

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 4 (76). Спецвыпуск. 2025 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

Манаков Алексей Леонидович – д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора

Абрамов Андрей Дмитриевич – д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора

Карасев Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

Бессоненко Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Воробьев Валерий Степанович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Виталий Владимирович – д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск

Головнич Александр Константинович – д-р техн. наук, доц., БелГУТ, г. Гомель, Белоруссия

Евсеев Дмитрий Геннадьевич – д-р техн. наук, проф., МИИТ, г. Москва

Ильиных Андрей Степанович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Исаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Караулов Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Комаров Константин Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Кондратьев Сергей Александрович – д-р техн. наук, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Корягин Марк Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Пронозин Яков Александрович – д-р техн. наук, проф., ТИУ, г. Тюмень

Хабаров Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Шахов Сергей Александрович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Шварцфельд Вячеслав Семенович – д-р техн. наук, проф., ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Черный Константин Анатольевич – д-р техн. наук, доц., ПНИПУ, г. Пермь

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор Е. Е. Рыжкова

Корректор А. А. Игумнов – канд. техн. наук

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

www.stu.ru (раздел «Научная деятельность»; журнал «Вестник СГУПС»)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-79268 от 02 ноября 2020 г.

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

S. V. Karasev, Candidate of Engineering, Associate Professor

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

S. A. Bessonenko, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Vorobyev, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. I. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. V. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

A. K. Golovnich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Belarusian State University of Transport, Belarus

D. G. Evseev, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow

A. S. Ilinikh, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. L. Isakov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. M. Karaulov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

K. L. Komarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Kondratyev, Doctor of Engineering, IGD SB RAS, Novosibirsk

K. V. Korolev, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

M. E. Koryagin, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

Y. A. Pronozin, Doctor of Engineering, Professor, TIU, Tyumen

V. I. Khabarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Shakhov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Shvartsfeld, Doctor of Engineering, Professor, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

K. A. Chernyy, Doctor of Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm

English Text Reviewer

I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer E. E. Ryzhkova

Managing Editor A. A. Igumnov, Candidate of Engineering

Layout Designer Yu. V. Bortsova

Cover Designer A. S. Petrenko

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

Web: <http://www.stu.ru> (Scientific Activity section)

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media in 2020.

ISSN: 1815-9265

**Вестник
Сибирского государственного
университета путей сообщения**

Научно-теоретический
журнал

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям 2.9 «Транспорт» и 2.1 «Строительство и архитектура»

№ 4 (76) · Спецвыпуск · 2025 · 16+

Выходит один раз в три месяца. Основан в 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство и архитектура

Белый А. А., Карапетов Э. С., Ерофеев М. Н. Оценка эффективности способов восстановления мостовых сооружений при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним.....	6
Мячин В. Н., Костюков В. Т., Блязиков Р. А. Актуальные проблемы разработки проектов содержания уникальных мостовых сооружений.....	17
Проворная Д. А. Эффективность пассивных демпферов в снижении вибраций моста	26
Мирзаев И., Аскарова Д. С., Хожсахматов С. Ш. Колебания предварительно напряженного пролетного строения железобетонного железнодорожного моста при движении осциллятора	33
Тлявлина Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М., Емельянова Г. А. Особенности проектирования защитных откосов опор мостов через малые водотоки на прижимных участках берегов морей	42
Мячин В. Н., Мирошников Д. В., Шестовицкий Д. А. Методический подход к ускоренной оценке грузоподъемности мостов на автомобильных дорогах в особый период.....	52
Самодурова Т. В., Кузнецова С. В. Планирование работ по содержанию мостовых сооружений на основе мониторинга технического состояния.....	62
Самодурова Т. В., Салиев С. С. Учет особенностей температурного режима поверхности моста при зимнем содержании	70
Бондарь И. С., Ремизов Е. Н. Применение методов тензометрии для исследования напряженно-деформированного состояния балочных пролетных строений	77
Хардиков П. Г., Бондарь И. С., Бирюков Д. В. Анализ и причины обрушения моста через гавань Наньфан-ао в городе Суао уезда Илань на Тайване	87
Камалтдинов В. Р., Марченко М. С., Горячkin В. С., Бойко В. В. Допускаемые отклонения косвенного армирования в анкерных зонах предварительно напряженных конструкций	99
Еськов Д. В., Чаплин И. В., Бочкарев С. В., Ефимов С. В., Легкодимова Н. С., Бирюков А. Н. О проблемах во внедрении технологии цифровых двойников ИССО на сети железных дорог	110

The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

Included in the List of peer-reviewed scientific editions, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences should be published, for scientific specialties 2.9 "Transport" and 2.1 "Construction and Architecture"

Nº 4 (76) · Special issue · 2025 · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Building and Architecture

<i>A. A. Belyi, E. S. Karapetov, M. N. Erofeev.</i> Assessing the effectiveness of restoring bridge structures with accelerated resumption of traffic.....	6
<i>V. N. Myachin, V. T. Kostyukov, R. A. Blyazikov.</i> Current problems of developing projects for the maintenance of unique bridge structures.....	17
<i>D. A. Provornaya.</i> The effectiveness of passive dampers in reducing bridge vibrations.....	26
<i>I. Mirzaev, D. S. Askarova, S. Sh. Khojakhmatov.</i> Fluctuations of prestressed reinforced concrete railway bridge span during oscillator motion.....	33
<i>G. V. Tlyavolina, V. A. Petrov, R. M. Tlyavlin, G. A. Emelianova.</i> Design features of protective slopes of bridge supports across small watercourses on pressure sections of the sea shores.....	42
<i>V. N. Myachin, D. V. Miroshnikov, D. A. Shestovitsky.</i> A methodical approach to the accelerated assessment of the load capacity of bridges on highways in a special period	52
<i>T. V. Samodurova, S. V. Kuznetsova.</i> Planning bridge maintenance work based on technical condition monitoring.....	62
<i>T. V. Samodurova, S. S. Saliev.</i> Accounting for the specifics of the bridge surface temperature regime during winter road maintenance.....	70
<i>I. S. Bondar, E. N. Remizov.</i> Application of strain gauge methods to study the stress-strain state of beam spans	77
<i>P. G. Hardikov, I. S. Bondar, D. V. Biryukov.</i> Analysis and causes of the collapse of the Nanfang Harbor Bridge in Suao Township, Yilan County, Taiwan	87
<i>V. R. Kamaltdinov, M. S. Marchenko, V. S. Goryachkin, V. V. Boiko.</i> Permissible deviations of indirect reinforcement in anchorage zones of prestressed structures	99
<i>D. V. Eskov, I. V. Chaplin, S. V. Bochkarev, S. V. Efimov, N. S. Legkodimova, A. N. Biryukov.</i> About the problems in the implementation of digital twin technology of the man-made facilities on the railway network.....	110

Специальный выпуск журнала посвящен проблемам современного мостостроения и был сформирован по результатам выступлений на ежегодной Международной научно-практической конференции СибНИИ мостов «Исследование, проектирование, строительство и эксплуатация мостов: проблемы и пути их решения на протяжении жизненного цикла», проходившей с 17 по 19 апреля 2025 г. в Сибирском государственном университете путей сообщения. Немаловажно, что конференция посвящена памяти Сергея Александровича Бокарева. Он в свое время, являясь руководителем Сибирской научной школы мостов, совместно с коллегами С. А. Бахтиным, А. Н. Яшновым, Ю. В. Рыбаловым, А. М. Усольцевым, Ю. Н. Мурованным, Д. Н. Цветковым и другими многое сделал для ее развития. Особо необходимо отметить блок разработок СибНИИ мостов для ОАО «РЖД», которые являются одними из ключевых для содержания ИССО: программное обеспечение (АСУ ИССО, АРГО и др.), нормативные документы (инструкции, руководства, технологические схемы ремонта и т. д.) и др. Все это развивает отрасль и непосредственно ОАО «РЖД».

В работе конференции приняли участие представители ведущих транспортных и научных организаций России и зарубежья. Общее количество участников превысило 350 человек из 50 городов России, Индии, Китая, Казахстана, Монголии, Турции, Узбекистана и других стран. Данное мероприятие популяризирует и развивает отечественное мостостроение, а спектр актуальных докладов отражает передовые технологии в отрасли. В специальный выпуск журнала вошли наиболее значимые работы по результатам докладов на конференции.

Ученик Сибирской научной школы мостов
заместитель начальника
Управления пути и сооружений
Центральной дирекции инфраструктуры –
филиала ОАО «РЖД»



Д. В. Еськов



СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 6–16.
The Siberian Transport University Bulletin. 2025. No. 4 (76), special issue. P. 6–16.

Научная статья

УДК 624.21

doi:10.52170/1815-9265_2025_76_6

Оценка эффективности способов восстановления мостовых сооружений при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним

Андрей Анатольевич Белый¹, Эдуард Степанович Карапетов^{2✉},
Михаил Николаевич Ерофеев³

¹ «К2 Инжиниринг», Москва, Россия; Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

³ Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ andbelyi@mail.ru

² eskar@yandex.ru✉

³ erofeeff2007@yandex.ru

Аннотация. Техническое состояние мостовых сооружений (мостов, путепроводов и др.) на автомобильных дорогах является предметом многих исследований в последние годы. Данное состояние изменяется в течение длительного времени, причем в некоторых случаях (в чрезвычайных ситуациях, при военных действиях, внезапных отказах) – весьма быстро. В таких ситуациях требуется ускоренное восстановление движения по указанным транспортным объектам. Зачастую обезд (обход) мостов невозможен или затруднен по ряду причин: экономических, временных, социальных, технических и пр. Классические способы восстановления объектов (устройство нового сооружения или реконструкция существующего моста) весьма длительны по времени и трудоемки либо сложны технически. В таких случаях необходимы решения по восстановлению поврежденных мостовых сооружений в ускоренном формате. Выбор конкретного способа должен производиться по соответствующей методике оценки эффективности, учитывающей прежде всего время восстановления, наличие ресурсов и возможностей, стоимость, а также ряд других моментов.

В настоящей статье представлена методика, базирующаяся на выполненном анализе существующих способов восстановления, сделаны соответствующие выводы. При ее разработке были обоснованы и предложены критерии (показатели) эффективности и их интервальные и средние значения. Результатом работы, помимо разработки методики оценки эффективности, явились сделанные по ней выводы о наиболее целесообразных способах восстановления мостовых сооружений при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним. Полученные результаты исследования могут применяться для принятия решений в чрезвычайных ситуациях на транспортных объектах.

Ключевые слова: техническое состояние, мостовое сооружение, восстановление, способ, оценка эффективности

Для цитирования: Белый А. А., Карапетов Э. С., Ерофеев М. Н. Оценка эффективности способов восстановления мостовых сооружений при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 6–16. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_6.

Original article

Assessing the effectiveness of restoring bridge structures with accelerated resumption of traffic

Andrey A. Belyi¹, Eduard S. Karapetov^{2✉}, Mikhail N. Erofeev³

¹ 'K2 Engineering', Moscow, Russia; Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

² Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

³ Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ andbelyi@mail.ru

² eskar@yandex.ru✉

³ erofeeff2007@yandex.ru

Abstract. The technical condition of bridge structures (bridges, overpasses and others) on highways has been the subject of research for a large number of works in recent years. This technical condition changes over a long time, and in some cases (emergencies, military operations, sudden failures) – very quickly. In such situations, accelerated restoration of traffic on these transport facilities is required. Often, bypassing these bridges is impossible or difficult for a number of reasons: economic, time, social, technical and others. The classical methods of restoring objects (the construction of a new structure or the reconstruction of an existing bridge) are very long in time and laborious or technically complicated. In such cases, solutions are needed to restore damaged bridge structures in accelerated formats. The choice of a specific method should be made according to the appropriate methodology for assessing efficiency, taking into account, first of all, the recovery time, the availability of resources and capabilities, the cost, as well as a number of other points.

This article presents this method, based on the analysis of existing recovery methods, and draws the appropriate conclusions. During the development of the method, performance criteria (indicators) and their interval and mean values were adequately substantiated and proposed. In addition to the proposed methodology for assessing efficiency, the results of the work resulted in conclusions made on it about the most appropriate ways to restore bridge structures with an accelerated resumption of traffic on them. The scope of the study results may be solutions for emergency situations at transport facilities.

Keywords: technical condition, bridge structure, restoration, way (method), assessing efficiency

For citation: Belyi A. A., Karapetov E. S., Erofeev M. N. Assessing the effectiveness of restoring bridge structures with accelerated resumption of traffic. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):6–16. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_6.

Введение

Чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера, стихийные бедствия, а также террористические угрозы и особые периоды функционирования стратегических, прежде всего транспортных, объектов предопределяют специфические требования к содержанию и управлению техническим состоянием автомобильных дорог и, в частности, мостовых сооружений на них [1, 2].

Зачастую складывается ситуация, когда требуется быстрое возобновление прерванного движения транспорта. Оно может потребоваться по следующим причинам [3–7]:

- стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, ураганы, лавины и оползни и пр.);
- техногенные катастрофы (обрушения конструкций моста из-за износа или перегрузки, ДТП с участием тяжелого транспорта, взрывы, теракты, пожары);
- военные и террористические угрозы (целенаправленные разрушения мостов, атаки на стратегические объекты);
- необходимость минимизации экономических потерь (нарушение логистики и транспортных потоков, остановка грузовых перевозок, задержки в поставках стратегически важных товаров);
- социальные факторы (отсутствие альтернативных путей сообщения, необходимость эвакуации или гуманитарной помощи, обеспечение нормальной жизнедеятельности населения);
- строительные и эксплуатационные дефекты (ошибки в проектировании, недоста-

точный контроль за состоянием сооружения, нарушение технологии строительства).

Во всех этих случаях важно оперативно принимать меры по восстановлению моста, чтобы минимизировать ущерб и восстановить нормальное транспортное сообщение.

Актуальность тематики статьи в последние годы только растет [7–10].

Самым простым способом восстановления прерванного движения по мостовому сооружению является обход (объезд) аварийного (разрушенного) объекта. Но по обозначенной выше причине этот способ не всегда эффективен и даже при наличии альтернативных путей может рассматриваться лишь как временный вариант.

Кроме обхода маршрута с неисправным мостом, существуют следующие способы: временное регулирование транспортного потока путем организации реверсивного движения, введение ограничений (массы и скоростей движения транспортных средств), устройство временных светофоров и др. Выбор способа зависит от степени повреждения моста, срочности восстановления и доступных ресурсов. Очевидно, что большая часть из них не обеспечивает нормативного технического состояния и тем более не способствует его улучшению, так как любые функциональные ограничения не являются действием – вектором роста, а лишь служат некими ограничительными мероприятиями.

Способы восстановления мостов включают временные сооружения из местных строительных материалов, а также использование

инвентарных конструкций для устройства табельных разборных мостов, низководных мостов, паромных переправ, комбинацию этих средств [11]. При этом на территории нашей страны таким материалом преимущественно является дерево, прочностные характеристики которого известны своей неоднородностью. Также подобного рода мостовые сооружения отличаются малой надежностью, высокой трудоемкостью.

Исходя из того что основная функция мостовых сооружений – пропуск транспортного потока, восстанавливать прежде всего необходимо именно прерванное движение. Тогда под термином «восстановление мостового сооружения» будем понимать не только восстановление моста или строительство нового, но и *любые действия, направленные на обеспечение требуемого уровня технического состояния* по соответствующим показателям (грузоподъемности, пропускной способности, безопасности, ремонтопригодности и др.).

Таким образом, целью статьи является оценка эффективности способов восстановления мостовых сооружений при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним.

Задачи, которые можно сформулировать в развитие цели статьи, сводятся к следующему:

- анализ существующих способов восстановления мостов (в границах сформулированной цели);
- разработка методики оценки эффективности восстановления мостовых сооружений с соответствующими параметрами и показателями;
- анализ полученных результатов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования было принято техническое состояние мостовых сооружений, разрушенных или поврежденных (полностью или частично), требующих ускоренного восстановления.

Методы исследования: системный анализ, теория надежности и теория вероятностей, теория систем, теория эффективности целенаправленных процессов, методы многокритериальной оптимизации, а также комплекс общенаучных методов исследования. В соответствии с целью и задачами статьи анализы и расчеты выполнены на базе современных теоретических и инструментально-измерительных методов. Натурные

исследования проводились на конкретных мостовых сооружениях с использованием современных средств измерения.

Результаты исследования

Согласно имеющейся терминологии [11] применяются следующие виды восстановления мостовых сооружений: краткосрочное, временное, капитальное обеспечение проезда.

Одним из наиболее известных примеров стадийности использования перечисленных видов восстановления является ситуация с мостом в г. Велиже в Смоленской области (рис. 1), когда в результате повреждения несущих конструкций (трещины и деформации в пролетных строениях) было остановлено движение транспорта, организовано краткосрочное восстановление (наплавной мост), затем временное восстановление (автодорожный разборный мост), а в дальнейшем построен новый мост. История этого моста широко освещалась в прессе (например, в [12]).

Известны и некоторые конструктивные решения по восстановлению мостовых сооружений на военно-автомобильных дорогах с использованием инвентарных конструкций (например, см. [13]).

Выполненный анализ литературных источников позволил сформулировать объединенные вариативные действия по восстановлению мостовых сооружений при снижении уровня технического состояния до критического, указанные на рис. 2. Отдельно отметим, что в схему, приведенную на рис. 2, не были включены некоторые виды восстановления, применяемые на автомобильных дорогах, а именно:

- оборудование переправ (бродов, ледяных, паромных и др.);
- устройство грунтовых перемычек (насыпей) вместо пролетов.

На наш взгляд, указанные мероприятия в общем относятся к восстановлению мостовых сооружений на автомобильных дорогах, однако это действия, направленные на восстановление движения, а не конструктивно-технологические решения по восстановлению дорожных (искусственных) сооружений.

Также отметим, что на схеме красным отмечены те вариативные действия, которые отвечают основной задаче, предъявляемой к мостовым сооружениям при ускоренном восстановлении движения по ним, – фактору времени.



Рис. 1. Повреждения и поэтапное восстановление моста в г. Велиже:

а – повреждения балки пролетного строения; б – инженерная разведка и обеспечение лодочной переправы; в – краткосрочное восстановление (наплавной мост); г – устройство временного большого автодорожного разборного моста (БАРМ); д, е – готовый БАРМ

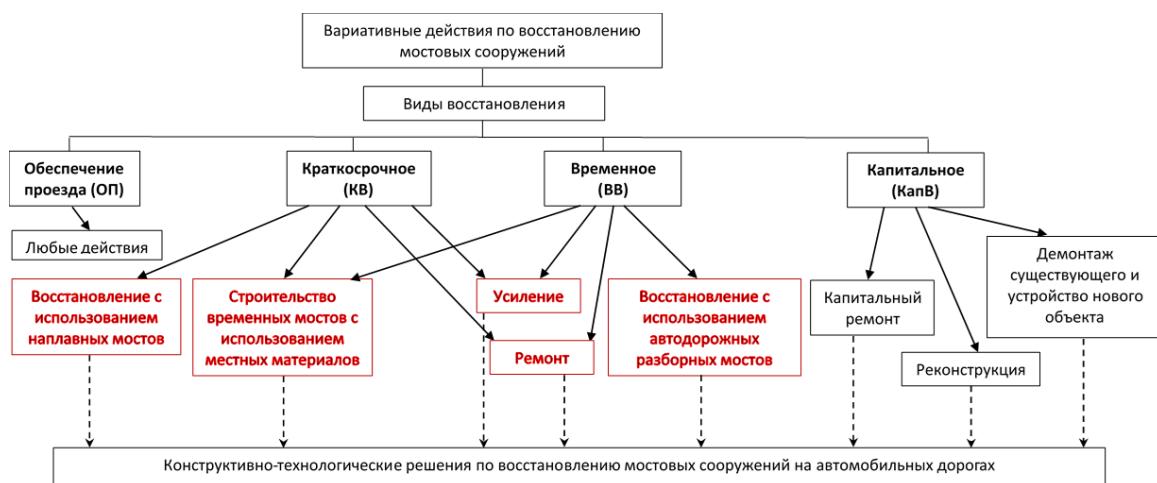


Рис. 2. Вариативные действия по восстановлению мостовых сооружений на автомобильных дорогах

Выбор конкретного вариативного действия при восстановлении разрушенного или поврежденного мостового сооружения будет определяться следующим:

- 1) учетом эффективности вариативного действия;
- 2) областью применения способа восстановления;
- 3) возможностями мостовых и дорожно-строительных организаций и/или спецформирований;
- 4) уровнем технического состояния мостового сооружения и соответствующими функциональными ограничениями.

