Наряду с зарубежным программным обеспечением в последнее время отечественными организациями активно развиваются импортнезависимые информационные продукты. Транспортная отрасль не является исключением, однако на сегодняшний день существует ряд нерешенных проблем, связанных как с проектированием транспортных сооружений, так и с цифровизацией транспортной отрасли:

1. Невысокая эффективность традиционных методов проектирования (технология 2D-CAD). Многоступенчатые процессы проектирования занимают немало времени и ресурсов. Еще больше времени уходит на процессы согласования проекта (инициация → планирование (разработка) → выполнение → контроль → завершение).

2. Ограниченность временных и человеческих ресурсов. Требуется постоянный мониторинг и анализ данных в реальном времени для повышения эффективности систем и оперативного реагирования на изменения. Однако количество линейного персонала и оборудования для данной цели ограничено, что делает ручное отслеживание всех параметров затруднительным или вовсе невозможным.

3. Высокая степень субъективности имеющихся методик прогнозирования развития дефектов на мостовых сооружениях, которые могут оказывать значимое влияние на безопасность движения подвижного состава. Отсутствуют эффективные технологии для моделирования развития и предсказания возникновения и развития аварийных ситуаций.

4. Проблемы в объективной методике проектирования систем мониторинга транспортных сооружений, например риск недостаточного кон-

троля основных несущих элементов или заложения в проект необоснованно большого количества датчиков [2–4].

5. Отсутствие требований к свойствам цифровых двойников, а также порядку и перечню элементов связи между цифровой моделью и реальным объектом.

Часть из вышеприведенных вопросов может быть решена за счет применения единого подхода к регламентированию свойств по разработке цифровых двойников мостов, под которыми понимается комплексная система виртуальных (цифровой информационной и расчетной) моделей и реального сооружения с обеспечением взаимосвязи между ними за счет различных элементов (систем автоматизированного и периодического мониторинга, надзорных мероприятий и др.) для контроля технического состояния объектов в режиме реального времени [5].

Имеющиеся в открытом доступе результаты исследований показали, что применение цифровых двойников снижает затраты на обслуживание и продлевает срок службы основных несущих конструкций мостов за счет своевременного выявления и устранения проблем [6, 7]. Целью исследования является разработка подхода по применению цифровых двойников для мониторинга технического состояния мостовых сооружений на примере эксплуатируемого железнодорожного моста.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран эксплуатируемый металлический железнодорожный мост. На рис. 1 представлена схема данного трехпролетного моста по состоянию до июня 2020 года.

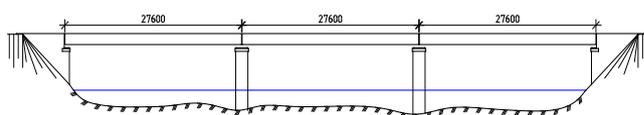


Рис. 1. Схема старого моста до 2020 года

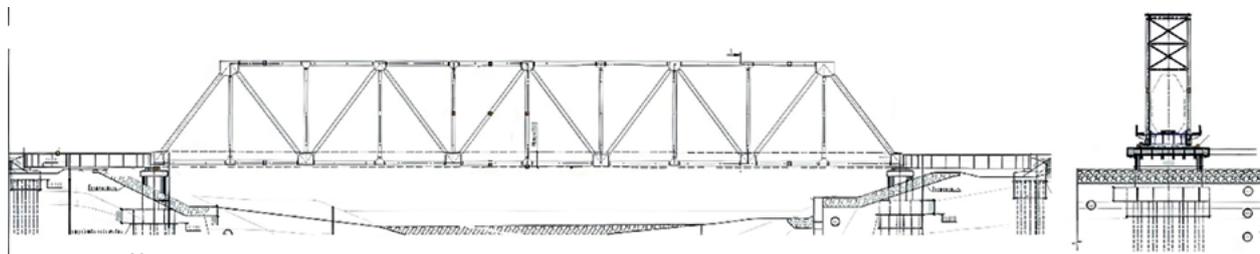


Рис. 2. Схема нового моста с 2020 года

Сооружение было построено в 1930 году, а в 2014 году была выполнена реконструкция объекта. Конструктивно мост представлял собой трехпролетную разрезную систему с металлическими пролетными строениями, выполненными в виде сплошностенчатых балок длиной по 27,6 м. Промежуточные опоры — массивные сборно-монолитные. Фундамент промежуточных опор — массивный, на естественном основании.

В зоне расположения моста русло водотока было сужено и имело неустойчивый характер. При эксплуатации сооружения эти факторы в совокупности с высокой скоростью течения реки в период паводков приводили к интенсивному развитию общего размыва русла и местных размывов у опор. В июне 2020 года при скорости течения водотока 7 м/с произошел подмыв и опрокидывание одной из русловых опор, что привело к обрушению пролетных строений моста. Наличие на данном мостовом переходе качественной системы диагностики и мониторинга его технического состояния позволило бы снизить тяжесть последствий.

За несколько месяцев после обрушения было выполнено строительство нового моста. Основное русло водотока по новой схеме было перекрыто пролетным строением со сквозными главными фермами расчетной длиной 110,0 м, на котором уложены железобетонные плиты безбалластного мостового полотна. Береговые пролетные строения выполнены в виде металлических сплошностенчатых балок с ортотропной плитой проезжей части с ездой на балласте расчетной

длиной 18,2 м. Промежуточные опоры устроены массивными с фундаментом на свайном основании. Схема построенного нового моста представлена на рис. 2.

На сегодняшний день на сооружении установлена система мониторинга, измеряющая ряд показателей (частоту колебаний опор, крен опор, деформации элементов пролетного строения со сквозными главными фермами, температуру элементов, нагрузку на ось от подвижного состава и т. д.), однако их эффективное использование ограничено отсутствием интеграции измеряемых параметров с цифровой моделью объекта, а также недостаточным количеством элементов связей между цифровой моделью и реальным объектом.

На первом этапе решения задачи создания цифрового двойника была разработана цифровая информационная модель моста (рис. 3) в соответствии с нормативными документами [8] и опытом моделирования [9, 10]. Данная модель стала основой для формирования цифрового двойника.