Оценка эффективности способов восстановления (вариативных действий) мостовых сооружений на автомобильных дорогах должна вестись с использованием определенной *методики оценки эффективности*. Целью такой методики является получение информации о наиболее эффективных способах восстановления мостовых сооружений на автомобильных дорогах с использованием достоверных инструментов обоснования.

В качестве критериев, обосновывающих оценку эффективности вариативных действий, авторами предлагаются следующие:

- время устройства, т. е. время, требуемое для строительства, усиления, ремонта или наводки;
- прирост (приращение) технического состояния – относительный показатель, свидетельствующий о том, насколько увеличилось техническое состояние по сравнению с изначальным;
- трудоемкость;
- стоимость;

- квалификация персонала, требуемого для осуществления работ по строительству, усилию, ремонту или наводке;

- транспортировка и хранение – относительный показатель, характеризующий необходимость и/или специфичность транспортировки и хранения конструкций и отдельных элементов, узлов, требуемых для реализации данного вариативного действия;

- простота монтажных работ – относительный показатель, характеризующий сложность реализации вариативного действия;

- обеспеченность материалами и компонентами – вероятность наличия всех элементов в необходимом количестве.

Критерии были получены и обоснованы авторами в ходе анализа существующих работ по исследованию практических способов управления техническим состоянием мостовых сооружений [14–17], ряда диссертаций по теме статьи, а в отдельных случаях подкреплены экспертными оценками.

На базе упомянутых работ и теоретических обоснований, выполненных лично авторами, были установлены интервалы значений критериев (табл. 1).

В общем виде формула, по которой подсчитывается эффективность того или иного вариативного действия (в абсолютных значениях), выглядит следующим образом:

$$\mathcal{E}_j = \sum_{i=1}^8 k_i \cdot m_i, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_j – эффективность j -го вариативного действия; k_i – количественное значение i -го критерия оценки эффективности в соответствующих единицах оценки; m_i – значимость критерия по табл. 1.

Таблица 1

Значимость критериев оценки эффективности вариативных действий по восстановлению мостовых сооружений

Критерий оценки эффективности	Интервал значений	Принятое значение
1. Время устройства	0,25–0,50	0,37
2. Прирост (приращение) технического состояния	0,25–0,40	0,32
3. Трудоемкость	0,05	0,05
4. Стоимость	0,00–0,10	0,05
5. Квалификация персонала	0,05	0,05
6. Транспортировка и хранение	0,05	0,05
7. Простота монтажных работ	0,00–0,05	0,03
8. Обеспеченность материалами и компонентами (вероятность наличия всех элементов в необходимом количестве)	0,05–0,10	0,08
<i>Итого</i>	–	1,00

В некоторых случаях значения k_i могут быть оценены в абсолютных показателях (например, среднее время устройства, трудоемкость, стоимость), а в других – только в относительных, условных, единицах (простота монтажа, прирост технического состояния). В таком случае выполняется сравнение показателей (минимальный принимается равным единице, максимальный – равным пяти), а описательное сравнение характеризуется как «простое/среднее/тяжелое» для показателя «простота тяжелых работ» или, например, «не требуется / задействуются силы и средства в умеренном порядке / требуется постоянное хранение» для показателя «транспортировка и хранение». Приведение полной расчетной матрицы в настоящей статье не представляется целесообразным по причине избыточности, она описана соавтором статьи в монографии [18] и диссертации на специальную тему.

Ввиду наличия части показателей относительного характера возможна определенная субъективность в оценках. Однако апробация методики авторами почти на 100 объектах позволила оценить ее как достаточно достоверную (разброс значений при расчетах, выполненных разными экспертами, не превышает 5 %).

Для возможности единства оценки предлагается k_i в выражении (1) заменить на удельное значение в относительных параметрах $k_i^{\text{уд}}$, определяемое с учетом экстремума для каждого из набора вариативных действий, оцениваемых по тому или иному критерию.

Предпочтительными экстремумами определены:

- максимум – для оценки прироста технического состояния (чем больше приращение, тем лучше);
- минимум – для всех прочих критериев (чем меньше значение, тем лучше).

Удельное значение эффективности каждого вариативного действия определяется сравнением с экстремумом (минимальным или максимальным значением) по формуле

$$k_i^{\text{уд}} = \begin{cases} \frac{k_i}{\min(k_i)}, \\ \frac{k_i}{\max(k_i)}. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом экстремумов критериев и замены k_i на $k_i^{\text{уд}}$ абсолютные значения эффектив-

ности j -го вариативного действия определяются как

$$\mathcal{E}_j = \sum_{i=1}^8 (k_{i \min}^{\text{уд}} \cdot m_i + \frac{1}{k_{i \max}^{\text{уд}}} \cdot m_i), \quad (3)$$

где $k_{i \min}^{\text{уд}}$ – удельное значение i -го критерия оценки эффективности для критериев с предпочтительными экстремумами, равными минимуму; $k_{i \max}^{\text{уд}}$ – удельное значение i -го критерия оценки эффективности для критериев с предпочтительными экстремумами, равными максимуму.

Относительные (удельные) значения эффективности вариативных действий при восстановлении мостовых сооружений на автомобильных дорогах определяются по формуле

$$\mathcal{E}_j^{\text{уд}} = \frac{\mathcal{E}_j}{\min(\mathcal{E}_j)}. \quad (4)$$

В табл. 2 представлены сводные расчеты по оценке эффективности. Подробные результаты вычислений для различных вариативных действий во избежание избыточности в настоящей статье не приводятся.

Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее эффективными вариативными действиями по обеспечению технического состояния мостовых сооружений на сети автомобильных дорог являются усиление конструкций мостов, временные мосты из местных материалов, монтаж разборных и наводка наплавных мостов. Вместе с тем у каждого из методов есть свои достоинства и недостатки, область применения. Наименее эффективными, что очевидно, являются капитальное строительство новых объектов или переустройство (капитальный ремонт / реконструкция).

Алгоритм выбора способа восстановления мостовых сооружений на автомобильных дорогах представляет собой взаимодействие двух субъектов: собственно мостовых сооружений и возможностей мостовых и дорожно-строительных организаций и/или специформирований с запасами материалов и конструкций. То есть мостовое сооружение в текущем техническом состоянии сравнивается с имеющимися возможностями. Графически область взаимодействий можно представить в виде схемы (рис. 3).

Важная роль принадлежит качественным требованиям. Достигнутый уровень показателей в значительной мере определяет эффективность восстановления мостов на автомобильных дорогах. При этом надо учитывать и

Таблица 2

Оценка эффективности вариативных действий по восстановлению мостовых сооружений на автомобильных дорогах

Вариативное действие	Эффективность в относительных (удельных) единицах оценки		Общая оценка эффективности
	Интервал	Значение	
Ремонт	5,32...11,54	8,15	Средняя
Капитальный ремонт	19,07...40,85	29,02	Низкая
Усиление	1,84...4,16	2,89	Высокая
Реконструкция	30,80...66,19	46,98	Низкая
Восстановление с использованием наплавных мостов	1,00...1,23	1,10	Высокая
Восстановление с использованием автодорожных разборных мостов	1,00...1,13	1,04	Высокая
Демонтаж / новое строительство	35,36...71,83	52,06	Низкая
Строительство временных мостовых сооружений с использованием местных материалов	2,61...5,77	4,05	Средняя/высокая



Рис. 3. Область взаимодействий по восстановлению мостовых сооружений

обратную взаимосвязь, заключающуюся в оценке реализуемости решения имеющимися силами и средствами производственных подразделений.

Однако это не единственный момент: как уже упоминалось ранее, необходимо учитывать область применения способа восстановления, уровень технического состояния, соответствие критериям способа восстановления и др. Так, на

реках с большим судоходством не могут быть применены наплавные переправы; при состояниях, близких к аварийным, некоторые способы в принципе не могут применены или может не хватить прироста (приращения) технического состояния; сроки восстановления (уровень чрезвычайной ситуации или состав транспортного потока) также могут быть не выполнены (не достигают требуемых значений).

Таким образом, общий алгоритм выбора способа восстановления мостовых сооружений на автомобильных дорогах можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 4. После определения способа восстановления исходя из уникальных характеристик моста и прочих условий выбирается КТР на восстановление – конкретный способ ремонта или схема усиления, конкретный автодорожный разборный мост или количество инвентарных конструкций и т. д.

Отдельно стоит отметить вопросы усиления постоянных мостовых сооружений, выделяемые многими исследователями в отдельную категорию. Авторы ведут многолетнюю работу в научной и учебно-методической сферах, посвященную вопросам усиления мостовых сооружений (например, [19, 20]). Отдельная методика оценки эффективности способов усиления мостовых сооружений при аналогичных временных условиях (ускоренных режимах восстановления движения) может быть найдена в работе [2].

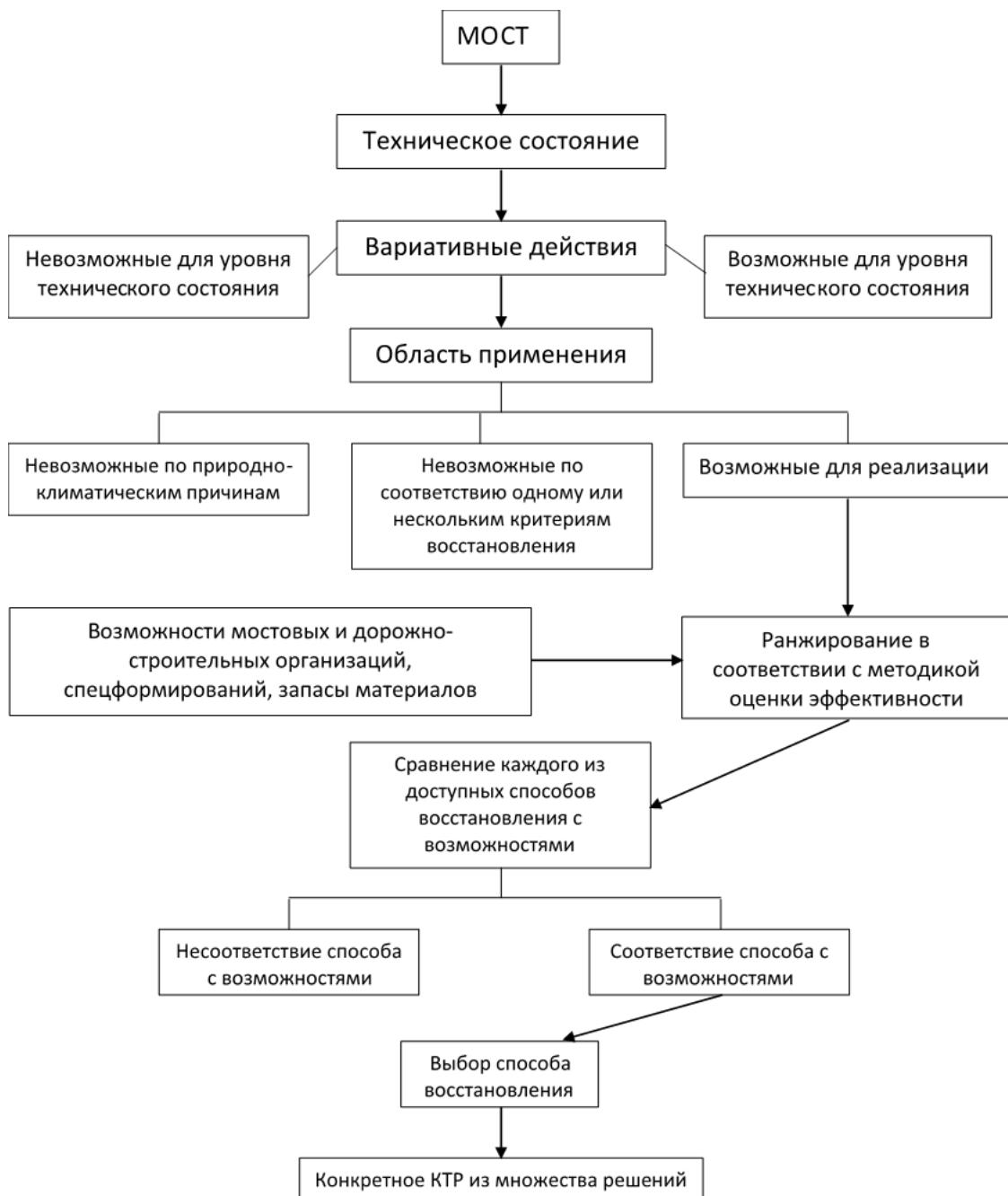


Рис. 4. Алгоритм выбора способа и конкретного КТР восстановления мостовых сооружений на автомобильных дорогах

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ существующих способов восстановления мостов при ускоренном возобновлении движения транспорта по ним, позволивший сформировать первоначальный перечень для дальнейшего исследования.

2. Разработана методика оценки эффективности способов восстановления мостовых сооружений с соответствующими параметрами и показателями, имеющими переменный характер. Апро-

бация данной методики проведена на базе нескольких производственных предприятий.

3. Анализ полученных результатов свидетельствует, что наиболее эффективными вариативными действиями по обеспечению технического состояния мостовых сооружений на сети автомобильных дорог являются усиление конструкций мостов, временные мосты из местных материалов, монтаж разборных и наводка наплавных мостов. Вместе с тем у каждого из методов есть свои достоинства и недостатки, область применения.

Список источников

1. Лазарев Ю. Г., Ермошин Н. А., Сенцов И. В. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путевой навигатор. 2019. № 38 (64). С. 24–31.
2. Белый А. А. Оценка эффективности способов усиления пролетных строений при ускоренном восстановлении движения по автодорожным мостам // Путевой навигатор. 2022. № 50 (76). С. 42–53.
3. Вуколов С. А., Бирюков О. Р., Кравец Д. Ю. Обеспечение живучести мостовых переходов на военно-автомобильных дорогах в современных условиях // Вестник военной академии материально-технического обеспечения. 2016. № 1 (5). С. 46–50.
4. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И. Ю. Майстренко, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, А. В. Кокодеев // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4, № 4. С. 11.
5. Овчинников И. И., Овчинников И. Г. О причинах аварий и повреждений транспортных и других инженерных сооружений // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2021. № 1 (13). С. 186–193.
6. Зайцев А. А., Курбанов А. Х., Хайтбаев В. А. Проблемы транспортной логистики в современных условиях (на примере организации автомобильных грузоперевозок) // Вестник СамГУПС. 2020. № 1 (47). С. 38–45.
7. Аксенкин В. И., Сысоев П. О., Грачев Г. А. Восстановление мостов отдельным мостовым батальоном в Ливанской Республике // Научные проблемы материально-технического обеспечения вооруженных сил Российской Федерации : сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 2017. С. 239–250.
8. Беляев В. В., Ерофеев М. Н., Луговцев Е. А. Восстановление участков дорог и транспортных сооружений в зонах чрезвычайных ситуаций с применением металлических гофрированных конструкций // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 4 (39). С. 96–107.
9. Шамкин Д. В. Восстановление мостов в угрожаемый период // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Ю. И. Кулагенко. 2021. С. 310–312.
10. Пархоменко В. В., Морозова Л. Н., Бушева В. М. Восстановление поврежденных автодорожных мостов Донбасса // Вести Автомобильно-дорожного института. 2023. № 2 (45). С. 22–29.
11. Организация восстановления мостов на военно-автомобильных дорогах : учебник / С. Б. Андрушко, А. А. Белый, О. Р. Бирюков [и др.]. Санкт-Петербург : ВАМТО, 2018. 292 с.
12. Гапенко А. Мост в Велиже отремонтировали. В последний день // Readovka67. Новости Смоленска. URL: <https://smol.aif.ru/incidents/1374339>. Дата публикации: 31.08.2016.
13. Бирюков О. Р., Страйков В. А., Турищев М. А. Применение мостовых инвентарных конструкций гражданского производства при восстановлении мостов на ВАД // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева. 2018. № 2 (14). С. 83–88.
14. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. Москва : НИЦ «Инженер», 2001. 295 с.
15. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий / Министерство путей сообщения РФ, Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2002. 276 с.
16. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений. Москва : АСВ, 2010. 384 с.

17. Чирков В. П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. Москва : Транспорт, 1980. 136 с.
18. Белый А. А., Мячин В. Н., Вуколов С. А. Восстановление и усиление постоянных мостов на военно-автомобильных дорогах : монография. Санкт-Петербург : ВАМТО, 2021. 102 с.
19. Белый А. А., Зайцев В. М., Карапетов Э. С. Опыт эксплуатации усиленных железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга // Науковедение. 2017. Т. 9, № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN317.pdf> (дата обращения: 14.03.2025).
20. Способ усиления в сжатые сроки балок автодорожного железобетонного пролетного строения элементами прокатного профиля / В. Н. Мячин, А. А. Белый, Э. С. Карапетов, Е. С. Цыганкова // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций : сборник научных статей XXIV Научно-методической конференции (19 марта 2020 года). Электрон. текстовые дан. [7,26 Мб] / ВИ(ИТ). Санкт-Петербург, 2020. С. 69–76.

References

1. Lazarev Yu. G., Ermoshin N. A., Sentsov I. V. Road Network Development Planning Based on Multicriteria Optimization Principles. *Road Navigator*. 2019;38(64):24–31. (In Russ.).
2. Belyi A. A. Evaluation of the Effectiveness of Methods for Strengthening Superstructures during Accelerated Restoration of Traffic on Highway Bridges. *Road Navigator*. 2022;50(76):42–53. (In Russ.).
3. Vukolov S. A., Biryukov O. R., Kravets D. Yu. Ensuring the Survivability of Bridge Crossings on Military Highways in Modern Conditions. *Bulletin of the Military Academy of Logistics*. 2016;1(5):46–50. (In Russ.).
4. Maistrenko I. Yu., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Kokodeev A. V. Accidents and Failures of Bridge Structures, Analysis of Their Causes. Part 1. *Transport Structures*. 2017;4(4):11. (In Russ.).
5. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G. On the Causes of Accidents and Damage to Transport and Other Engineering Structures. *Resource-Efficient Technologies in the Regional Construction Complex*. 2021;1(13):186–193. (In Russ.).
6. Zaitsev A. A., Kurbanov A. Kh., Khaitbaev V. A. Problems of Transport Logistics in Modern Conditions (Based on the Organization of Road Freight Transportation). *Bulletin of Samara State University of Railways*. 2020;(47):38–45. (In Russ.).
7. Aksenkin V. I., Sysoev P. O., Grachev G. A. Reconstruction of bridges by a separate bridge battalion in the Lebanese Republic. *Scientific problems of material and technical support of the armed forces of the Russian Federation. Proceedings*. St. Petersburg; 2017. P. 239–250. (In Russ.).
8. Belyaev V. V., Erofeev M. N., Lugovtsev E. A. Reconstruction of road sections and transport structures in emergency zones using corrugated metal structures. *Scientific and educational problems of civil defense*. 2018;(39):96–107. (In Russ.).
9. Shamkin D. V. Bridge restoration during a threat period. *Transport safety issues. Proceedings of the XI International scientific and practical conference*. Edited by Yu. I. Kulazhenko. 2021. P. 310–312. (In Russ.).
10. Parkhomenko V. V., Morozova L. N., Busheva V. M. Restoration of damaged road bridges in Donbass. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2023;(45):22–29. (In Russ.).
11. Andrushko S. B., Belyi A. A., Biryukov O. R. [et al.]. Organization of bridge restoration on military highways. Textbook. St. Petersburg: VAMTO; 2018. 292 p. (In Russ.).
12. Gapeenko A. The bridge in Velizh was repaired. On the last day. *Readovka67. Smolensk News*. URL: <https://smol.aif.ru/incidents/1374339> (In Russ.).
13. Biryukov O. R., Stroykov V. A., Turishchev M. A. Use of civil-made bridge prefabricated structures in the restoration of bridges on the VAD. *Bulletin of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev*. 2018;(14):83–88. (In Russ.).
14. Iosilevsky L. I. Practical methods for managing the reliability of reinforced concrete bridges. Moscow: Research Center ‘Engineer’; 2001. 295 p. (In Russ.).
15. Bokarev S. A. Management of the technical condition of artificial structures of Russian railways based on new information technologies. Ministry of Railways of the Russian Federation, Siberian Transport University. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University; 2002. 276 p. (In Russ.).
16. Raizer V. D. Theory of Reliability of Structures. Moscow: ASV; 2010. 384 p. (In Russ.).
17. Chirkov V. P. Probabilistic Methods for Calculating Reinforced Concrete Bridge Structures. Moscow: Transport; 1980. 136 p. (In Russ.).
18. Belyi A. A., Myachin V. N., Vukolov S. A. Reconstruction and Strengthening of Permanent Bridges on Military Highways: Monograph. St. Petersburg: VAMTO, 2021. 102 p. (In Russ.).
19. Belyi A. A., Zaitsev V. M., Karapetov E. S. Experience in Operating Reinforced Concrete Bridge Structures in St. Petersburg. *Naukovedenie*. 2017;9(3). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN317>. (In Russ.).