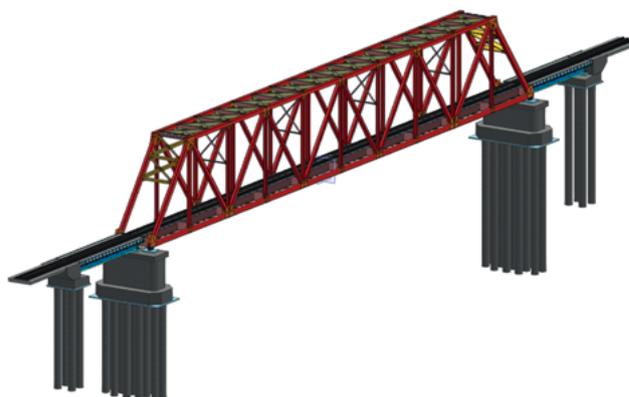


Рис. 3. Цифровая информационная модель моста

Примеры контролируемых параметров элементов моста

Параметр	Кодировка	Нормативные (расчетные) значения	Фактические значения	Результат оценки соответствия
Мостовое полотно				
Толщина балласта под шпалой, м	thicknessBallast	0,25–0,6 м	0,35	соответствует
Тип шпал	typeSleepers	железобетонные/ деревянные	железо- бетонные	соответствует
Тип рельс	typeRail	P65	P65	соответствует
Контрприспособления	counter-fixtures	Да, при $L_M > 50$ / нет, при $L_M < 50$	160	соответствует
Эксцентриситет пути, м	trackEccentricity	от –0,05 м до 0,05	0,01	соответствует
Перекос рельс, м	railSkew	$\leq 0,006$	0,001	соответствует
Эпюра шпал на мосту	diagramSleeper	≥ 2000	2000	соответствует
Пролетные строения				
Превышение узлов опирания на опоре, м	NodePointElevation	от –0,006 до 0,006	0,002	соответствует
Опоры				
Класс бетона по прочности	ConcreteStrength	$\geq B25$	B35	соответствует
Крен опоры вдоль моста, ‰	SupportTiltAlong	$\leq 2,0$	1,0	соответствует
Частота собственных колебаний опоры, Гц	oscillationPeriod	$\geq 2,0$	2,5	соответствует
Уровень местного размыва, м	SoilErosionLevel	$\leq 7,0$	2,0	соответствует

Следует отметить, что установленная система мониторинга измеряет параметры, для большинства из которых не требуется объемная подробная модель. Поэтому одной из особенностей модели цифрового двойника является адаптация детализации и наполненность информацией в зависимости от решаемых задач и анализируемых параметров. В модели цифрового двойника детально могут быть проработаны только анализируемые элементы, а не все сооружение, что снижает вычислительную нагрузку и время на подготовку модели.

Конструкции мостов, как правило, имеют определенный перечень параметров, значения которых должны находиться в заранее назначенных границах. Границы устанавливаются и назначаются на этапе проектирования сооружения в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Отклонения этих параметров за пределы установленных границ будет с большой долей вероятности свидетельствовать

о нарушении нормальной работы конструкции и необходимости проведения восстановительных мероприятий.

На втором этапе исследования для рассматриваемого сооружения был предложен алгоритм автоматизированного анализа ряда параметров для основных конструкций моста (мостовое полотно, пролетные строения и опоры), для которых выделены допустимые диапазоны изменения данных на основании требований нормативных документов и проведения расчетов на действие внешних нагрузок. В таблице представлены примеры контролируемых параметров для выбранных конструкций.

На рис. 4 представлен автоматизированный анализ информации на примере некоторых позиций.

Расчеты конструкций наиболее целесообразно выполнять с построением конечно-элементных моделей, адаптированных и имеющих функции динамического изменения контролируемых пара-

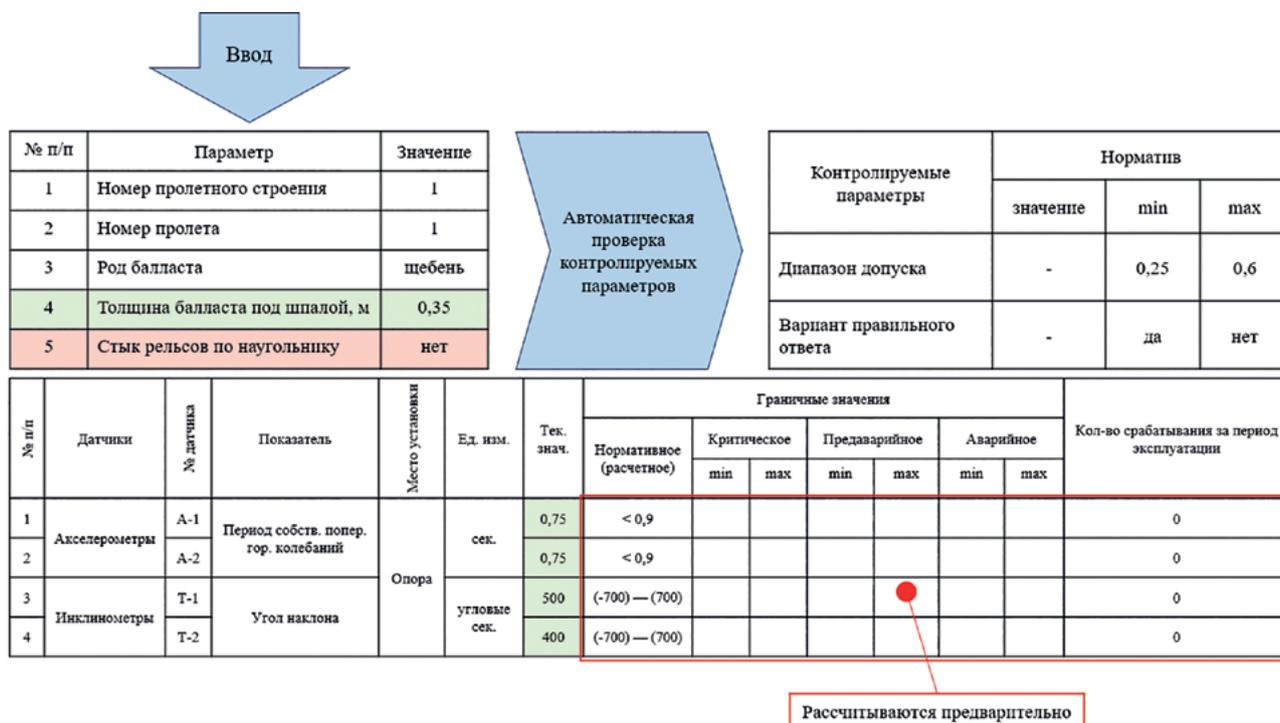


Рис. 4. Пример представления автоматической проверки информации

метров в зависимости от изменения эксплуатационных данных по мосту.

На третьем (завершающем) этапе исследования были частично проработаны элементы связи цифровой модели и реального объекта. Связь (получение данных) от реального объекта с цифровой моделью должна обеспечиваться за счет проведения периодических надзорных и диагностических мероприятий (осмотры, обследования, инструментальная диагностика и др.), а также импорта данных в режиме реального времени с датчиков систем мониторинга.

Связь от цифровой модели к реальному объекту должна осуществляться в виде потока данных о соответствии или несоответствии контролируемых параметров, заложенных в цифровом двойнике (см. таблицу), а также реализации конкретных действий для устранения выявленного несоответствия. Такими элементами связи в структуре ОАО «РЖД» могут являться диспетчер, мостовая или путевая бригада, мостоиспытательная станция и т.д.

Накопление данных в виде причин появления несоответствий, дефектов, сроков их устранения, типа выполненных мероприятий по их устранению позволит снизить субъективность имеющихся методик прогнозирования изменения технического состояния сооружений.

Результаты

В рамках исследования создана цифровая информационная модель моста, которая легла в основу модели цифрового двойника. Модель адаптирована для интеграции с системой мониторинга, что позволяет анализировать контролируемые параметры конструкции в реальном времени. Особенностью такой модели является возможность детализации только анализируемых элементов, что снижает вычислительную нагрузку и ускоряет процесс обработки данных.

Для конструкций мостового полотна, пролетных строений и опор выделены ключевые параметры. Их допустимые диапазоны установлены на основе нормативных требований, что позво-

ляет автоматически идентифицировать отклонения, угрожающие безопасности сооружения.

Предложен алгоритм, и описаны основы методики автоматизированного анализа контролируемых параметров на примере эксплуатируемого железнодорожного моста с выделением источников обмена данными. Предложенный подход является на текущий момент частично реализованным и требует более глубокой проработки в части третьей компоненты цифрового двойника — отладки элементов связей между цифровой моделью и реальным объектом.

Выводы

Применение цифровых двойников для мониторинга мостовых сооружений представляет инновационный подход, улучшающий управление и обслуживание мостов, а возможность контроля появления или развития дефектов приводит к повышению надежности сооружения.

Для назначения режимов эксплуатации сооружений полученную информацию с датчиков системы мониторинга необходимо сравнивать с требованиями норм проектирования, а также с указаниями отраслевых документов по содержанию.