20. Myachin V. N., Bely A. A., Karapetyan E. S., Tsygankova E. S. Method of strengthening beams of reinforced concrete road superstructures in a short time using rolled section elements. *Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures. Proceedings of the XXIV Scientific and Methodological Conference* (March 19, 2020). Electronic text data [7.26 MB] / VI (IT). St. Petersburg; 2020. P. 69–76. (In Russ.).

Информация об авторах

А. А. Белый – доктор технических наук, доцент, технический директор ООО «К2 Инжиниринг», доцент кафедры «Мосты и тоннели» Ташкентского государственного транспортного университета.

Э. С. Карапетов – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

М. Н. Ерофеев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта (МИИТ).

Information about the authors

A. A. Belyi – Doctor of Engineering, Associate Professor, Technical Director K2 Engineering; Associate Professor of Bridges and Tunnels Department, Tashkent State Transport University.

E. S. Karapetov – Candidate of Engineering, Associate Professor, Professor of Bridges Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

M. N. Erofeev – Doctor of Engineering, Professor, Professor of Bridges and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT).

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принятa к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья
УДК 656.627.21
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_17

Актуальные проблемы разработки проектов содержания уникальных мостовых сооружений

Валерий Николаевич Мячин ¹, Владимир Тимурович Костюков ^{2✉},
Руслан Александрович Блязиков ³

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский и проектный институт территориального развития и транспортной инфраструктуры, Санкт-Петербург, Россия

¹ vmyachin@ipr.ru

² vkostyukov@ipr.ru✉

³ ruslan@ipr.ru

Аннотация. Содержание является одним из важнейших комплексов работ, выполняемых в течение жизненного цикла автомобильных дорог и искусственных сооружений в их составе. Своевременное и качественное производство всех необходимых работ по содержанию позволяет поддерживать нормативное эксплуатационное состояние сооружения, продлить межремонтный период и требует должного уровня финансирования. Обоснование необходимого и достаточного уровня финансирования базируется на детализированном планировании выполнения работ по содержанию. Один из инструментов планирования – проект содержания, в котором отображается специфика конкретного объекта, определяются требования к эксплуатационному состоянию его элементов, состав, объемы и периодичность выполнения основных видов работ, материально-технические ресурсы, необходимые для выполнения данных видов работ, ежегодные затраты на содержание объекта.

Сложность разработки проектов содержания для уникальных мостовых сооружений связана в первую очередь с нетиповыми конструктивными элементами, их насыщенностью и отсутствием достаточного опыта содержания подобных конструкций. Кроме того, в имеющейся нормативно-технической, сметной и методической документации, регламентирующей содержание мостовых сооружений, имеется ряд недостатков, обусловленных различными причинами: ряд документов устарел, некоторые вопросы содержания в существующих документах отсутствуют вовсе, часть документов содержит противоречивые положения.

В настоящей статье выполнен анализ существующей нормативно-технической, методической и сметной документации, регламентирующей содержание мостовых сооружений, даны рекомендации по ее улучшению, обобщен и проанализирован опыт авторов по разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений, описаны сложности, с которыми сталкиваются разработчики проектов содержания, предложены возможные пути их решения.

Ключевые слова: содержание, эксплуатация, уникальные мостовые сооружения, износ, классификация работ, сметная стоимость работ по содержанию

Для цитирования: Мячин В. Н., Костюков В. Т., Блязиков Р. А. Актуальные проблемы разработки проектов содержания уникальных мостовых сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 17–25. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_17.

Original article

Current problems of developing projects for the maintenance of unique bridge structures

Valery N. Myachin ¹, Vladimir T. Kostyukov ^{2✉}, Ruslan A. Blyazikov ³

^{1, 2, 3} Research and Design Institute of Regional Development and Transportation, Saint-Petersburg, Russia

¹ vmyachin@ipr.ru

² vkostyukov@ipr.ru✉

³ ruslan@ipr.ru

Abstract. Maintenance is one of the most important work packages to be carried out during the life cycle of roads and their construction. The timely and high-quality completion of all required maintenance work allows for the maintenance of the standard operating structure and extends the period between repairs. Timely and high-quality work cannot be carried out without the required level of funding. Justification of the necessary and sufficient level of funding is based on detailed maintenance planning. One of the planning tools is a maintenance project, which

shows the specifics of the specific object, defines the requirements for the operational condition of its elements, composition, amount and frequency of major works, technical resources, which are necessary to achieve these types of work, the annual maintenance costs of the facility.

The complexity of designing the maintenance project for unique bridge structures is primarily due to the unusual design elements, their saturation and lack of experience with such designs. In addition, there are a number of shortcomings in the existing technical, cost and methodological documentation governing the maintenance of bridge structures, caused by various reasons: some documents are out-dated, some issues of maintenance are missing in existing documents, some of the documents have contradictory explanations.

This article analyzes the existing normative, technical, methodological and budget documentation regulating the maintenance of bridge structures, gives recommendations for its improvement, summarizes and analyzes the authors' experience in developing projects for the maintenance of unique bridge structures, described the difficulties faced by developers of content projects, described their possible solutions.

Keywords: maintenance, operation, unique bridge structures, wear, classification of works, estimated cost of maintenance

For citation: Myachin V. N., Kostyukov V. T., Blyazikov R. A. Current problems of developing projects for the maintenance of unique bridge structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):17–25. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_17.

Введение

Мостовое сооружение в процессе эксплуатации постоянно подвергается различным видам эксплуатационных воздействий: природно-климатическим, технологическим, от временных и постоянных нагрузок. В результате этих воздействий элементы конструкции неизбежно начинают претерпевать физический износ (дефекты и повреждения конструкции, деградационные процессы в материалах). Основная задача содержания сооружения – максимально замедлить износ и исключить выход параметров износа за предельно допустимые значения в межремонтный срок. Для выполнения указанной задачи на стадии планирования работ должна быть сформирована соответствующая материально-техническая база и выделены требуемые финансовые ресурсы. Для этого в отрасли разработан ряд документов технического регулирования и нормативно-правовых актов, касающихся планирования основных видов работ по содержанию. Но для уникальных мостовых сооружений разработанные документы недостаточны, так как не учитывают всего многообразия элементов подобных сооружений и, соответственно, не дают возможности запланировать весь комплекс работ, необходимый для качественного и своевременного выполнения основной задачи содержания. Ответы на эти и другие вопросы, связанные с планированием содержания уникального мостового сооружения, должны отображаться в разрабатываемых проектах содержания. То есть одной из целей проекта содержания уникального сооружения является поиск, обоснование, описание и определение затрат на выполнение уникального состава работ для конструктивных элементов, обычно

не встречающихся на средних и больших искусственных сооружениях на автомобильных дорогах.

От корректности и полноты сбора информации об элементах мостового сооружения, имеющейся нормативной, методической и эксплуатационной документации, полноты климатических сведений, качества проработки проекта строительства сооружения существенным образом зависят и решения, принимаемые при разработке проекта содержания.

Вопросам содержания мостовых сооружений, в том числе планированию и организации работ по содержанию, посвящены труды А. В. Сыркова, В. Н. Должникова, О. А. Удатовой, И. Г. Овчинникова, И. И. Овчинникова, А. А. Белого, А. М. Рузова, С. А. Бокарева, А. Н. Яшнова и др. [1–8].

Целью настоящего исследования являлось определение актуальных проблем, возникающих при разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования, а также возможных путей их решения.

В рамках поставленной цели исследования можно сформулировать следующие задачи:

- анализ существующей нормативно-технической документации, используемой при разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений;

- обобщение и анализ накопленного опыта по разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений;

- предложения по совершенствованию нормативно-технической и методической документации по содержанию уникальных мостовых сооружений;

– предложения по совершенствованию подходов при разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений.

Материалы и методы исследования

К материалам исследования относится нормативно-техническая документация, регламентирующая содержание искусственных сооружений на автомобильных дорогах, исходные данные (проектная, рабочая документация на строительство (реконструкцию), эксплуатационная документация и т. д.) и рабочие материалы, использованные авторами при разработке проектов содержания следующих уникальных мостовых сооружений:

– Большого Обуховского и Беляевского мостов на автодороге А-118 «Кольцевая автомобильная дорога вокруг г. Санкт-Петербург»;

– моста на о. Русский через пролив Босфор Восточный;

– Керченского моста;

– Муромского моста через р. Оку и моста через р. Волгу на автодороге М-12 «Восток».

Метод исследования – системный анализ.

В работе выполнен анализ существующей нормативно-технической документации, используемой при разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений, произведено обобщение и выполнен анализ опыта разработки проектов содержания уникальных мостовых сооружений, в которых принимал участие коллектив авторов.

При изучении проектной, рабочей документации на строительство и эксплуатационной документации на мостовые сооружения произведена оценка полноты имеющихся дан-

ных, глубины проработки вопросов последующей эксплуатации (в том числе содержания), достаточности сведений для дальнейшего использования при разработке проектов содержания, отсутствия противоречий с действующей нормативно-технической документацией.

При изучении нормативно-технической документации, регламентирующей содержание мостовых сооружений, проведен анализ:

– наличия и полноты требований к эксплуатационному состоянию элементов мостовых сооружений, рассмотренных в исследовании;

– наличия в [9] работ, направленных на обеспечение требуемого эксплуатационного состояния элементов сооружений, рассмотренных в исследовании;

– наличия в нормативно-технической документации периодичности указанных выше работ;

– наличия технических требований и методических рекомендаций по выполнению указанных выше работ.

Результаты исследования

В результате проведенного исследования выявлен ряд проблем, которые можно разделить на две группы в соответствии с причиной их возникновения (рис. 1).

К первой группе проблем, связанных с недостатками существующей нормативно-технической, сметной, методической документации, используемой при разработке проектов содержания, можно отнести следующие:

1. Отсутствие дифференцированных требований к эксплуатационному состоянию элементов систем мониторинга, демпфирующих

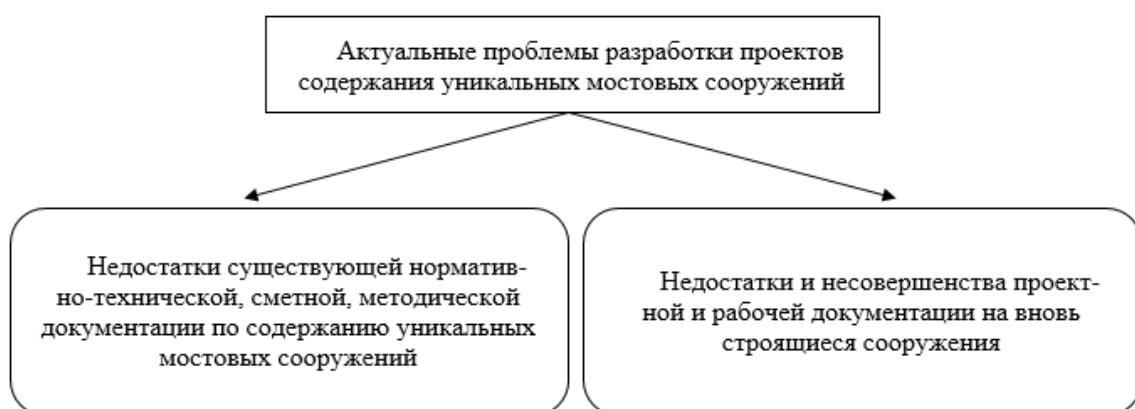


Рис. 1. Классификация выявленных проблем

устройств, прочих механизмов и систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию сооружения. В существующей нормативной документации, регламентирующей требования к эксплуатационному состоянию элементов автомобильных дорог и искусственных сооружений в их составе [10–12], имеется лишь требование о недопустимости выхода из строя систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию мостового сооружения. При этом не указаны критерии, при каких дефектах и нарушениях в работе данных систем они будут считаться вышедшими из строя.

2. Отсутствие в явном виде в [9] работ, связанных с эксплуатацией вантовых и подвесных систем (восстановление целостности оболочек вант, регулировка положения демпферных устройств, замена отдельных прядей, замена наполнителя колпаков вант, замена отдельных вант, регулирование усилий и т. д.).

3. Отсутствие сметных норм на работы по содержанию вантовых и висячих систем, систем мониторинга, очистных сооружений (очистка узлов креплений элементов подвесных и вантовых систем, восстановление целостности оболочек вант различными способами, замена датчиков системы мониторинга, техническое обслуживание элементов системы мониторинга, замена фильтрующей загрузки очистного сооружения, отбор проб воды и т. д.).

4. Неопределенность с корректным учетом затрат, связанных с постоянным, текущим и периодическим осмотрами конструкций мостовых сооружений. Осмотры – основополагающая работа при содержании мостового сооружения, позволяющая выявлять дефекты на ранней стадии развития, отслеживать динамику их развития и планировать мероприятия по их устранению. В действующей нормативно-технической литературе есть и требуемая периодичность выполнения работ по осмотрам, и состав работ. В отраслевом сметном нормативе приведены соответствующие расценки для текущего и периодического осмотров. При этом данные работы выполняются мастером и/или иными инженерно-техническими работниками, оплата труда которых, согласно [13], учитывается в нормативе накладных расходов, в связи с чем включение данных работ в смету будет вызывать удвоение их оплаты. Кроме того, состав трудовых

ресурсов в существующих сметных нормах на осмотр не соответствует фактически необходимой квалификации сотрудников, выполняющих данную работу: в нормах указаны рабочие, хотя весь состав трудовых операций соответствует операциям, выполняемым мостовым мастером.

5. Сложности с проведением оценки уровня содержания уникальных мостовых сооружений, обладающих большой протяженностью и насыщенностью элементами. Основная цель проекта содержания – планирование, ввиду чего в проекте должны быть отражены основные положения по методу оценки и контроля работ, выполняемых подрядными организациями. В соответствии с [14] при оценке уровня содержания мостовое сооружение (за исключением элементов, отнесенных к дорожной части) разбивается на единичные участки, протяженность которых составляет 100 п. м. (за исключением сооружений, имеющих протяженность более 5 км). На каждом участке в зависимости от видов конструктивных элементов, расположенных в его пределах, определяют набор параметров, подлежащих оценке. Общая балльная оценка всего мостового сооружения складывается из суммы этих параметров, ввиду чего даже недопустимые дефекты содержания отдельных элементов не оказывают значимого влияния на общую оценку уровня содержания и позволяют подрядной организации практически безнаказанно не выполнять отдельные виды работ.

Примером данной проблемы может являться опыт содержания трансформаторных подстанций одного из мостовых переходов, рассматриваемых в настоящей статье. В рамках разработанного на стадии рабочей документации проекта эксплуатации моста не были предусмотрены работы по окраске строительных конструкций подстанций, расположенных в подмостовом пространстве. Отсутствие данных работ за двенадцатилетний период эксплуатации в агрессивных условиях привело к сильным коррозионным процессам, в результате которых корпуса трансформаторных подстанций имеют сквозные разрушения металла (рис. 2).

Данный дефект, в соответствии с [9], недопустим, но при этом общее число показателей, подлежащих оценке для подобного сооружения, – 794 шт., ввиду чего балльная оценка



Рис. 2. Состояние трансформаторных подстанций

уровня содержания сооружения, в соответствии с формулой (7) [12], при отсутствии иных дефектов содержания составляет:

$$O_{\text{ис}} = \frac{2N_2 \text{ ис} + 3N_3 \text{ ис} + 4N_4 \text{ ис} + 5N_5 \text{ ис}}{N_{\text{ис}}},$$

где $N_2 \text{ ис}$, $N_3 \text{ ис}$, $N_4 \text{ ис}$, $N_5 \text{ ис}$ – количество оцениваемых показателей дефектов содержания конструктивных элементов искусственного сооружения, на которых зафиксированы оценки 2, 3, 4 и 5 соответственно; $N_{\text{ис}}$ – общее количество оцениваемых показателей дефектов содержания конструктивных элементов искусственного сооружения.

$$O_{\text{ис}} = \frac{2 \cdot 1 + 0 + 0 + 5 \cdot 793}{794} = 4,996.$$

Данная оценка, в соответствии с табл. 2 [12], определяет уровень содержания сооружения как высокий при неудовлетворительном состоянии основного элемента электроснабжения объекта.

6. Разночтения в терминологии, используемой при содержании мостовых сооружений. Согласно [7], в состав работ по содержанию автомобильных дорог и искусственных сооружений в их составе входит: содержание (лет-

ние и всесезонные работы), зимнее содержание, работы по озеленению и прочие работы. При этом в нормативно-технической и методической документации по содержанию мостовых сооружений имеется своя классификация работ по содержанию, отличающаяся от документа к документу:

- уход, надзор, профилактика и планово-предупредительный ремонт [15];
- нормативное и сверхнормативное содержание [15, 16];
- регулярно выполняемые, планово-предупредительные работы, а также работы по оценке технического состояния [17].

7. Моральное устаревание ряда нормативных и методических документов по содержанию мостовых сооружений. Например, Методические рекомендации [15] были утверждены в 1999 г., но действуют и в настоящее время. Большинство положений данного документа, в особенности организационных, уже неактуально.

8. Отсутствие методических рекомендаций по содержанию вантовых и висячих мостов, систем мониторинга.

Вторая группа проблем связана с недостатками проектной и рабочей документации на строительство сооружений. Можно отметить следующее:

1. Зачастую при проектировании новых мостовых сооружений вопросам их последующей эксплуатации уделяется минимальное внимание. В результате возникают ситуации, когда, например, отсутствуют смотровые обустройства насадок высоких опор, что вызывает существенное усложнение планирования организации работ по обслуживанию опорных частей и осмотрам конструкций, ведет к удорожанию данных работ.

2. Важными документами, выпускаемыми при проектировании сооружения и необходимыми для проекта содержания, являются конструкции и руководства по эксплуатации конструктивных элементов мостовых сооружений и систем мониторинга. Например, для вантовых систем это основополагающий документ для разработки раздела «Эксплуатация вантовых систем» в составе проекта содержания, предусмотренного в [16]. Зачастую данные руководства в составе проекта строительства либо отсутствуют, либо выполнены формально и не содержат всей необходимой информации, что вынуждает использовать вместо них положения методических и иных нормативных документов, которые, как правило, содержат осредненные положения, пригодные для средне- и долгосрочного планирования, но не позволяющие определить состав работ, технологию и периодичность их выполнения для конкретного конструктивного решения. Особенно остро встает вопрос в случае применения инновационных материалов и конструкций, опыт эксплуатации которых и соответствующая нормативно-техническая литература отсутствуют.

В качестве решений вышеуказанных проблем можно предложить следующее:

1. С учетом развития и внедрения в мостостроение систем мониторинга инженерных систем и конструкций необходимо совершенствовать и развивать нормативно-техническую и методическую базу по содержанию данных систем, в рамках которой определить требования к их эксплуатационному состоянию, методике выполнения работ по содержанию, составу эксплуатационной документации, выпускаемой при проектировании данных систем.

2. Необходимо произвести корректировку [9], дополнить ее работами, связанными с эксплуатацией вантовых и висячих мостов для исключения возможных разнотечений. В настоящее время при определении видов работ, относящихся к содержанию вантовых и подвесных систем, руководствуются перечнями работ, указанных в [16, 17].

3. Необходимо совершенствовать сметно-нормативную базу по содержанию автомобильных дорог, дополняя сметными нормами на содержание элементов вантовых и висячих мостов, очистных сооружений, систем мониторинга. В настоящее время для определения сметной стоимости данных работ в проектах содержания используются сметные нормы иных отраслей строительства, что сопряжено со множеством нюансов (надбавками и поправочными коэффициентами, учетом подготовительно-складских расходов и т. д.) в их использовании. Другим путем решения данного вопроса может являться использование коммерческих предложений и прайс-листов на подобные работы, что сопряжено с рядом проблем, таких как недостаточное для корректного конъюнктурного анализа количество организаций, готовых выполнять данный вид работ.