Применение цифровых двойников целесообразно в современных условиях цифровизации строительной отрасли. Необходима модернизация подходов, в том числе в транспортной сфере. Для полной реализации потенциала цифрового двойника любого мостового сооружения требуется тесная кооперация системы мониторинга с цифровой моделью, внедрение алгоритмов машинного обучения и нейросетей для анализа долгосрочных тенденций и прогнозирования оценки технического состояния, а также расширение нормативной базы, регулирующей использование цифровых двойников в транспортной отрасли.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что цифровые двойники — ключевой инструмент для повышения надеж-

ности и безопасности мостовых сооружений в условиях растущих требований к инфраструктуре и цифровизации строительной отрасли.

Список источников

1. Яшнов А. Н. Сквозная система мониторинга технического состояния мостов / А. Н. Яшнов // Новые технологии в мостостроении. — 2022. — С. 114–119.
2. Яшнов А. Н. Развитие мониторинга технического состояния мостов / А. Н. Яшнов, П. Ю. Кузьменков, Е. О. Иванов // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 7. — С. 14–18.
3. Яшнов А. Н. Результаты опытной эксплуатации системы мониторинга металлического решетчатого пролетного строения / А. Н. Яшнов, П. Ю. Кузьменков, Е. О. Иванов // Политранспортные системы. — 2020. — С. 49–53.
4. Иванов А. Н. Мониторинг технического состояния автодорожного моста через реку Пашенку / А. Н. Иванов, П. Ю. Кузьменков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 2(37). — С. 20–27.
5. Safronova M. A. Digital Twin of bridge structures / M. A. Safronova // Молодая наука. — 2024. — Pp. 244–248.
6. Kaewunruen S. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions / S. Kaewunruen, J. Sresakoolchai, W. Ma, O. Phil-Ebosie // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — P. 18.
7. Kasser M. Digital twins in bridge engineering for streamlined maintenance and enhanced sustainability / M. Kasser, M. Viviani, M. Franciosi // Automation in Construction. — 2024. — Vol. 168 (A). — P. 19.
8. Ефимов С. В. Особенности нормативного регулирования в сфере информационного моделирования мостовых сооружений / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк, Н. В. Козак // Вестник гражданских инженеров. — 2025. — № 1(108). — С. 101–110.
9. Ефимов С. В. Применение технологии информационного моделирования при разработке проекта ремонта мостового сооружения / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк,

И. В. Чаплин // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2024. — № 3(60). — С. 113–121.

10. Ефимов С. В. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России на примере разработки проекта реконструкции путепровода / С. В. Ефимов, Е. С. Кокоева, И. В. Чаплин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2025. — Т. 27. — № 2. — С. 226–237.

Дата поступления: 01.07.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

ЧАПЛИН Иван Владимирович — канд. техн. наук;
chaplin@sibgups.ru

ПАТОРНЯК Алексей Владимирович — аспирант;
patornyak_av@mail.ru

ЕФИМОВ Стефан Васильевич — канд. техн. наук;
esvmt@mail.ru

Авторы выражают благодарность Сергею Владимировичу Бочкареву (ООО «Синтез АТ», Санкт-Петербург, Россия, bochkareffsv@yandex.ru) за совместную плодотворную работу над материалами для данной статьи.

Application of a Digital Twin Model in an Operational System for Monitoring Railway Bridges

I. V. Chaplin, A. V. Patornyak, S. V. Efimov

Siberian Transport University, Russia, 191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Chaplin I. V., Patornyak A. V., Efimov S. V. Application of a Digital Twin Model in an Operational System for Monitoring Railway Bridges // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 831–838. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838