4. Решением проблемы, связанной с учетом затрат на работы по постоянному, текущему и периодическим осмотрам, по мнению авторов, является их учет в накладных расходах. При этом в проектах содержания рекомендуется прорабатывать все организационно-технологические аспекты данных работ: определять состав работ, разрабатывать регламенты и технологические карты на осмотры несущих конструкций сооружений, так как способ учета стоимости данных работ никак не влияет на необходимость их выполнения.

5. Наиболее рациональным решением проблемы корректной оценки уровня содержания мостовых сооружений является составление в проектах содержания уникальных мостовых сооружений отдельного регламента по оценке уровня содержания на основании [14], но с учетом всей специфики конструктивного исполнения сооружения.

6. При проектировании уникальных сооружений необходимо контролировать качество не только разрабатываемых проектных решений, но и разрабатываемой эксплуатационной документации на уникальные механизмы и кон-

структур сооружения (вантовые, подвесные системы, опорные части и т. д.), проверять ее на соответствие требованиям действующих стандартов, а также отслеживать полноту предоставляемой информации.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выявлены недостатки существующей нормативно-технической документации, регламентирующей содержание уникальных мостовых сооружений.

2. Обобщен и проанализирован опыт авторов в разработке проектов содержания уникальных мостовых сооружений на различных этапах жизненного цикла, отмечены основные проблемные вопросы, возникающие при разработке проектов.

3. Необходимо постоянно совершенствовать нормативно-техническую, сметную, ме-

тодическую документацию по содержанию автомобильных дорог и искусственных сооружений в их составе с учетом современных конструктивных решений, производить гармонизацию и взаимную увязку положений нормативно-технической литературы, используемых терминов с целью обеспечения единого подхода к содержанию дорожных объектов, исключению разнотечений.

4. При разработке проектов содержания необходимо учитывать множество факторов, как правило индивидуальных для каждого уникального сооружения, таких как техническое состояние сооружения, оцениваемое по [18], и использовать системный подход, основанный на анализе конкретных конструктивных решений, использовании современных технологий выполнения работ, обеспечении требований нормативно-технической литературы.

Список источников

1. Сырков А. В., Утенков О. В. Разработка принципиально новой системы эксплуатации вантовых автодорожных мостов // Дороги и мосты. 2022. № 47/1. С. 260–280.
2. Должников В. Н., Удатова О. А. Повышение безопасности движения по искусственным сооружениям на автомобильных дорогах в зимний период // Инновации и инвестиции. 2023. № 7. С. 321–323.
3. Овчинников И. Г., Кисин Б. С. Опыт обследования, содержания и реконструкции автодорожных мостов в США. Саратов : Изд-во СГТУ, 2003. 102 с.
4. Овчинников И. Г., Овчинников И. И. Анализ причин аварий и повреждений транспортных сооружений // Транспортное строительство. 2010. № 7. С. 2–5.
5. Белый А. А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 64–74.
6. Рузов А. М. Эксплуатация мостового парка. Москва : Академия, 2007. 176 с.
7. Содержание и реконструкция мостов и водопропускных труб на железных дорогах: учебник / С. А. Бокарев, Э. С. Карапетов, С. В. Чижков, А. Н. Яшнов. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. 576 с.
8. Бокарев С. А., Прибытков С. С., Яшнов А. Н. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий : учебное пособие / под ред. С. А. Бокарева. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. 195 с.
9. Классификация работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог : утверждена Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 16 ноября 2012 г. № 402 : (ред. от 20.03.2023).
10. ГОСТ Р 50597–2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 сентября 2017 г. № 1245-ст : дата введения 2018-06-01. Москва : Стандартинформ, 2017. 27 с.
11. ГОСТ Р 59292–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню летнего содержания. Критерии оценки и методы контроля : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 января 2021 г. № 6-ст : дата введения 2021-04-01. Москва : Стандартинформ, 2021. 45 с.
12. ГОСТ Р 59434–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню зимнего содержания. Критерии оценки и методы контроля : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства

по техническому регулированию и метрологии от 20 апреля 2021 г. № 229-ст : дата введения 2021-06-01. Москва : Стандартинформ, 2021. 19 с.

13. Методические рекомендации по определению стоимости работ по содержанию автомобильных дорог федерального значения : введены в действие распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 28 марта 2014 г. № МС-25-р : дата введения 2014-03-28. Москва, 2014.

14. ГОСТ Р 59982-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Эксплуатация. Правила оценки и приемки : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 января 2022 г. № 11-ст : дата введения 2022-03-01. Москва : Стандартинформ, 2022. 45 с.

15. Методические рекомендации по содержанию мостовых сооружений на автомобильных дорогах : введены в действие распоряжением Российского дорожного агентства от 30 августа 1999 г. № 7Р : дата введения 1999-09-01. Москва : Информавтодор, 1999. 86 с.

16. ГОСТ Р 59629-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Системы вантовые мостовых сооружений. Требования к эксплуатации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 августа 2021 г. № 731-ст : дата утверждения 2021-10-01. Москва : Стандартинформ, 2021. 31 с.

17. ГОСТ 59200-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мосты и трубы. Капитальный ремонт, ремонт и содержание : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2021 г. № 690-ст : дата утверждения 2021-09-01. Москва : Стандартинформ, 2021. 41 с.

18. ОДМ 218.3.014-2011. Методика оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах : рекомендована к применению Распоряжением Росавтодора 17.11.2011 г. № 883-р : дата введения 2012-01-01. Москва : Информавтодор, 2013.79 с.

19. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов : утверждена распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации 18 апреля 2001 г. № 79-р. Москва : Информавтодор, 2002. 140 с.

References

1. Syrkov A. V., Utentov O. V. Development of a fundamentally new system of cable-stayed road bridges operation. *Roads and Bridges*. 2022;(47/1):260–280. (In Russ.).
2. Doljikov V. N., Udotova O. A. Improving traffic safety on artificial structures on highways in winter. *Innovation and Investment*. 2023;(7):321–323. (In Russ.).
3. Ovchinnikov I. G., Kisim B. S. Experience in the survey, maintenance and reconstruction of road bridges in the United States. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2003. 102 p. (In Russ.).
4. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I. The analysis of the reasons of failures and damages of transport constructions. *Transport Construction*. 2010;(7):2–5. (In Russ.).
5. Belyi A. A. Probability forecasting of the technical condition of reinforced concrete bridge constructions operated in megalopolis. *Civil Engineers Bulletin*. 2017;(2-61):64–74. (In Russ.).
6. Ruzov A. M. Operation of the bridge park. Moscow: Akademiya; 2007. 176 p. (In Russ.).
7. Bokarev S. A., Karapetov E. S., Chizhov S. V., Yashnov A. N. Maintenance and reconstruction of bridges and culverts on railways. Textbook. Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport; 2019. 576 p. (In Russ.).
8. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Yashnov A. N. Edited by S. A. Bokarev. Maintenance of engineering structures using information technologies. Training manual. Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport; 2009. 195 p. (In Russ.).
9. Classification of works on capital repairs, repair and maintenance of automobile roads. Approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 16.11.2012 No. 402 (as amended by 20.03.2023). (In Russ.).
10. GOST R 50597-2017. Automobile roads and streets. The requirements to the level of maintenance satisfied the traffic safety. Methods of testing: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated 26.09.2017 No. 1245-ст). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from 01.06.2018. Moscow: Standartinform; 2017. 27 p. (In Russ.).
11. GOST R 59292-2021. Automobile roads of general use. Requirements for summer maintenance level. Evaluation criteria and control methods: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated 15.01.2021 No. 6-ст). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from 01.04.2021. Moscow: Standartinform; 2021. 45 p. (In Russ.).
12. GOST R 59434-2021. Automobile roads of general use. Requirements for winter maintenance level. Evaluation criteria and control methods: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification

(protocol dated 20.04.2021 No. 229-st). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from 01.06.2021. Moscow: Standartinform; 2021. 19 p. (In Russ.).

13. Recommendations for determining the cost of maintenance work on federal highways: put into effect by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 28.03.2014 No. MS-25-r: date of introduction 2014-03-28. (In Russ.).

14. GOST R 59982-2022. Automobile roads of general use. Exploitation. Evaluation and acceptance rules: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated 18.01.2022 No. 11-st). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from March 01.03. 2022. Moscow: Standartinform; 2022. 45 p. (In Russ.).

15. Recommendation for maintenance of Highway bridges: put into effect by the order of the Russian Road Agency dated 30.08.1999 No. 7P: date of introduction 1999-09-01. Moscow: Informavtodor; 1999. 86 p. (In Russ.).

16. GOST R 59629-2021. Automobile roads of general use. Cable-stayed systems of bridge structures. Operation requirements: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated 20.08.2021 No. 731-st). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from October 01.10.2021. Moscow: Standartinform; 2021. 31 p. (In Russ.).

17. GOST 59200-2021. Automobile roads of general use. Bridges and culverts. Capital repair, repair and maintenance. Technical regulations: Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated 05.08. 2021 No. 690-st). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from 01.09.2021. Moscow: Standartinform; 2021. 41 p. (In Russ.).

18. ODM 218.3.014-2011. Methodology for assessing the technical condition of bridge structures on roads: recommended for use by the order of the Federal Road Agency dated 17.11. 2011 No 883-r: date of introduction 2012-01-01. Moscow: Informavtodor; 2013. 79 p. (In Russ.).

19. Method for Calculating Forecasts of Service Life of Reinforced Concrete Bridge Structures for Roads and Highways: approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation on 18.04.2001 No. 79-r. Moscow: Informavtodor; 2002. 140 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. Н. Мячин – доктор технических наук, профессор, директор по научной работе Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры.

В. Т. Костюков – главный специалист дорожно-мостового департамента Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры.

Р. А. Блязиков – заместитель генерального директора – руководитель дорожно-мостового департамента Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры.

Information about the authors

V. N. Myachin – Doctor of Engineering, Professor, Director of Research at the Research and Design Institute of Regional Development and Transportation.

V. T. Kostyukov – Chief Specialist of the Road and Bridge Department at the Research and Design Institute of Regional Development and Transportation.

R. A. Blyazikov – Deputy General Director – Head of Department at the Research and Design Institute of Regional Development and Transportation.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 19.08.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 19.08.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья
УДК 624.042.8
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_26

Эффективность пассивных демпферов в снижении вибраций моста

Дарья Андреевна Проворная

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, provornayadarya@yandex.ru

Аннотация. Для снижения динамического отклика пролетных строений от воздействия подвижной нагрузки в образовавшейся практике применяется один из основных способов – регулирование массы пролетных строений (как правило, в сторону увеличения). В этом подходе важную роль играет анализ динамики системы подвижной состав – пролетное строение. Другим способом снижения динамического отклика данной системы является установка специальных демпфирующих устройств, как пассивных, так и активных. Применение активного гасителя позволяет добиться максимального эффекта в снижении колебаний, однако конструкция такого гасителя обладает определенной сложностью, дорога и ненадежна в эксплуатации. Более экономичным является применение гасителей пассивного типа, имеющих свойства автономности.

В статье рассмотрены варианты систем применения динамических гасителей колебаний. Целью исследования является прогнозирование и оптимизация применения демпферов для минимизации неблагоприятных воздействий на мостовые сооружения.

Виброизоляционные системы, использующие динамические гасители колебаний, достигают максимальной эффективности лишь при условии тщательного подбора и оптимизации ключевых параметров управления. К ним относятся: диапазон частот; соотношение частот настройки; величина демпфирования; число демпферов, применяемых в виброизоляционной системе моста. Если эти параметры выбраны некорректно, система может работать неоптимально, не обеспечивая требуемого снижения вибраций. При оптимизации этих параметров гасители колебаний размещаются симметрично относительно центрального пролета моста с определенным шагом.

На основании проведенного анализа показано, что эффективность в уменьшении откликов моста снижается с увеличением интервала между демпферами и при установке дальше от середины. Самый массивный демпфер располагается в середине пролета, а по мере удаления от центра масса демпферов уменьшается. Максимальное число демпферов определяется длиной моста и шагом их установки. Важно отметить, что с увеличением их количества достигаются оптимальные значения диапазона и соотношения частот настройки.

Ключевые слова: демпфирование, вибрации, колебания, мост, снижение отклика

Для цитирования: Проворная Д. А. Эффективность пассивных демпферов в снижении вибраций моста // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 26–32. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_26.

Original article

The effectiveness of passive dampers in reducing bridge vibrations

Darya A. Provornaya

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, provornayadarya@yandex.ru

Abstract. To reduce the dynamic response of superstructures from the impact of a moving load, one of the main methods used in the established practice is to regulate the mass of superstructures, as a rule, in the direction of increase. In this approach, an important role is played by the analysis of dynamics of the rolling stock – superstructure system. Another way to reduce the dynamic response of the rolling stock-superstructure system is to install special damping devices, both passive and active. The use of an active damper makes it possible to achieve maximum effect in reducing vibrations, however, the design of such a damper has a certain complexity, is expensive and unreliable in operation. Currently, it is more economical to use passive type dampers with self-contained properties.

The article discusses various options for using dynamic vibration dampers in different systems. The goal of the research is to predict and optimize the use of these dampers in order to minimize any negative effects on bridge structures.

Vibration isolation systems that use dynamic vibration dampers can achieve maximum efficiency if key control parameters are carefully selected and optimized. These parameters include: the frequency range, the ratio of tuning frequencies, the amount of damping, and the number of dampers used in the vibration isolation system for the bridge. If these parameters are not selected correctly, the system may not function optimally and may not provide the required level

of vibration reduction. To optimize these parameters, the vibration dampers should be placed symmetrically relative to the center of the bridge, with a certain spacing.

Based on the analysis, it is shown that the effectiveness in reducing bridge responses decreases with increasing interval between dampers and when installed further from the middle. The most massive damper is located in the middle of the span, and as you move away from the center, the mass of the dampers decreases. The maximum number of dampers is determined by the length of the bridge and the pitch of their installation. It is important to note that as their number increases, the optimal values of the tuning range and frequency ratios increase.

Keywords: damping, vibration, vibration, bridge, reduction efficiency

For citation: Provornaya D. A. The effectiveness of passive dampers in reducing bridge vibrations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):26–32. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_26.

Введение

Переменные нагрузки от железнодорожного транспорта, перемещающиеся с определенной периодичностью, способны вызвать в мостовых конструкциях резонансные явления, приводящие к нежелательным колебаниям. Для предотвращения таких непредсказуемых откликов применяются демпфирующие устройства [1]. С целью контроля вибрации мостов при движущихся нагрузках С. С. Lin, J. F. Wang, B. L. Chen представили исследование, в котором управление вибрацией, вызванной поездом, на мостах высокоскоростных железных дорог было достигнуто оснащением несколькими настроенными демпферами массы [2]. Такие пассивные динамические гасители колебаний были установлены на участке среднего пролета длиной 40 м железнодорожного моста. Авторы смоделировали поезд в виде упрощенной системы пружинно-амортизирующей массы, движущейся с постоянной скоростью, а мост – в виде балки Эйлера – Бернулли. В результате пришли к выводу, что максимальное уменьшение вертикального смещения, обеспечиваемое демпфером, достигает 21 %, также при этом свободные колебания затухают быстрее, чем в системе без демпфера. Тем не менее вертикальные ускорения оставались почти одинаковыми в обеих ситуациях, что объяснялось тем фактом, что время прохождения транспортного средства слишком мало для увеличения движения массы динамического гасителя колебаний.

J. F. Wang, C. C. Lin, B. L. Chen в работе [3] изучили применимость пассивных настроенных амортизаторов массы на мостах пролетом 30 и 40 м для подавления вибраций, вызванных высокоскоростными поездами, движущимися с постоянной скоростью. Реакции моста были проверены с точки зрения вертикальных перемещений, ускорений и конечного поворота моста, в то время как для поезда было проанализировано вертикальное ускорение,

чтобы обеспечить безопасность моста и комфорт пассажиров. В середине пролета каждого моста рассматривался один гаситель, соответствующий максимальной амплитуде первой моды. Критериальные параметры гасителя колебаний были настроены таким образом, чтобы уравнять частоту демпфера с модальной частотой. На основе численного моделирования были сделаны некоторые выводы:

1. Основные резонансные скорости для моста с пролетом 30 м больше, чем для моста с пролетом 40 м, с расчетной скоростью поезда 350 км/ч. Применение пассивного демпфера приводит к меньшему снижению отклика для моста с пролетом 30 м, чем для моста с пролетом 40 м.

2. Для моста с пролетом 40 м пассивный демпфер показал хороший контроль вибрации основной формы колебания балки, поскольку резонансный отклик в пределах расчетной скорости доминирует над максимальными динамическими характеристиками как моста, так и поезда. При массе гасителя, равной всего 0,5 % от массы моста, максимальные вертикальные динамические характеристики моста с пролетом 40 м могут быть снижены примерно на 40 и 20 % для ускорений и перемещений соответственно.

В. Н. Lin с соавторами в работе [4] вместо одного пассивного демпфера, рассмотренного в [3], исследовали систему, состоящую из множества параллельно расположенных гасителей с одной степенью свободы. Численные результаты показали, что эта система более эффективна в снижении вибрации на резонансных скоростях, чем один демпфер. Кроме того, максимальное вертикальное ускорение и вертикальное смещение в середине пролета анализируемого моста уменьшены примерно до 57 и 36 % соответственно. Было также подтверждено, что смещение самого гасителя невелико, поэтому эта система, состоящая из нескольких гасителей,

может быть установлена внутри внутренней коробчатой балки без опасности возникновения столкновений между гасителем и конструкцией моста. Авторы пришли к выводу, что эта система с той же массой, но с большей полосой пропускания частот является более надежной, поскольку она менее восприимчива к эффектам расстройки гасителя по частотам.

Широкополосная система динамических гасителей колебаний (ДГК) была разработана J. D. Yau, Y. B. Yang с целью уменьшения многочленных резонансных откликов мостов, подверженных нагрузкам движущегося поезда [5]. Система состоит из нескольких гасителей, каждый из которых включает один набор блоков ДГК, охватывающих определенную полосу частот, но с центральной частотой, настроенной на одну из первых резонансных частот структуры мостового сооружения. В численных исследованиях модель представляет собой поезд, смоделированный как набор из 16 одинаковых подпружиненных масс, равномерно расположенных на расстоянии 25 м, движущихся по двухпролетному непрерывному ферменному мосту. Полученные результаты показывают эффективность предлагаемой системы для уменьшения множественных резонансных пиков непрерывного ферменного моста высокоскоростной магистрали.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе внимание сосредоточено на оптимизации количества демпферов для эффективного снижения вибраций мостов. Предлагается симметричное расположение гасителей относительно центрального пролета моста с определенным интервалом между ними.

При этом наиболее массивный ДГК устанавливается в центре пролета, а масса последующих гасителей уменьшается по мере удаления от центра к опорам моста.

Важно отметить, что максимальное количество ДГК, которое может быть эффективно использовано, зависит от общей длины моста и выбранного интервала между гасителями [6]. Увеличение числа ДГК не является самоцелью. Необходимо учитывать, что изменение количества ДГК влечет за собой корректировку оптимальных значений других параметров системы. Чрезмерное увеличение их количества может привести к усложнению конструкции, росту затрат и снижению общей эффективности системы из-за нежелательных взаимодействий между гасителями. Оптимальное количество ДГК определяется не только длиной моста, но и результатами детального анализа вибонагрузок, особенностями конструкции моста и целевыми показателями снижения вибраций [7].

Только комплексный подход, включающий математическое моделирование и, возможно, экспериментальные исследования, позволит определить оптимальное количество ДГК для обеспечения наилучшей виброзащиты моста при минимальных затратах и максимальной эффективности [8].

По мостовому сооружению, которое принято для численного исследования (свойства этого моста перечислены в табл. 1), проходит поезд (его характеристики см. в табл. 2), смоделированный как серия движущихся плоских сил с одинаковой величиной нагрузки на ось и равным расстоянием между осями.

Таблица 1

Свойства моста

Параметр	Значение
1. Длина пролета L , м	30
2. Модуль упругости E , Н/м ²	$2,83 \cdot 10^{10}$
3. Момент инерции I , м ⁴	7,84
4. Масса на единицу длины m , кг/м	$41,74 \cdot 10^3$
5. Коэффициент модального демпфирования ξ , %	2,5
6. Основная собственная частота ω^1 , рад/с	25,3

Таблица 2

Характеристики проходящего поезда

Параметр	Значение
1. Длина поезда L_v , м	400
2. Количество осей n_w , число	16
3. Расстояние между осями x_v , м	25,0
4. Нагрузка на ось P , Н	$552 \cdot 10^3$
5. Критическая скорость V , м/с	100

Изучены обобщенные характеристики первых трех форм колебаний моста без установки ДГК под воздействием вибрации, вызванной поездом. Вклад первых трех режимов в вертикальное смещение середины моста составляет 5,249; 0,205 и 0,026 мм соответственно, а реакция на ускорение – 3,028; 1,301 и 0,122 м/с^2 соответственно [9]. Поскольку чрезмерное динамическое смещение влияет на долгосрочную безопасность, работоспособность мостового сооружения и комфорт пассажиров, основное внимание в исследовании уделяется динамическому смещению и основному режиму вибрации моста [10].

Для изучения реакции моста на изменение скорости подвижной нагрузки нанесены пиковые значения вертикального смещения моста в середине пролета (рис. 1) и реакции на ускорение

(рис. 2) в зависимости от изменения скорости поезда. Наблюдается, что характеристики перемещения и ускорения моста становятся чрезмерными (принимают наибольшее значение) при первой критической скорости поезда (100 м/с).

Результаты исследования

Результаты исследований по оценке влияния распределения гасителей по длине пролетного строения приведены на рис. 3 и 4. Замечено, что с увеличением их интервала пиковое смещение в середине пролета и реакция моста на ускорение увеличиваются. Таким образом, виброзащитная система моста, состоящая из пяти гасителей колебаний, наиболее эффективна, когда интервал между гасителями небольшой и сосредоточены они как можно ближе

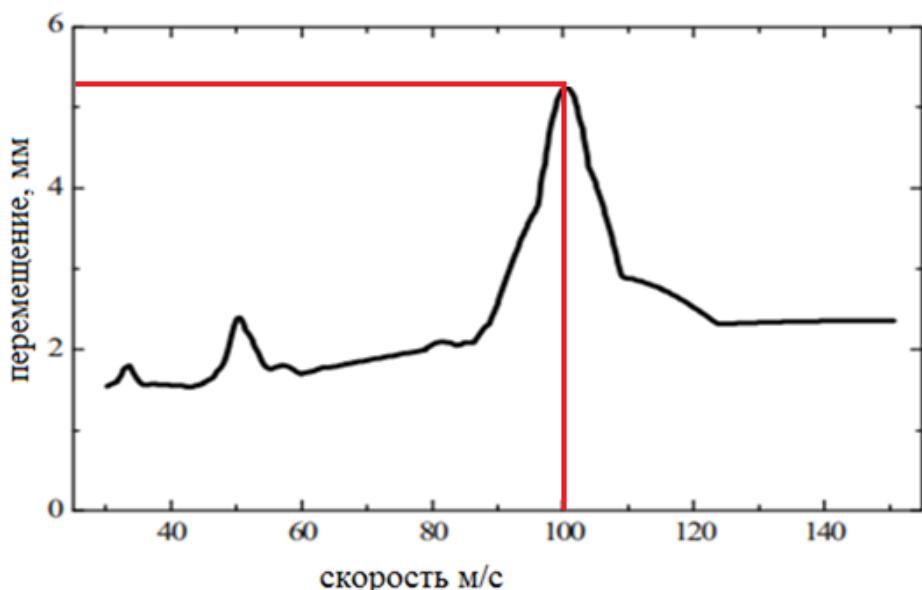


Рис. 1. Динамический отклик моста по смещению без гасителя

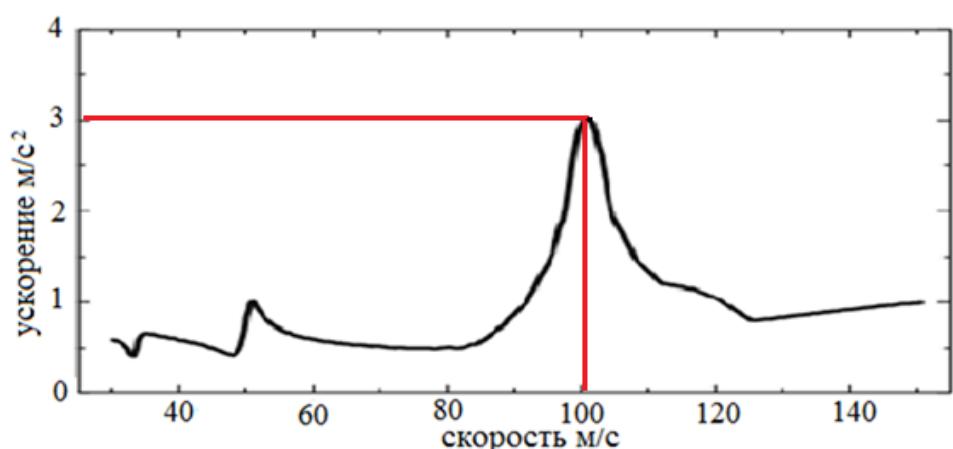


Рис. 2. Динамический отклик реакции на ускорение моста без гасителя

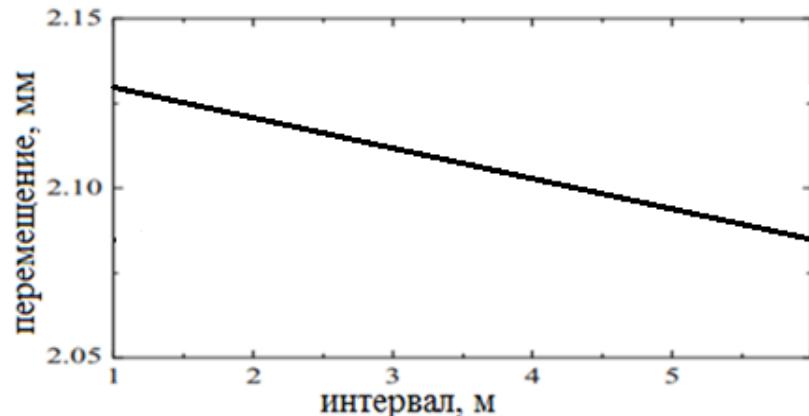


Рис. 3. Динамический отклик моста по смещению в зависимости от расстояния между гасителями

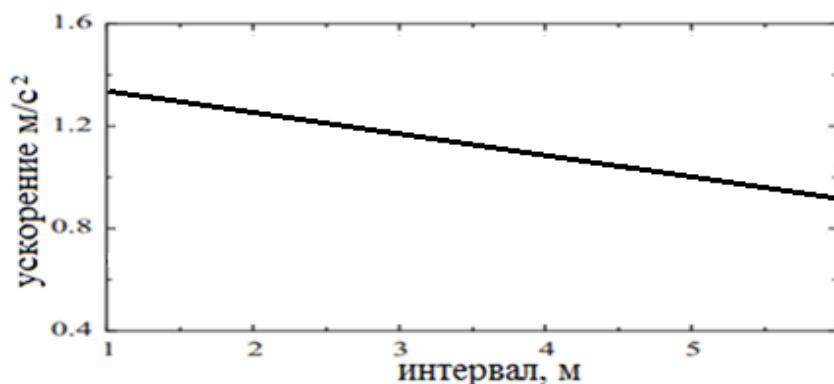


Рис. 4. Динамический отклик реакции на ускорение моста в зависимости от расстояния между гасителями

к середине пролета моста. Эффективность в уменьшении откликов моста снижается с увеличением интервала между гасителями колебаний и при установке дальше от середины.

На основании анализа распределения единиц гасителей по длине моста провели численное исследование их влияния с фиксированным интервалом в 2 и 5 м на амплитудно-

частотную характеристику. Из анализа рис. 5 и 6 следует, что оптимизированные системы демпферов очень эффективны в снижении резонансного смещения, а также реакции моста на ускорение при возбуждениях, вызванных движущимися многоосными нагрузками с различной скоростью. Все виброзащитные системы особенно эффективны в резонансной

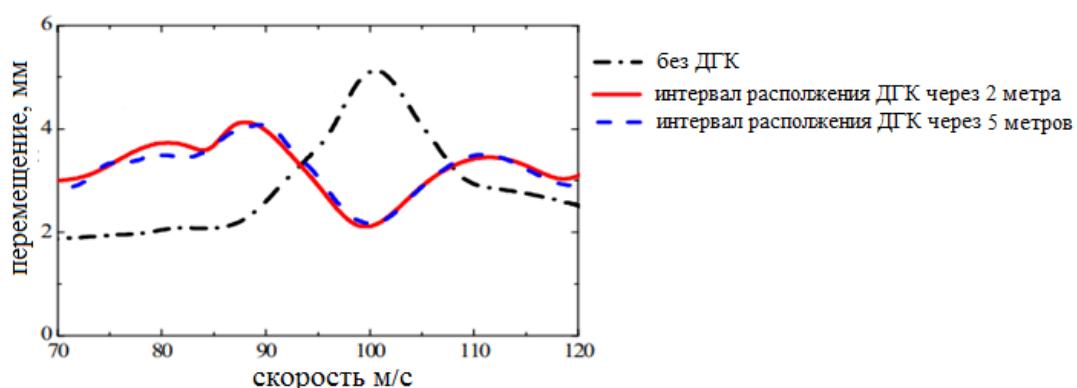


Рис. 5. Динамический отклик моста по смещению с ДГК

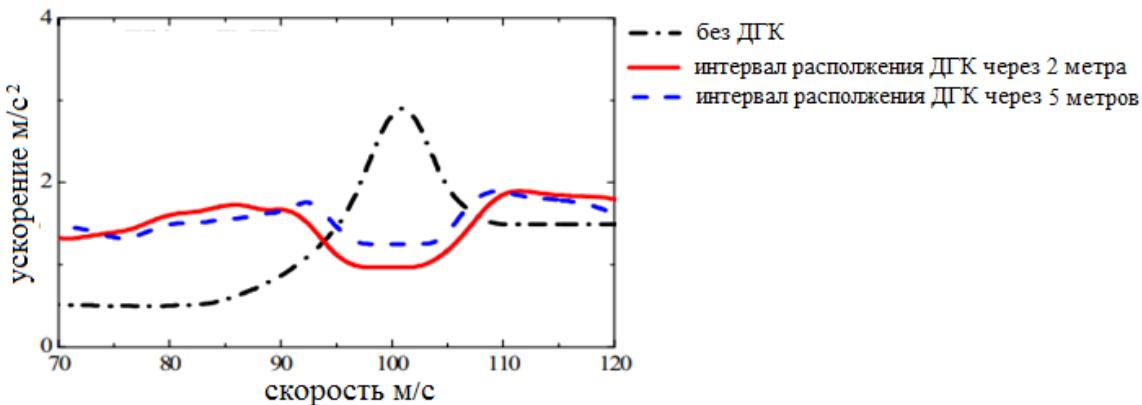


Рис. 6. Динамический отклик реакции на ускорение моста с ДГК

зоне или очень близко к ней, а за пределами этой зоны эффективность снижается. Это связано с тем, что системы чувствительны к изменению частоты, и в данном исследовании гасители колебаний настроены на резонансную частоту моста.

Таким образом, все оптимизированные системы гасителей с выбранным для исследования интервалом в 2 и 5 м эффективны в снижении резонансных характеристик смещения и ускорения на всех участках моста при движении поезда с различной скоростью.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что виброзащитная система моста, состоящая из наибольшего числа гасителей колебаний, наиболее эффективна, так как интервал между гасителями небольшой (в исследовании – 2 м) и сосредоточены они

как можно ближе к середине пролета моста. Эффективность в уменьшении откликов моста снижается с увеличением интервала между гасителями колебаний и при установке дальше от середины.

Для повышения эффективности снижения вибраций мостов от проходящей нагрузки гасители колебаний распределяются симметрично относительно среднего пролета моста и с интервалом по длине, при этом самый тяжелый гаситель всегда находится в середине пролета, а с удалением от среднего пролета с обеих сторон масса гасителей уменьшается, следовательно, используется только нечетное количество (минимум три). Максимальное количество зависит от длины моста и интервала между ними. При этом с увеличением числа демпферов достигается оптимальный интервал частот и оптимальное соотношение частот настройки.

Список источников

- Глушков С. П., Донец Н. А. Демпфирование в элементах балочных конструкций при их колебаниях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 80–81.
- Lin C. C., Wang J. F., Chen B. L. Train-Induced Vibration Control of High-Speed Railway Bridges Equipped with Multiple Tuned Mass Dampers // Journal of Bridge Engineering. 2005. No. 10 (4). P. 398–414.
- Lin C. C., Wang J. F., Chen B. L. Vibration suppression for high-speed railway bridges using tuned mass dampers // International Journal of Solids and Structures. 2007. No. 40 (2). P. 465–491.
- Lin B. H., Yau J. D., Yang Y. B. Impact factors for simple beams subjected to moving loads // Phil. Magazine. 2009. Vol. 19 (127). P. 708–715.
- Yau J. D., Yang Y. B. A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads // Engineering Structures. 2004. No. 26 (12). P. 1795–1807.
- Глушков С. П., Кочергин В. И., Проворная Д. А. Снижение колебаний мостовых сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 77–85.
- Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях : монография / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов [и др.]. Санкт-Петербург : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. 274 с.

8. Глушкин С. П., Проворная Д. А., Молокова Н. В. Исследование колебаний моста с учетом взаимодействия «транспортное средство – мост» // Политранспортные системы : материалы XI Международной научно-технической конференции. Новосибирск : Изд-во СГУПС. 2020. С. 757–760.
9. Уздин А. М. Учет демпфирования при расчете металлических пролетных строений мостов на сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. 1980. № 2. С. 5–8.
10. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. Москва : Наука, 1967. 444 с.

References

1. Glushkov S. P., Donets N. A. Damping in the elements of beam structures during their oscillations. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2015;(2):80–81. (In Russ.).
2. Lin C. C., Wang J. F., Chen B. L. Train-Induced Vibration Control of High-Speed Railway Bridges Equipped with Multiple Tuned Mass Dampers. *Journal of Bridge Engineering*. 2005;(10(4)):398–414.
3. Lin C. C., Wang J. F., Chen B. L. Vibration suppression for high-speed railway bridges using tuned mass dampers. *International Journal of Solids and Structures*. 2007;(40(2)):465–491.
4. Lin B. H., Yau J. D., Yang Y. B. Impact factors for simple beams subjected to moving loads. *Phil. Magazine*. 2009;19(127):708–715.
5. Yau J. D., Yang Y. B. A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads. *Engineering Structures*. 2004;(26(12)):1795–1807.
6. Glushkov S. P., Kochergin V. I., Provornaya D. A. Reduction of vibrations of bridge structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):77–85. (In Russ.).
7. Smirnov V. N., Baranovsky A. A., Bogdanov G. I. [et al.]. Bridges on high-speed railway lines. Monograph. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2015. 274 p. (In Russ.).
8. Glushkov S. P., Provornaya D. A., Molokova N. V. Investigation of bridge vibrations taking into account vehicle-bridge interaction. *Polytransport Systems. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk; 2020. P. 757–760. (In Russ.).
9. Uzdin A. M. Consideration of damping in the calculation of metal bridge spans for seismic effects. *Earthquake-resistant Construction*. 1980;(2):5–8. (In Russ.).
10. Timoshenko S. P. Fluctuations in engineering. Moscow: Nauka; 1967. 444 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Д. А. Проворная – преподаватель кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

D. A. Provornaya – Lecturer of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 02.04.2025; approved after reviewing 04.07.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья
УДК 624.21.044
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_33

Колебания предварительно напряженного пролетного строения железобетонного железнодорожного моста при движении осциллятора

Ибрахим Мирзаев ^{1✉}, Дилбархон Содирали кизи Аскарова ², Суннат Шовкат угли Хожахматов ³

^{1, 2, 3} Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

¹ ibrakhim.mir@mail.ru[✉]

² dilbarkhon1120@gmail.com

³ hozahmatovsunnat@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассмотрены особенности расчета на прочность железобетонных железнодорожных мостов при подвижной нагрузке и подвижном осцилляторе. Использованы методы конечных элементов и конечных разностей.

Рассмотрена одна балка пролетного строения, которая смоделирована балкой Тимошенко с учетом предварительного напряжения. При этом учтено место контакта балки с опорной частью, а также неподвижный и подвижный шарниры в точках контакта с опорой.

В качестве примера для изучения железнодорожного моста были принятые пролетные строения длиной 23,6 м. При численном решении задачи о колебаниях системы с распределенными параметрами под действием движущейся сосредоточенной силы и массы устраниены паразитные осцилляции подбором шага по времени в зависимости от скорости движения нагрузки. Вычисления проводились по неявной схеме Ньюмарка для движущейся сосредоточенной силы со скоростью 25 м/с с шагом по времени 0,008 с; при 50 м/с – с шагом 0,004 с; при 75 м/с – с шагом 0,00267 с; при 100 м/с – с шагом 0,002 с; при 200 м/с – с шагом 0,001 с.

Изучены колебания системы мост – подвижная нагрузка. Исследование проводилось на примере локомотива Talgo в качестве подвижного груза или массы. Определена скорость движения нагрузки, ниже которой можно использовать модель движущейся силы. С ростом горизонтальной скорости осциллятора прогиб балки увеличивается, также увеличиваются вертикальные колебания массы.

Ключевые слова: железобетон, балка, арматура, сосредоточенная сила, сосредоточенная масса

Финансирование: работа выполнена при поддержке научного проекта Правительством Республики Узбекистан (грант AL-8924063439).

Для цитирования: Мирзаев И., Аскарова Д. С., Хожахматов С. Ш. Колебания предварительно напряженного пролетного строения железобетонного железнодорожного моста при движении осциллятора // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 33–41. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_33.

Original article

Fluctuations of prestressed reinforced concrete railway bridge span during oscillator motion

Ibrahimb Mirzaev ^{1✉}, Dilbarkhon S. Askarova ², Sunnat Sh. Khojakhmatov ³

^{1, 2, 3} Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

¹ ibrakhim.mir@mail.ru[✉]

² dilbarkhon1120@gmail.com

³ hozahmatovsunnat@gmail.com

Abstract. This paper considers the peculiarities of strength calculation of reinforced concrete railway bridges under moving load and moving oscillator. Finite element and finite difference methods are used.

One span girder is considered, which is modelled by a Timoshenko girder with regard to prestressing. The point of contact between the beam and the support and the fixed and movable joints at the points of contact with the support are taken into account.

The 23.6 m long spans were taken as an example for the study of a railway bridge. In the numerical solution of the problem of oscillations of a system with distributed parameters under the action of a moving concentrated force and mass, parasitic oscillations were established by selecting the time step depending on the speed of load

movement. Calculations were performed using an implicit Newmark scheme for a moving concentrated force at a velocity of 25 m/s with a time step of 0.008 s; at 50 m/s with 0.004 s; at 75 m/s with 0.00267 s; at 100 m/s with 0.002 s; and at 200 m/s with 0.001 s.

Vibrations of the system bridge – mobile load were investigated. The study was carried out on the example of a Talgo locomotive as a moving load or mass. The velocity of the moving load below which the travelling force model can be used was determined. With increasing horizontal speed of the oscillator the deflection of the girder increases, also the vertical oscillation of the mass increases.

Keywords: reinforced concrete, beam, armature, concentrated force, concentrated mass

Funding: the work was carried out with the support of a scientific project by the Government of the Republic of Uzbekistan (grant AL-8924063439).

For citation: I. Mirzaev, D. S. Askarova, S. Sh. Khojakhmatov Fluctuations of prestressed reinforced concrete railway bridge span during oscillator motion. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):33–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_33.

Введение

Учет эффектов взаимодействия транспортных средств с мостом может иметь решающее значение при расчетном определении реалистичных динамических колебаний моста при прохождении поездов [1].

Рост железнодорожных перевозок, как высокоэффективного, экономичного и экологически устойчивого вида транспорта, играет центральную роль в достижении всеобъемлющей цели климатической нейтральности. В этом контексте расширение существующей сети высокоскоростных железных дорог поставило перед инженерами и исследователями ряд задач, направленных на сохранение хорошо функционирующей инфраструктуры и экономичное планирование эксплуатации. Одной из основных задач является вычислительное прогнозирование структурных колебаний железнодорожных мостов, подверженных высокоскоростному движению, с максимально возможной надежностью, с особым учетом эффектов резонанса, которые чаще всего возникают при высокоскоростном движении.