Summary

This paper addresses the current issues of the design, operation and monitoring of bridge structures in the context of digitalisation within the transport industry. **Purpose:** To develop digital twins to improve the reliability and safety of operational bridge structures. **Method:** The case study of an operational railway bridge highlights the limitations of traditional infrastructure management approaches. The authors propose a solution based on digital twins: a comprehensive system comprising interconnected virtual models and physical structures, as well as automated and periodic monitoring systems and supervisory measures. This solution allows the technical condition of facilities to be monitored in real time. **Results:** This paper describes a digital information model of the bridge that has been adapted for monitoring individual indicators such as deformation and frequency. A notable feature of the model is its ability to dynamically detail elements, thereby reducing the computational load. Additionally, it proposes an automated assessment of not only the monitoring system sensor readings with calculated boundary parameters, but also of the existing regulatory requirements. This approach enables rapid identification of deviations that significantly reduce the safety of rolling stock movement. **Practical significance:** This study confirms that digital twins enhance the reliability of bridges by predicting defects and enabling a rapid response. The authors emphasize the importance of developing a domestic regulatory framework and implementing machine learning to analyse long-term trends in the technical condition of structures. The study's findings suggest that digital twins have the potential to ensure the sustainability of transport infrastructure in the face of increasing loads.

Keywords: Information modelling, BIM (Building Information Modelling), IMT (Information Modelling Technology), bridge structures, transport infrastructure, reliability, digital twin, monitoring.

References

1. Yashnov A. N. Skvoznaya sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya mostov [End-to-end monitoring system for technical condition of bridges]. *Novye tekhnologii v mostostroenii* [New technologies in bridge construction]. 2022, pp. 114–119. (In Russian)
2. Yashnov A. N., Kuzmenkov P. Yu., Ivanov E. O. Razvitie monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya mostov [Development of technical condition monitoring of bridges]. *Put' i putevoye khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2021, Iss. 7, pp. 14–18. (In Russian)
3. Yashnov A. N., Kuzmenkov P. Yu., Ivanov E. O. Rezul'taty opytной ekspluatatsii sistemy monitoringa metallichesкого reshchatatogo proletnogo stroeniya [Results of trial operation of monitoring system for metal lattice span structure]. *Politransportnye sistemy* [Politransport systems]. 2020, pp. 49–53. (In Russian)
4. Ivanov A. N., Kuzmenkov P. Yu. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya avtodorozhnogo mosta cherez reku Pashenku [Technical condition monitoring of road bridge over the Pashenka River]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Siberian State Transport University]. 2016, Iss. 2(37), pp. 20–27. (In Russian)
5. Safronova M. A. Digital Twin of bridge structures. *Molodaya nauka* [Young science]. 2024, pp. 244–248.
6. Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Ma W., Phil-Ebosie O. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions. *Sustainability*. 2021, vol. 13, p. 18.
7. Kasser M., Viviani M., Franciosi M. Digital twins in bridge engineering for streamlined maintenance and enhanced sustainability. *Automation in Construction*. 2024, vol. 168 (A), p. 19.
8. Efimov S. V., Patornyak A. V., Kozak N. V. Osobnosti normativnogo regulirovaniya v sfere informatsionnogo modelirovaniya mostovykh sooruzheniy [Features of regulatory control in the field of information modeling of bridge structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2025, Iss. 1(108), pp. 101–110. (In Russian)
9. Efimov S. V., Patornyak A. V., Chaplin I. V. Primenenie tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya pri razrabotke proekta remonta mostovogo sooruzheniya [Application of information modeling technology in development of bridge structure repair project]. *Vestnik inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of Engineering School of Far Eastern Federal University]. 2024, Iss. 3(60), pp. 113–121. (In Russian)
10. Efimov S. V., Kokoyeva E. S., Chaplin I. V. Problemy vnedreniya tekhnologiy informatsionnogo modelirovaniya v Rossii na primere razrabotki proekta rekonstruktsii puteprovoda [Problems of implementation of information modeling technologies in Russia on the example of overpass reconstruction project development]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Construction]. 2025, vol. 27, Iss. 2, pp. 226–237. (In Russian)

Received: July 01, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information:

Ivan V. CHAPLIN — PhD in Engineering;

chaplin@sibgups.ru

Aleksey V. PATORNYAK — Postgraduate Student;

patornyak_av@mail.ru

Stefan V. EFIMOV — PhD in Engineering; esvmt@mail.ru