Железобетонные мосты со сборными предварительно напряженными железобетонными пролетными строениями являются широко используемыми конструкциями железнодорожных мостов Узбекистана. Возможности применения этих мостов еще более расширяются благодаря простоте их проектирования и строительства, а также легкости в обслуживании.

Железобетонные элементы в основном используются при строительстве железнодорожных мостов малой и средней протяженности. Известно, что железобетон – это композиционный материал, состоящий из бетона и стали (арматуры), работающих вместе. Бетон имеет разное сопротивление растяжению и сжатию, в результате чего происходит перераспределение усилий между бетоном и арматурой [2, 3].

Проведем краткий обзор направлений развития методов расчета транспортных сооружений на подвижные нагрузки. Динамические взаимодействия моста и транспортного средства были рассмотрены многими исследователями [4–8], изучены эффекты, влияющие на динамическое поведение мостов при взаимодействии с движущимися транспортными средствами. В этих исследованиях движущиеся транспортные средства моделируются как подвижные грузы, движущиеся массы или подвешенные массы, находящиеся в движении, с учетом механизмов подвески и рассеивания энергии, связанных с транспортными средствами. Более сложные модели, учитывающие различные динамические свойства транспортных средств или железнодорожных вагонов, также были реализованы при изучении взаимодействия транспортного средства и моста [9].

В работе [10] изучено динамическое взаимодействие между мостом и движущимся по нему транспортным средством. Смещение, скорость и ускорение моста в разной степени регулируются двумя наборами частот, т. е. частотой колебаний транспортного средства и собственными частотами моста.

Наиболее полный обзор работ по этой теме представлен в статье [11].

В настоящей статье на примере расчета рассматривается задача о колебаниях системы с распределенными параметрами (балки) под действием движущейся сосредоточенной силы и осциллятора. Один из широко распространенных методов решения такого рода задач основан на разложении решения в ряд по собственным формам колебаний распределенной системы, что позволяет свести исходное уравнение в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

относительно глобальной системы координат. В рассмотренных работах не дано полного решения о том, в каком случае необходимо учитывать подвижные нагрузки в виде силы или массы. Исходя из этого, в настоящей статье изучен вопрос влияния скорости движения нагрузки на вертикальные колебания балки при моделировании подвижной нагрузки в виде подвижной силы и подвижного осциллятора и на основе сравнения численных результатов сделаны соответствующие выводы.

Материалы и методы исследования

Предлагаемая физическая модель для задачи взаимодействия моста и транспортного средства в этом исследовании выглядит следующим образом: мост представлен балочной конструкцией Тимошенко, а колесо локомотива, движущегося с скоростью v , моделируется в виде сосредоточенной силы или массы с пружиной и демпфером. При этом принимается сила или масса, приходящаяся на одно колесо, т. е. 1/8 часть массы локомотива. Исследование проводилось на примере локомотива Talgo в качестве подвижного груза или массы (рис. 1).

В качестве примера для изучения железнодорожного моста были приняты пролетные строения длиной 23,6 м. Из-за симметрии выполнено изучение колебания одной балки моста вместо сопряженных параллельно соединенных балок, также принята 1/8 часть массы локомотива (8 750 кг), которая является долей массы

локомотива, распределенной к одному колесу. Численные расчеты были проведены созданным авторами комплексом программ «ШАРК» [12]. В данных расчетах пролетное строение моделируется в виде предварительно напряженной балки Тимошенко [12]. Дискретизация элементов моста производится методом конечных элементов, полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений решается неявным конечно-разностным методом Ньюмарка [13].

Создающие предварительное напряжение в пролетном строении стержни рабочей арматуры задаются предварительной деформацией и прикреплением каждого конечного элемента арматуры к нейтральной оси пролетного строения с эксцентрикитетом. На практике при строительстве мостов балка пролетного строения устанавливается на опорную часть, это должно быть правильно смоделировано при исследованиях. Поэтому с использованием эксцентрикитета относительно нейтральной оси балки и неподвижного или подвижного шарнирного соединения с опорой (опорной частью) учитываются условия взаимодействия торцов балки с опорными частями.

Движущаяся сосредоточенная масса моделируется в виде движущегося осциллятора с вязкоупругой пружинной моделью (рис. 2, б).

В проведенных расчетах рассмотрено влияние одного колеса движущегося локомотива на колебания пролетного строения.



Рис. 1. Общий вид локомотива Talgo

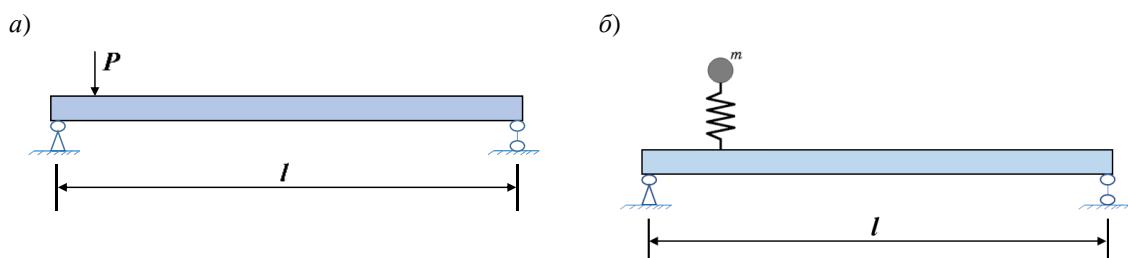


Рис. 2. Расчетная схема железнодорожного железобетонного мостового пролетного строения длиной 23,6 м:

а – при движении сосредоточенной силы; б – при движении вязкоупругого осциллятора

Численные расчеты выполнены для типовой балки пролетного строения длиной 23,6 м (класс бетона В35) с поперечным сечением в форме тавра. Масса одной балки составляет 49,2 т, использована предварительно напряженная арматура Вр-II с заданной деформацией 0,00504. Значение модуля упругости элементов арматуры принято равным $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па. Сила натяжения одного пучка равна 30 240 Н.

На рис. 3 приведен вид поперечного сечения балки с указанием расположения арматуры.

Разобъем рабочую арматуру (пучок арматур) на балочно-стержневые конечные элементы, координаты узловых точек которых отличаются от координат узловых точек соответствующей балки пролетного строения только по вертикальной координате. Соединим узловые точки элементов арматуры с соответствующими узловыми точками нейтральной оси с использованием эксцентрикитета. По подобию изготовления предварительно напряженной балки зададим силу натяжения арматуры P_0 и определим ее начальную деформацию $\epsilon_0 = P_0 / EF$ (E – модуль упругости арматуры; F – общая площадь поперечного сечения арматуры). В верхнем строении пути используются рельсы типа Р65 массой 64,72 кг/м, железобетонные шпалы массой 270–300 кг, укладываются 1 840 шпал на 1 км пути. Масса балластного слоя составляет 200–300 кг/м, его высота – 0,35 м. Для статической задачи погонные массы балки и верхнего строения пути умножаются на ускорение свободного падения для вычисления погонной статической нагрузки.

Далее путем решения с помощью программного комплекса статической задачи с предварительно заданной деформацией ϵ_0 определено

напряженно-деформированное состояние конструкции моста. Потеря величин предварительного напряжения из-за перепада температуры, вязкости материала и др. в данных расчетах не учитывается [3].

Результаты исследования

Численное решение задачи моста показало его перемещение во времени. Для движущейся сосредоточенной и распределенной силы при дискретизации пролетное строение было разбито на 236 конечных элементов с учетом работы каждого типа конечного элемента, количество узловых точек 120. Узлы конечных элементов арматуры соединяются жестко с соответствующими узлами нейтральной оси балки с использованием эксцентрикитетов, поэтому количество конечных элементов больше, чем общее количество узлов. Типы характеристик конечных элементов (пять различных типов) были даны через соответствующие порядковые номера.

Для случая движущегося осциллятора при дискретизации было взято 237 конечных элементов с учетом работы каждого типа конечного элемента, количество узловых точек 122. Типы характеристик конечных элементов (шесть различных типов) были даны через соответствующие порядковые номера. Количество соединений с эксцентрикитетом 120.

Вычисления проводились по неявной схеме Ньюмарка для обоих случаев моделирования подвижной нагрузки с подбором шага по времени. Шаг по времени определялся в зависимости от скорости движения нагрузки: при 25 м/с – 0,008 с; при 50 м/с – 0,004 с; при 75 м/с – 0,00267 с; при 100 м/с – 0,002 с; при 200 м/с – 0,001 с. Скорости подвижной нагрузки более 70 м/с взяты для анализа про-

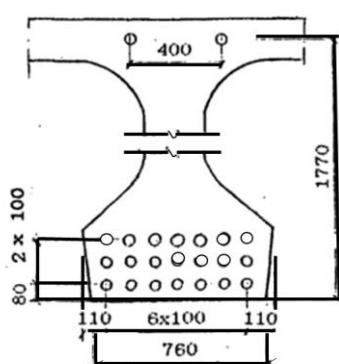


Рис. 3. Поперечное сечение балки

цессов при больших скоростях. Дискретизация задачи по координате и времени при движущейся нагрузке или массе при проведении вычислений при различных скоростях движения приводит к появлению паразитных осцилляций, что связано с внезапным переходом движущейся нагрузки на соседний узел. Если шаг по времени подобрать таким образом, что за один шаг движущаяся нагрузка переходит на соседний узел, тогда паразитные осцилляции исчезают.

В [14] приведена формула для определения критической скорости движения v_{kr} сосредоточенной силы по свободно опертой балке:

$$v_{kr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

здесь l , E , J , m – длина, модуль упругости материала, момент инерции поперечного сечения и масса балки.

Необходимо отметить, что значение критической скорости, получаемое по данной формуле, значительно превышает максимальную скорость высокоскоростных поездов на практике. Для заданных значений параметров в проведенных нами расчетах критическая скорость сосредоточенной силы, движущейся по балке длиной 23,6 м, составила 1 353 км/ч.

В табл. 1 представлены результаты расчетов максимального прогиба середины балки, с учетом предварительно напряженной арматуры, при различных скоростях движения сосредоточенной силы. С увеличением горизонтальной скорости движения сосредоточенной вертикальной силы максимальный прогиб середины балки увеличивается.

При восприятии балкой подвижной нагрузки в виде осциллятора были проведены расчеты для разных значений его жесткости: $1 \cdot 10^8$; $2,5 \cdot 10^8$; $5 \cdot 10^8$; $7,5 \cdot 10^8$ Н/м. Величина жесткости осциллятора может состоять из жесткости балласта, а также из жесткости соединения колеса с подвеской и соединения подвески с корпусом локомотива. Распределение

нагрузки на шпалы, близлежащие к колесу, приведено в статье [15].

На рис. 4 приведены графики изменения по времени вертикальных колебаний массы и средней точки балки при различных скоростях ее движения, жесткость пружины осциллятора $k = 1 \cdot 10^8$ Н/м. Из этих графиков видно, что в момент прихода осциллятора к середине балки ее прогиб максимальен, также в этот момент вертикальное движение массы достигает своего максимума. Далее, после ухода осциллятора от балки, наблюдаются их колебания по первой собственной форме [16], амплитуды которых возрастают с увеличением скорости движения осциллятора до критической. Замеренный по этим графикам период собственных колебаний равен 0,0601 с, а собственный период колебаний осциллятора при его жесткости $k = 1 \cdot 10^8$ Н/м равен 0,0587 с.

Из табл. 2 видно, что увеличение жесткости осциллятора при данном соотношении масс балки и осциллятора практически не влияет на максимальный прогиб середины балки, но сильно влияет на вертикальные колебания массы. Рост горизонтальной скорости движения осциллятора приводит к увеличению максимального прогиба середины балки.

Для движущейся сосредоточенной силы значение нормального напряжения в нижней фибре середины балки с учетом предварительно напряженной арматуры: -24 092 Па при скорости 25 м/с; -24 199 Па при 50 м/с; -24388 Па при 100 м/с; -25 327 Па при 200 м/с. То же самое для движущегося осциллятора: -24 003 Па при 25 м/с; -24 023 Па при 50 м/с; -24 631 Па при 100 м/с; -28 068 Па при 200 м/с.

На рис. 5 приведены сравнительные графики изменения прогиба середины балки по времени при разных скоростях горизонтального движения вертикальной сосредоточенной силы. С возрастанием скорости движения силы максимальный прогиб середины балки увеличивается: -0,001361 м при 25 м/с; -0,001365 м при 50 м/с; -0,001374 м при

Таблица 1

Изменение максимального прогиба середины балки длиной 23,6 м

Скорость движущейся сосредоточенной силы, м/с	При отсутствии сосредоточенной силы	25	50	75	100	200
Максимальный прогиб, м	-0,001163	-0,001258	-0,001260	-0,001262	-0,001269	-0,001310

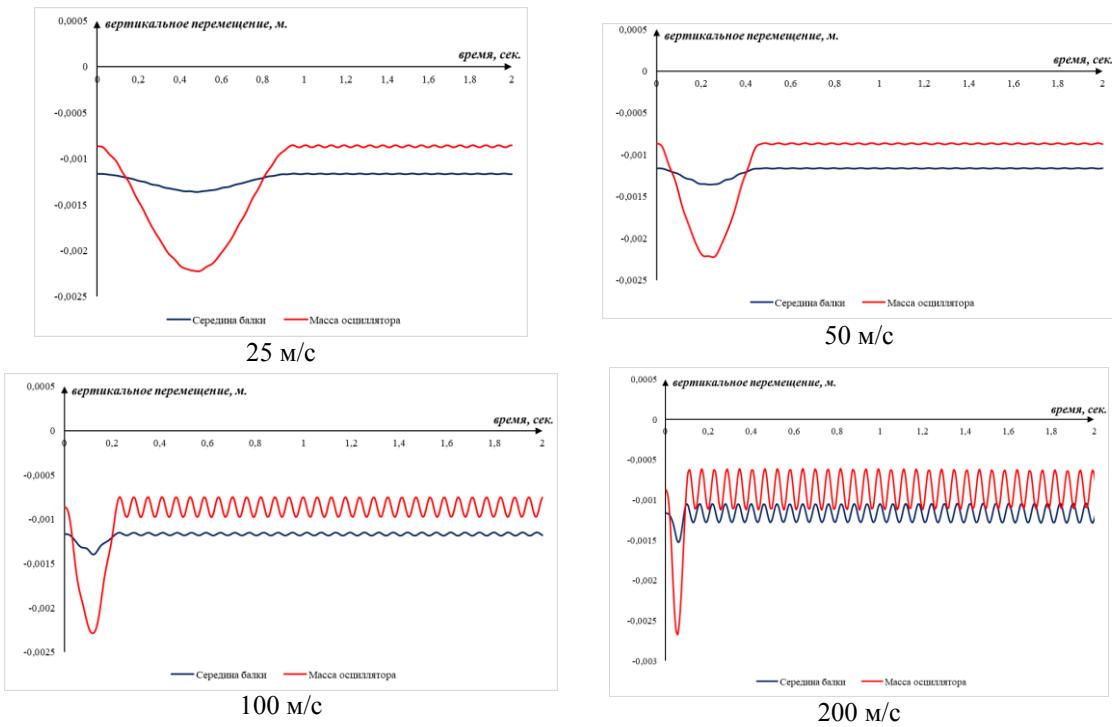


Рис. 4. Вертикальные колебания середины балки и массы осциллятора при различных скоростях движения осциллятора

Таблица 2

Максимальный прогиб середины балки при разных скоростях движения осциллятора с различными жесткостями, м

Скорость движения, м/с	Жесткость пружины k , Н/м			
	$1 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^8$
25	-0,001361	-0,001359	-0,001359	-0,001359
50	-0,001358	-0,001361	-0,001361	-0,001361
100	-0,001393	-0,001380	-0,001379	-0,001378
200	-0,001521	-0,001463	-0,001460	-0,001462

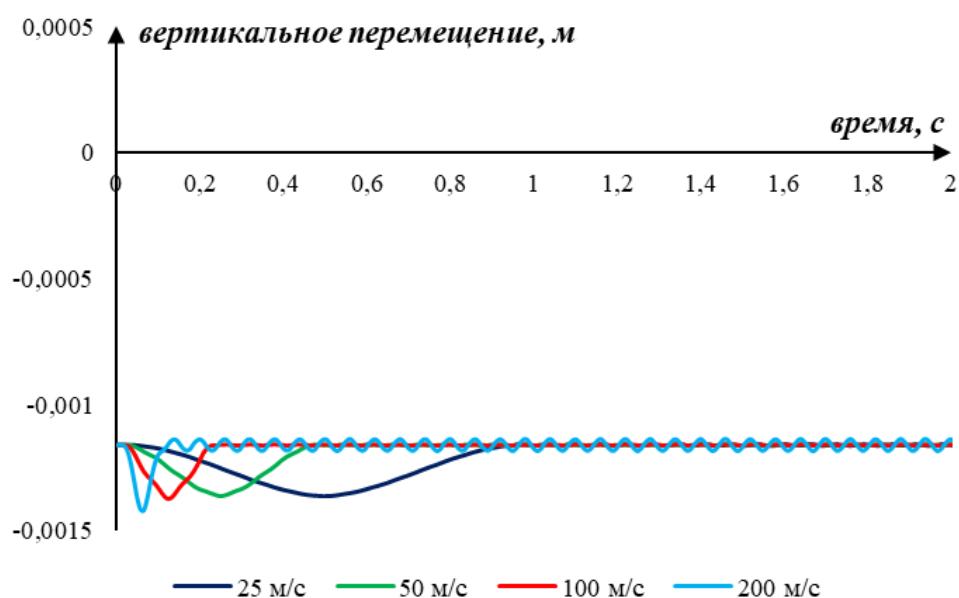


Рис. 5. Изменение по времени прогиба середины балки при движении сосредоточенной силы с различными скоростями

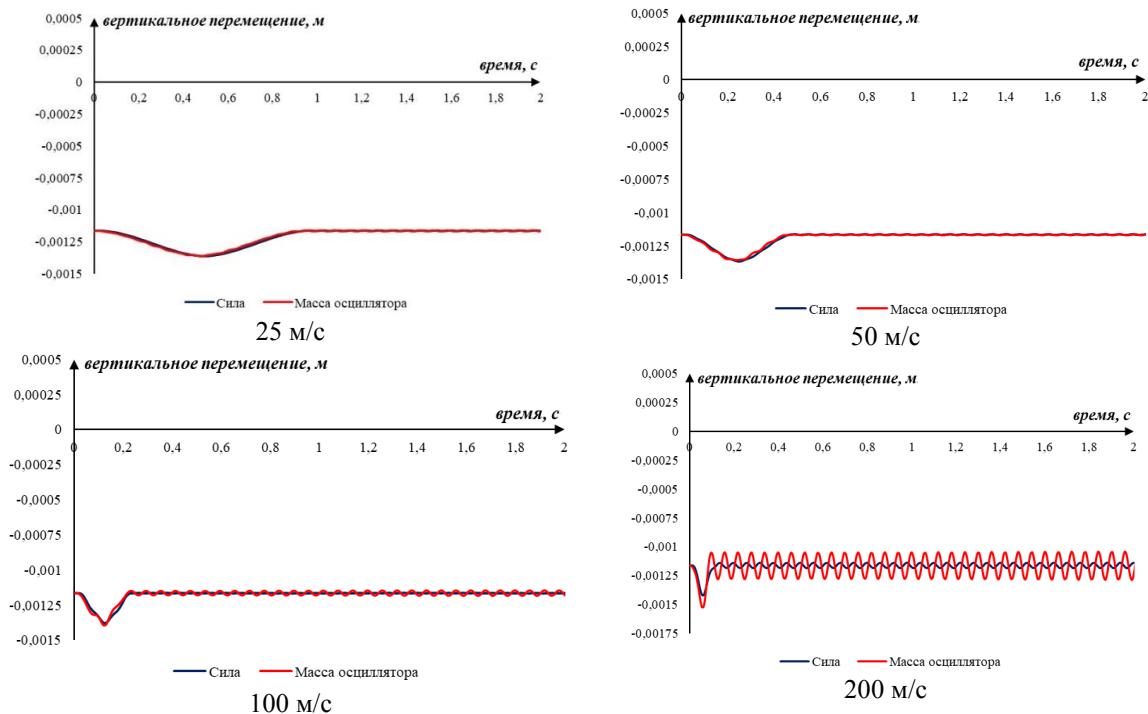


Рис. 6. Изменение по времени перемещения середины пролетного строения при движущихся сосредоточенной силе и осцилляторе

100 м/с; $-0,001418$ м при 200 м/с. При больших скоростях движения собственные колебания балки происходят с большими амплитудами.

Анализ результатов (рис. 6) показывает, что при скоростях движения сосредоточенной нагрузки менее 50 м/с нагрузку приближенно можно моделировать сосредоточенной силой. При скоростях движения нагрузки более 50 м/с необходимо использовать модель осциллятора, так как в этом случае процесс описывается адекватно.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. С ростом горизонтальной скорости движения сосредоточенной вертикальной силы, а также осциллятора максимальный прогиб середины балки увеличивается.

2. Увеличение жесткости осциллятора практически не влияет на максимальный прогиб середины балки, но сильно влияет на вертикальные колебания массы.

3. При скоростях движения сосредоточенной нагрузки менее 50 м/с нагрузку приближенно можно моделировать сосредоточенной силой. При скоростях движения нагрузки более 50 м/с необходимо использовать модель осциллятора, так как в этом случае процесс описывается адекватно.

Список источников

1. Comparison of different approaches for considering vehicle-bridge-interaction in dynamic calculations of high-speed railway bridges / L. Bettinelli, B. Glatz, A. Stollwitzer, J. Fink // Engineering Structures. 2022. Vol. 270. P. 114897. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114897>.
2. Мирзаев И., Шермухамедов У. З., Аскарова Д. С. Влияние податливости основания на сейсмостойкость железнодорожных мостов // Путевой навигатор. 2023. № 52 (82). С. 60–67.
3. Мирзаев И., Аскарова Д. С. Влияние предварительно напряженного состояния пролетного строения на колебания железобетонного железнодорожного моста во время землетрясения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71), спецвыпуск. С. 6–14.
4. El Amrani A., Mataich H., El Amrani B. Stability of Beam Bridges under Bridge-Vehicle Interaction // WSEAS transactions on applied and theoretical mechanics. 2024. <https://doi.org/10.37394/232011.2024.19.6>.

5. Xie Q., Han W., Yuan Y. Refined Vehicle-Bridge Interaction Analysis Using Incompatible Solid Finite Element for Evaluating Stresses and Impact Factors // *Advances in Civil Engineering*. 2020. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/7032460>.
6. The Influence of Different Loads on the Footbridge Dynamic Parameters / A. Kiliškevičius, D. Bacinskas, J. Selech [et al.] // *Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12 (4). <https://doi.org/10.3390/sym12040657>.
7. Eshkevari S. S., Matarazzo T. J., Pakzad S. N. Simplified Vehicle-Bridge Interaction for Medium to Long-span Bridges Subject to Random Traffic Load // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020. Vol. 10. P. 693–707. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00413-4>.
8. Vertical dynamic interaction of trains and rail steel bridges / Y. Q. Sun, C. Cole, M. Spiriyagin, M. Dhanasekar // *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2013. Vol. 13 (1). P. 88–97. <http://dx.doi.org/10.56748/ejse.131641>.
9. Yang Y. B., Yau J. D., Yang Y. B. Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways // *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* 2004.
10. Yang Y. B., Lin C. W. Vehicle–bridge interaction dynamics and potential applications // *Journal of Sound and Vibration*. 2005. Vol. 284. P. 205–226. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.06.032>.
11. Динамика деформируемых систем, несущих движущиеся нагрузки (обзор публикаций и диссертационных исследований) / С. И. Герасимов, В. И. Ерофеев, Д. А. Колесов, С. И. Лисенкова // Вестник научно-технического развития. 2021. № 160. С. 25–47. <https://doi.org/10.18411/vntr2021-160-3>.
12. Прикладные задачи сейсмодинамики сооружений. Книга 2 / Т. Р. Рашидов, С. В. Кузнецов, Б. М. Мардюнов, И. Мирзаев. Ташкент : Навруз, 2021. 172 с.
13. Mirzaev I., Askarova D. Spatial oscillations of a railway bridge under the impact of a real earthquake // V Central Asian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022. P. 91–95.
14. Киселев В. А. Строительная механика. Москва : Стройиздат, 1980. 616 с.
15. Исаков А. Л., Машуков В. И., Корнеев Д. А. Анализ распределения напряжений и деформаций в балластной призме и земляном полотне в окрестности головной части движущегося поезда // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сборник научных трудов. Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2006. 154 с.
16. Revisiting the moving force problem / A. V. Pesterov, B. Yang, L. A. Bergman, C. A. Tan // *Journal of Sound and Vibration*. 2003. Vol. 261. P. 75–91. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)00942-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)00942-2).

References

1. Bettinelli L., Glatz B., Stollwitzer A., Fink J. Comparison of different approaches for considering vehicle-bridge-interaction in dynamic calculations of high-speed railway bridges. *Engineering Structures*. 2022;270:114897. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114897>.
2. Mirzaev I., Shermukhamedov U. Z., Askarova D. S. Influence of the base pliability on the seismic resistance of railway bridges. *Trip Navigator*. 2023;(82):60–67. (In Russ.).
3. Mirzaev I., Askarova D.S. Influence of the pre-stressed state of the span structure on the vibrations of reinforced concrete railway bridge during an earthquake. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):6–14. (In Russ.).
4. El Amrani A., Mataich H., El Amrani B. Stability of Beam Bridges under Bridge-Vehicle Interaction. *WSEAS transactions on applied and theoretical mechanics*. 2024. <https://doi.org/10.37394/232011.2024.19.6>.
5. Xie Q., Han W., Yuan Y. Refined Vehicle-Bridge Interaction Analysis Using Incompatible Solid Finite Element for Evaluating Stresses and Impact Factors. *Advances in Civil Engineering*. 2020. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/7032460>.
6. Kiliškevičius A., Bacinskas D., Selech J. [et al.]. The Influence of Different Loads on the Footbridge Dynamic Parameters. *Mechanical Engineering*. 2020;12(4). <https://doi.org/10.3390/sym12040657>.
7. Eshkevari S. S., Matarazzo T. J., Pakzad S. N. Simplified Vehicle-Bridge Interaction for Medium to Long-span Bridges Subject to Random Traffic Load. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020;10:693–707. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00413-4>.
8. Sun Y. Q., Cole C., Spiriyagin M., Dhanasekar M. Vertical dynamic interaction of trains and rail steel bridges. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2013;13(1):88–97. <http://dx.doi.org/10.56748/ejse.131641>.
9. Yang Y. B., Yau J. D., Yang Y. B. Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* ISBN 981-238-847-8, 2004.
10. Yang Y. B., Lin C. W. Vehicle–bridge interaction dynamics and potential applications. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;284:205–226. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.06.032>.
11. Герасимов С. И., Ерофеев В. И., Колесов Д. А., Лисенкова С. И. Динамика деформируемых систем, несущих движущиеся нагрузки (обзор публикаций и диссертаций). *Bulletin of Scientific and Technical Development*. 2021;(160):25–47. <https://doi.org/10.18411/vntr2021-160-3>. (In Russ.).

12. Rashidov T. R., Kuznetsov S. V., Mardonov B. M., Mirzaev I. Applied Problems of Seismodynamics of Structures. Book 2. Tashkent: Navruz; 2021. 172 p. (In Russ).
13. Mirzaev I., Askarova D. Spatial oscillations of a railway bridge under the impact of a real earthquake. *V Central Asian conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. 2022. 91–95.
14. Kiselev V. A. Structural Mechanics. Moscow: Stroyizdat; 1980. 616 p. (In Russ).
15. Isakov A. L., Mashukov V. I., Korneev D. A. Analysis of stress and strain distribution in ballast prism and earth bed in the vicinity of the head part of a moving train. *Railways and Motorways in Siberia: Proceedings of Scientific Works*. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University, 2006. 154 p. (In Russ)
16. Pesterov A. V., Yang B., Bergman L. A., Tan C. A. Revisiting the moving force problem. *Journal of Sound and Vibration*. 2003;261:75–91. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)00942-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)00942-2).

Информация об авторах

И. Мирзаев – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная механика» Ташкентского государственного транспортного университета.

Д. С. Аскарова – доктор философии (PhD) по техническим наукам, и. о. доцента кафедры «Прикладная механика» Ташкентского государственного транспортного университета.

С. Ш. Хожахматов – базовый докторант кафедры «Прикладная механика» Ташкентского государственного транспортного университета.

Information about the authors

I. Mirzaev – Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Applied Mechanics Department, Tashkent State Transport University.

D. S. Askarova – Doctor of Philosophy in Engineering, Acting Associate Professor of the Applied Mechanics Department, Tashkent State Transport University.

S. Sh. Khojakhmatov – base doctoral student of the Applied Mechanics Department, Tashkent State Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.04.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принятая к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 12.04.2025; approved after reviewing 27.06.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья

УДК 624-2/-9

doi:10.52170/1815-9265_2025_76_42

Особенности проектирования защитных откосов опор мостов через малые водотоки на прижимных участках берегов морей

Галина Вячеславовна Тлявлина¹✉, Виктор Алексеевич Петров², Роман Маратович Тлявлин³,
Галина Александровна Емельянова⁴

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский центр «Морские берега» – обособленное подразделение

Научно-исследовательского института транспортного строительства, Сочи, Россия

^{1, 4} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹ TlyavlinaGV@Tsniis.com✉

² demmi8@mail.ru

³ TlyavlinRM@Tsniis.com

⁴ ga_emel@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье рассматривается часть сложных природных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании опор мостов, возводимых через устья малых водотоков, и железнодорожных путей, проходящих на прижимных участках берегов морей. Под прижимными участками понимаются места, в которых земляное полотно с одной стороны ограничено крутыми косогорами, а с другой – морем или водотоками, не имеющими прибрежных террас. Изучены вопросы инженерной защиты опор мостов и земляного полотна транспортных сооружений, подвергающихся наиболее неблагоприятному сочетанию гидрологических явлений – речного паводка и морского штормового волнения редкой повторяемости.

Исследования выполнены с использованием метода физического моделирования. Физическое моделирование береговых и русловых процессов проводилось в глубоководном волновом бассейне в масштабе 1 : 40. При этом воспроизведилось одновременное прохождение паводка на реке 1 % обеспеченности и морского шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет. Оценивалась устойчивость защитной волногасящей полосы в приустьевой области. Исследовался вариант компоновки наносоудерживающих сооружений и волногасящей полосы шириной, необходимой для гашения энергии наката с целью защиты земляного полотна.

Цель исследований – оценка деформаций дна в устьевой зоне при одновременном воздействии штормовых волн и речной струи расчетного паводка.

По результатам физического моделирования получены деформации профилей в приустьевой части реки и в приустьевой зоне моря. На модели определены зоны размыва и аккумуляции материала, вынесенного из русла реки паводковыми водами. Установленные на модели деформации дна (изменение глубин) и, как следствие, изменение высоты волн и место их обрушения следует учитывать при расчете параметров конструкций инженерной защиты мостовых переходов.

Результаты исследований могут быть использованы для корректировки математических моделей гидродинамических процессов в береговой зоне морей вблизи устьев водотоков.

Ключевые слова: аккумуляция, морские волны, мостовой переход, наносы, паводок, размыв, физическое моделирование

Для цитирования: Особенности проектирования защитных откосов опор мостов через малые водотоки на прижимных участках берегов морей / Г. В. Тлявлина, В. А. Петров, Р. М. Тлявлин, Г. А. Емельянова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 42–51. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_42.

Original article

Design features of protective slopes of bridge supports across small watercourses on pressure sections of the sea shores

Galina V. Tlyavlina¹✉, Victor A. Petrov², Roman M. Tlyavlin³, Galina A. Emelianova⁴

^{1, 2, 3} R&D Centre ‘Morskie berega’ – Joint Stock Company ‘Central Research Institute of Transport Construction’, Sochi, Russia

^{1, 4} Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

¹ TlyavlinaGV@Tsniis.com✉

² demmi8@mail.ru

³ TlyavlinRM@Tsniis.com

⁴ ga_emel@mail.ru

Abstract. This article examines some of the complex natural factors that must be taken into account when designing bridge supports built across the mouths of small watercourses and railway tracks running along the pressure sections of the shores of the seas. Pressing areas are defined as places where the earthbed is bounded on one side by steep slopes, and on the other by the sea or watercourses that do not have coastal terraces. The issues of engineering protection of bridge supports and the roadbed of transport structures that are exposed to the most unfavorable combination of hydrological phenomena – river flooding and sea storm surges of rare frequency – are considered.

The research was carried out using the method of physical modeling. Physical modeling of coastal and riverbed processes was performed in a deep-sea wave basin. The simulation is performed at a scale of 1 : 40. At the same time, the simultaneous passage of a flood on a river of 1% availability and a sea storm with a repeatability of 1 every 25 years was reproduced. The stability of the protective wave-damping band in the estuary region was assessed. A variant of the layout of nano-retaining structures and a wave-extinguishing strip with the width necessary to dampen the rolling energy in order to protect the roadbed was investigated.

The purpose of the research is to assess bottom deformations in the estuarine zone under the simultaneous influence of storm waves and a river stream of a calculated flood.

According to the results of physical modeling, deformations of profiles in the estuarine part of the river and in the estuarine zone of the sea were obtained. The model defines the zones of erosion and accumulation of material removed from the riverbed by flood waters. The bottom deformation model (change in depths) and, as a result, the change in wave heights and the location of wave collapse should be taken into account when calculating the parameters of engineering protection structures for bridge crossings.

The research results can be used to correct mathematical models of hydrodynamic processes in the coastal zone of the seas near the mouths of watercourses.

Keywords: accumulation, sea waves, bridge crossing, sediments, flood, erosion, physical modeling

For citation: Tlyavlina G. V., Petrov V. A., Tlyavlin R. M., Emelianova G. A. Design features of protective slopes of bridge supports across small watercourses on pressure sections of the sea shores. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):42–51. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_42.

Введение

Железные дороги, проходящие вдоль морских побережий, подвержены, с одной стороны, склоновым процессам (оползням, обвалам), а с другой стороны, размывам морскими волнами [1]. Железнодорожные мосты на этих участках расположены в устьях рек, большинство из которых – малые водотоки.

В общем случае при разработке проектов защиты опор мостовых переходов, прокладываемых через водотоки, необходимы данные об их гидрологических характеристиках. В первую очередь это относится к величинам расходов воды и твердого стока, а также скоростей водного потока при прохождении пиковой фазы паводка. Следует отметить, что для малых водотоков характерны паводки, обусловленные прохождением ливневых дождей, при которых отмечается резкое, хотя и непродолжительное повышение уровней водной поверхности, расходов воды и скоростей течений. При обильных и часто затягивающихся по времени дождях расходы воды и скорости в малых водотоках могут достигать значительных величин. Отсутствие достоверных данных о величине расходов воды и твердого стока малых и временных водотоков приводит к затруднениям при разработке проектов защиты опор мостовых переходов через них. При неканализованных устьевых участках малых водотоков, что наблюдается в большинстве

случаев, возможны размывы их берегов во время прохождения паводков, что может привести к подмыву опоры моста (рис. 1, а).

Близкое расположение железной дороги к морю определяет возможное воздействие на опоры мостов не только водных потоков, идущих со стороны суши, но и морских волн. При недостаточной ширине волногасящей полосы (пляжа) происходит неполное гашение наката штормовых волн, и часть волнового потока будет воздействовать на откосы опор мостов, что также может приводить к их деформациям и разрушению (см. рис. 1, б).

В настоящее время, как указывалось выше, отсутствуют наблюдения за гидрологическими характеристиками малых водотоков. Недостаточно исследован вопрос взаимодействия штормовых волн с вытекающей речной паводковой струей на фоне колебаний уровня моря. Все это затрудняет получение достоверных данных, необходимых для разработки проектов защиты опор железнодорожных переходов через устья малых водотоков.

В последние годы в практике проектирования транспортных сооружений широко применяются методы математического моделирования, в том числе и для исследования русло-вых процессов, как в нашей стране, так и за рубежом [2–4]. Однако поведение потоков жидкости при процессах, протекающих около

а)



б)



Рис. 1. Деформации у опор железнодорожных мостов:
а – размыв от паводка; б – от наката морских штормовых волн

побережий и эстуариев, не поддается математическому анализу в полной мере [5, 6]. Возникающие при этом трудности обусловлены как нелинейным характером уравнений движения и недостаточным знанием коэффициентов турбулентности и эффективной диффузии, так и другими гидравлическими факторами, не поддающимися непосредственному описанию [5]. Этим определена необходимость изучения данных процессов на физических моделях.

Гидродинамика эстуариев и побережий, на которую влияет множество факторов, очень сложна и требует уникального подхода, сочетающего теоретический анализ и моделирование. Исследования последних лет [2–4, 6] посвящены в основном математическому описанию гидродинамики, переноса наносов и качества воды в устьях рек и на побережьях. Также известны результаты физического моделирования водного потока для изучения гидрологических процессов, в том числе размывов [7–9].

Обычно на откос, защищающий опору моста, воздействует непосредственно не волна, а ее накат. В связи с этим при проектировании сооружений, защищающих опоры мостов от волнового воздействия, необходимо выполнять расчет изменения высоты волнового потока и его скорости при накате на берег. Известно, что наилучшей защитой от волнового воздействия является пляж. Полное гашение накатывающегося волнового потока происходит на пляже, ширина которого достаточна для этого (пляж полного профиля). При меньшей ширине происходит частичное гашение наката штормовых волн, и часть волнового потока будет воздействовать на откосы опор

мостов, что может приводить к их деформациям и разрушению. Создание волногасящих пляжей во многих случаях нецелесообразно из-за отсутствия пляжеобразующего материала и невозможности пополнений в период его эксплуатации.

Для предотвращения возникновения нештатных ситуаций при эксплуатации возвезденных опор мостов и в случаях невозможности создания волногасящего пляжа перед ними должны быть предусмотрены сооружения, обеспечивающие их устойчивость. Обычно перед возводимыми опорами предусматривается строительство волноотбойных стен, часто подпорно-волноотбойных, параметры которых должны обеспечивать полную защиту откоса опор от воздействия штормового наката. Волноотбойная стена не является волногасящим сооружением, полностью воспринимает на себя волновое воздействие. Для его уменьшения перед возводимой волноотбойной стеной при проектировании необходимо предусмотреть волногасящее сооружение в виде бермы из камня или фасонных блоков, что увеличит срок службы самой стены.

При этом следует учитывать наличие перед мостом на момент разработки проекта волногасящего пляжа, на котором происходит полное или частичное гашение наката штормовых волн, и его возможный размыв при эксплуатации введенного сооружения.

В данной работе приводятся некоторые результаты исследований на пространственной модели береговых и русловых процессов при одновременном воздействии речного паводка и морского штормового волнения.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены методом физического моделирования. На пространственной модели в волновом бассейне был построен фрагмент участка берега протяженностью 800 м в масштабе 1 : 40 в районе устья реки. Экспериментальный бассейн имеет в плане форму равнобокой трапеции с основаниями 41 и 25 м и расстоянием между ними 31,5 м. Высота стенок бассейна 1,7 м. Бассейн оснащен передвижными волнопродукторами. В проводимых экспериментах было задействовано четыре секции по 5 м (общей длиной 20 м). Для воспроизведения паводка на реке было изготовлено устройство, включающее насос с всасывающим патрубком, напорный трубопровод и резервуар для формирования потока паводка.

Моделирование выполнено в соответствии с теорией подобия [10–12]. В проводимых экспериментальных исследованиях гидродинамических воздействий водной среды (волн) на защитные откосы гидротехнических сооружений, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натурных процессов определяется равенством чисел Фруда. При исследовании волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда может быть записан в виде

$$V_m^2/L_m g = V_h^2/L_h g = \text{const} = Fr, \quad (1)$$

где V_m – скорость на модели; L_m – характерная длина на модели; V_h – скорость в натуре; L_h – характерная длина в натуре; g – гравитационное ускорение; Fr – число Фруда.

Ограничения по параметрам волн обусловлены необходимостью исключения заметного влияния молекулярной вязкости и капиллярных эффектов. Капиллярность (или поверхностное натяжение) можно не учитывать, если длина волн на модели λ_m больше 20 см [10–12]:

$$\lambda_m > 20 \text{ см.} \quad (2)$$

Чтобы обеспечить на модели и в натурных условиях равенство чисел Фруда, масштаб периода волны будет равен:

$$m_t = \frac{T_m}{T_h} = \sqrt{m_h}, \quad (3)$$

где индекс «м» относится к модели, а «н» – к натурным величинам.

Масштаб массы элементов наброски принимался равным

$$m_G = \frac{G_m}{G_h} = m_h^3. \quad (4)$$

Дно модели было сложено несвязным размываемым материалом (наносы со средней

крупностью $d_{50} = 1,0$ мм). Русло реки воспроизведено из песка, крупность которого соответствовала средней крупности материала, слагающего устьевые участки рек Черноморского побережья.

Цель работы – на основе гидравлического моделирования оценить деформации дна и эффективность защитных сооружений в приусտевой области.

Для подачи воды на модель русла реки была смонтирована установка с насосом производительностью 95 л/с, что соответствовало максимальному расходу паводка обеспеченностью 1 % – 960 м³/с.

Исследования проводились при следующих параметрах волн: высота $h_m = 7,5$ см; период $T_m = 1,47$ с. Данный волновой режим на модели соответствует натурному волновому режиму шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет с учетом выбранного масштаба $M 1 : 40$ и зависимостей (1) и (3): высота волн 1 % обеспеченности в системе по линии последнего обрушения составляла $h_{h1\%} = 3,0$ м; а период $T_h = 9,3$ с. Уровень наполнения бассейна водой во всех опытах был одним и тем же и составлял 50,7 см, что соответствовало расчетному уровню моря 1 % обеспеченности.

Определение параметров волн выполнялось с помощью измерительной системы, состоящей из персональной ЭВМ, соединенной с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) по каналу USB, платы фильтров, пассивной кабельной системы, измерительных датчиков, преобразователей, приспособлений к ним и вспомогательного оборудования. АЦП применяется типа Е-140 фирмы L-CARD, имеющий до 32 аналоговых каналов сбора данных. Для измерения параметров волн используются емкостные волнографы ДУЕ-1.

Для измерения скоростей течений на модели применены гидрометрические вертушки ГМЦМ-1 (ТУ КК 001.00.00.00.000). Каждый измеритель состоит из датчика и блока обработки информации. Датчик включает в себя первичный преобразователь скорости течения – лопастной винт и держатель лопастного винта. Датчик жестко фиксируется на штанге и связан с блоком обработки информации электрическим кабелем.

Расход воды, которая подавалась в модель русла реки, измерялся водомером, установленным после подающего насоса.

Систематические погрешности измерений практически исключались путем независи-

мого контроля с помощью секундомера и методом цифрового фотографирования и видеосъемки. Период волн определялся по секундомеру путем отсчета n -го количества волн, проходящих через определенную отметку шкалы дальности в течение времени t .

При измерении высот волн абсолютная погрешность составляла ± 2 мм, а при измерении периода волн $\pm 0,1$ с.

Изменения рельефа оценивались по данным нивелировок и результатам измерений от постоянного начала характерных точек профиля, определяемых в каждом опыте в одинаковых и тех же местах.

Оценка погрешностей получена по результатам обработки многократных измерений при одинаковых условиях. Повторяемость измерений была достаточно стабильной. Относительная погрешность измерения высоты волн находилась в пределах 5–7 % с доверительной вероятностью 95 %. Относительная погрешность измерений периода волн была не более 1 %.

Сравнение результатов измерений рельефа, сформированного в разных опытах, дает наглядное представление о деформациях, что позволяет судить о направленности процессов.

Воздействие волн разных направлений на сооружения и пляж в опытах было различным и отражало соотношение продолжительности воздействия штормов разных направлений в натурных условиях.

Результаты исследования

На модели был отсыпан волногасящий пляж, установлены камненабросная буна и оградительная дамба. Опыт продолжался 57 мин, что в пересчете на природу соответствует продолжительности пика паводка 6 ч.

Русло реки и струя паводочного потока отделены от волногасящей полосы, защищающей земляное полотно железной дороги, оградительной дамбой, непосредственное воздействие речного потока на которую было исключено.

При подаче воды в русло поверхностные скорости течения в реке составляли 0,64–0,77 м/с. Стрежень потока на выходе из устья отклонялся влево от оси русла. На встречном течении гребни волн становились круче и испытывали более раннее обрушение. Одновременно наблюдалось отставание гребней волн на струе встречного течения, в результате которого они приобретали вогнутую форму в плане.

Общий вид модели во время эксперимента представлен на рис. 2.

Деформации дна в зоне расположения паводочной струи представлены на рис. 3; деформации профилей в приустьевой части реки – на рис. 4, а в приустьевой зоне моря – на рис. 5. На модели отчетливо видна зона аккумуляции материала, вынесенного из русла реки. Внешняя граница этой зоны проходит на глубинах 3,5–6,0 м в пересчете на природу (см. рис. 3). Зона



Рис. 2. Общий вид модели во время эксперимента

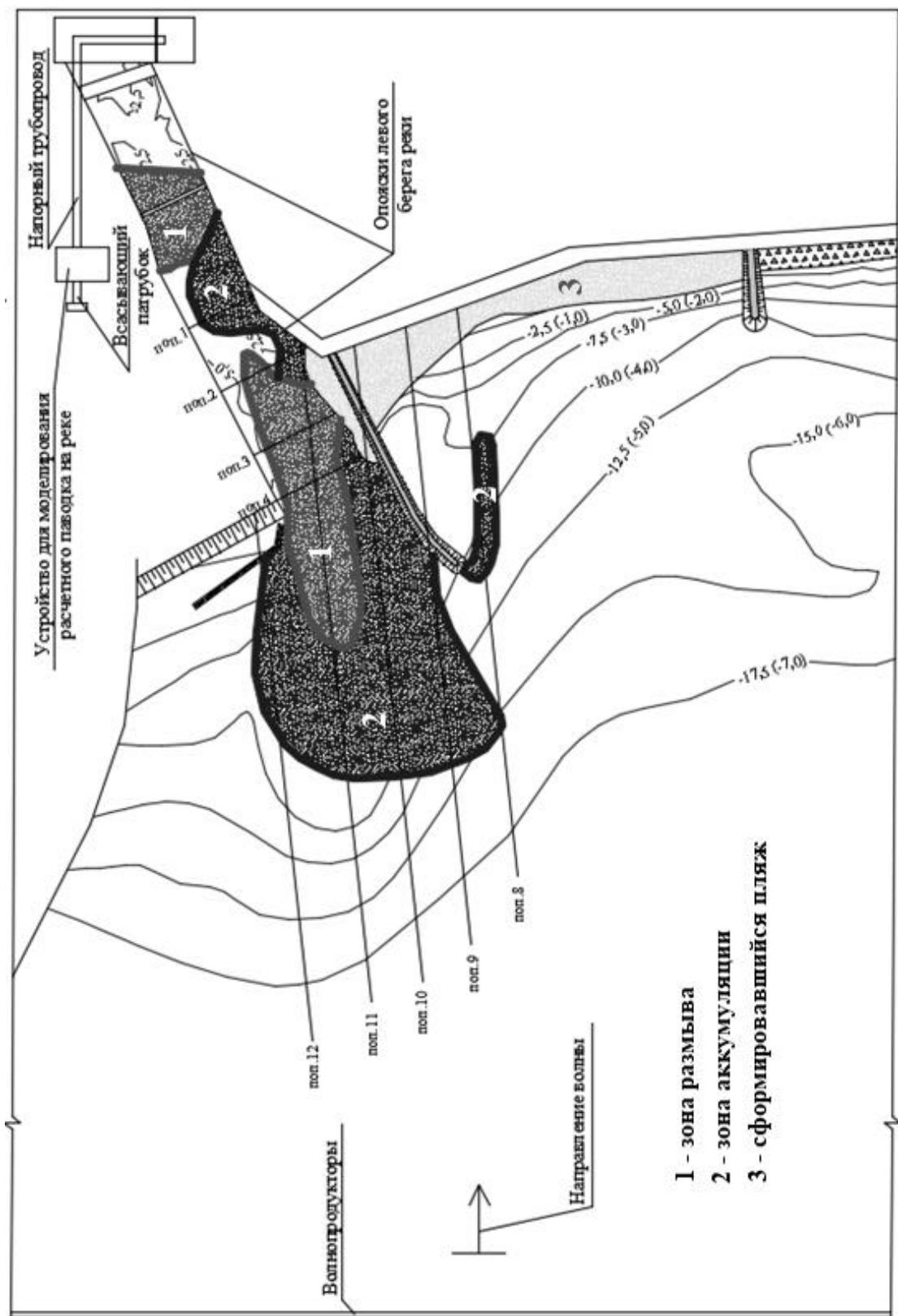


Рис. 3. Деформации дна в зоне расположения паводочной струи (в скобках приведены величины, соответствующие натурным)

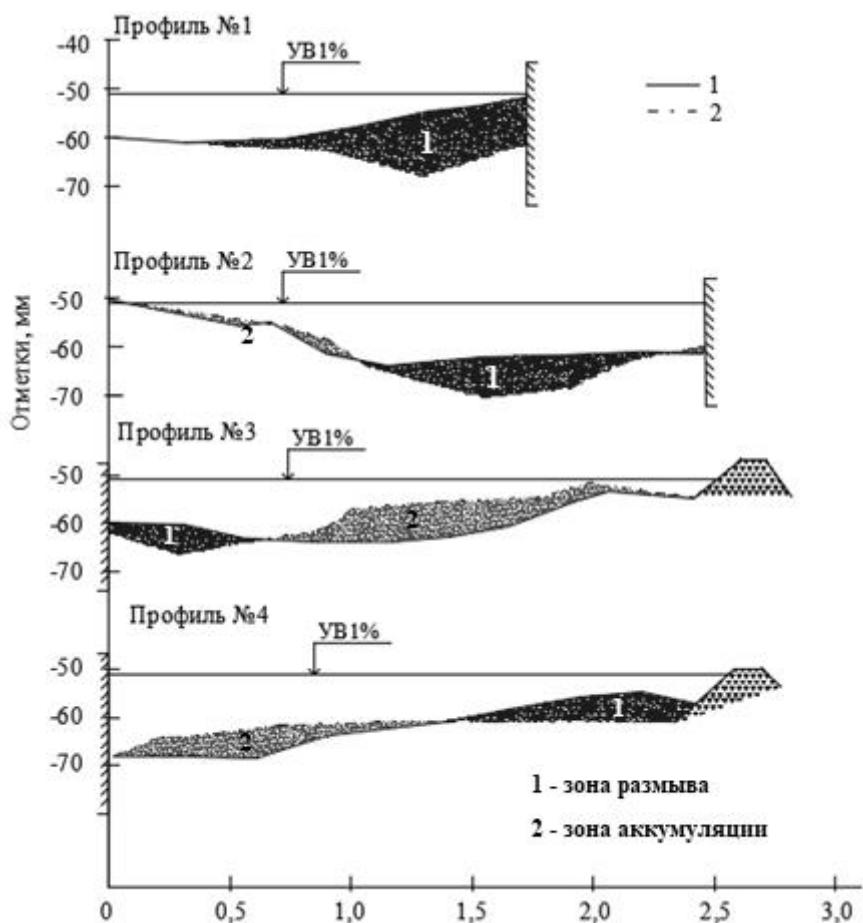


Рис. 4. Деформации профилей на модели в приусտевой части реки

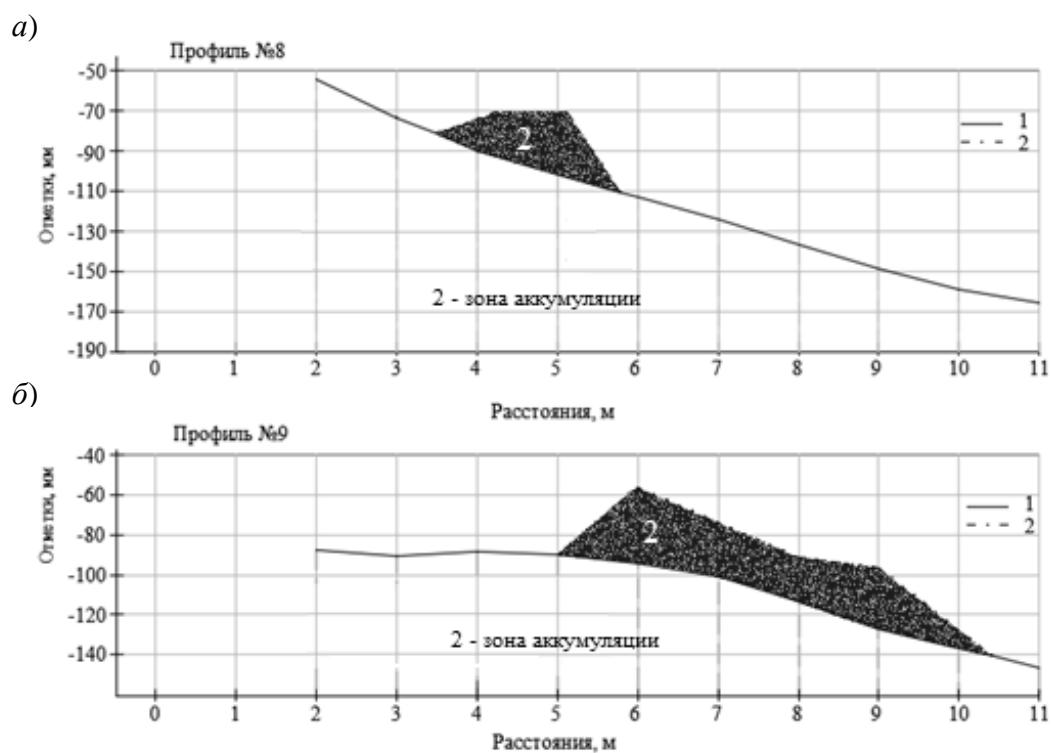


Рис. 5. Деформации профилей на модели в приусстевой зоне моря (начало):
а – профиль 8; б – профиль 9

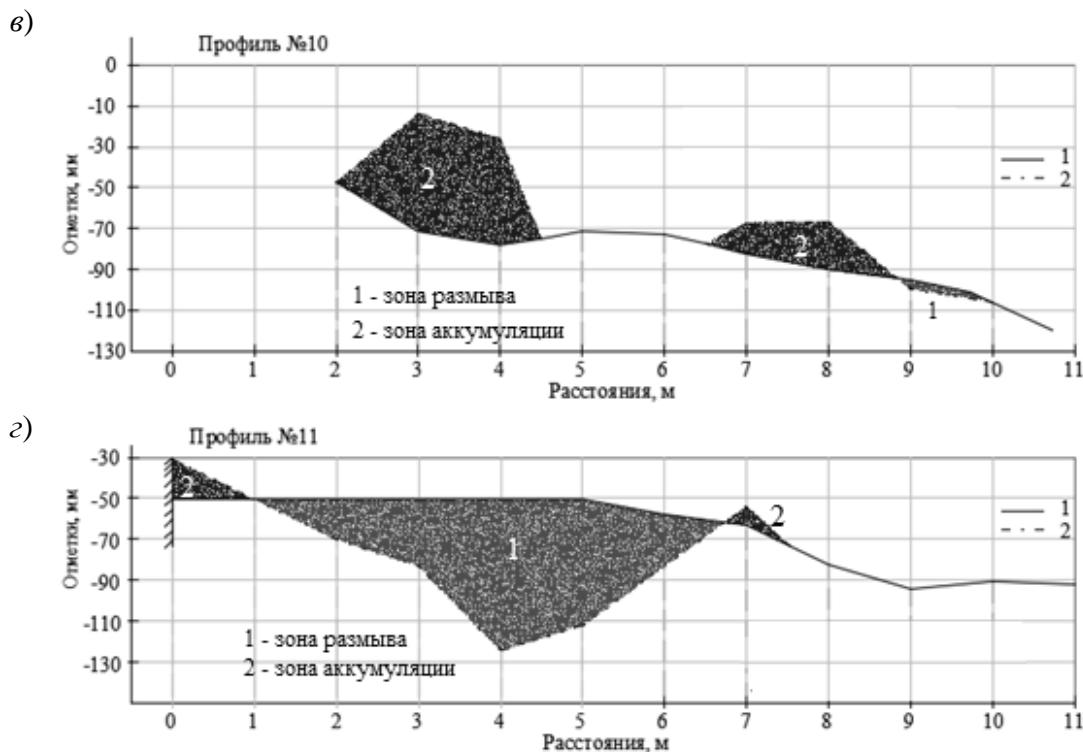


Рис. 5. Деформации профилей на модели в приусьевой зоне моря (окончание):
 а – профиль 10; б – профиль 11

размыва дна за пределами русла вытянута в виде языка до глубины 2,5 м и удалена от конца опояски на 146 м, а максимальный размыв подводного склона по линии продолжения русла реки (-3,0 м) удален в море всего на 40 м от створа устья (см. рис. 5, а). На профиле 8, расположеннем левее головной части оградительной дамбы, зафиксирован подводный вал, сформированный под действием волн и течений, вытянутый под углом к берегу и почти по линии профиля 8 (см. рис. 5, а).

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что зона размыва дна при расчетном паводке $960 \text{ м}^3/\text{с}$ выдвигается в море не более чем на 150 м от устья и не выходит за пределы изобаты 2,5 м. Кроме того, на отдельных участках имеет место аккумуляция материала от размыва русла и прибрежного дна паводочным потоком.

Выводы

При проектировании мостов, проходящих вдоль морских побережий, необходимо учитывать условия, которые могут возникнуть при выходе паводковой водной струи водотока в море. Обычно происходит частое сочетание паводков на малых водотоках, обусловленных

прохождением фронта ливневых осадков, с развитием волнения на море. При этом может возникнуть несколько ситуаций. Паводковая речная струя выходит в море при сильных волнах, формируемых при среднемноголетнем уровне моря. В этих условиях выходящая в море паводковая водная струя может испытывать подпор, возникающий из-за набегающей на нее штормовой волны. Развитие в море штормовой ситуации в большинстве случаев происходит на фоне повышения уровня моря в береговой зоне. Это повышение может быть обусловлено барическим эффектом и рядом других обстоятельств (ветровым и волновым нагоном). При проектировании необходимо учитывать повышение уровня моря до расчетного, т. е. возможного один раз в сто лет. В мелководной зоне около берега уровень моря может повышаться под воздействием штормовых волн (волновой нагон) и дующего с моря на сушу ветра (ветровой нагон). При проектировании защиты опор мостов следует рассчитывать воздействие волн на элементы защиты при уровне моря, равном сумме уровня моря расчетной обеспеченности и величин волнового и ветрового нагонов (расчетном уровне моря).

Взаимодействие волн при повышенном (до расчетного) уровне моря с речной паводковой струей создает подпор вытекающей в море воды, что приводит к увеличению отметок ее водной поверхности. Дополнительный подпор вытекающей в море речной струи может быть создан и наносами, перемещаемыми волнами в пределах пляжей. Это необходимо учитывать при расчете отметок как элементов моста, так и его защитных сооружений.

Для разработки проектных решений по защите опор мостов железнодорожных переходов, прокладываемых через устья малых водотоков, необходимо проведение гидравлических исследований на пространственных моделях в волновых бассейнах:

1) моделирование воздействия морских штормовых волн на защитные откосы мостовых переходов и динамику наносов;

2) моделирование воздействия речного потока при паводке на защитные откосы мостовых переходов и динамику наносов;

3) моделирование одновременного воздействия морских штормовых волн и речного потока при паводке на защитные откосы мостовых переходов и динамику наносов.

При выборе проектных решений конструкций инженерной защиты мостового перехода от гидродинамических воздействий водной среды следует учитывать случаи, где эти воздействия и деформации дна вблизи конструкций будут наибольшими.

Такой подход позволит с достаточной достоверностью воспроизвести сложные природные процессы взаимодействия вытекающей в море паводковой речной струи со штормовыми волнами при разных уровнях моря, а следовательно, оптимизировать разрабатываемые мероприятия.

Список источников

1. Urgent issues of anti-deformation measures to protect coastal railways / E. Ashpiz, A. Savin, R. Tlyavlin, G. Tlyavlina // Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, Turkey : MEDCOAST Foundation. 2019. Vol. 2. P. 841–852.
2. The Response of Turbidity Maximum to Peak River Discharge in a Macrotidal Estuary / Y. H. Yan, D. H. Song, X. W. Bao, N. Wang // Water. 2021. Vol. 13. P. 106. <https://doi.org/10.3390/w13010106>.
3. Sediment Transport on Continental Shelves: Storm Bed Formation and Preservation in Heterogeneous Sediments / T. R. Keen, R. L. Slingerland, S. J. Bentley [et al.] // Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves / eds. M. Z. Li, C. R. Sherwood and P. R. Hill. 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118311172.ch14>.
4. Wave asymmetry impacts on sediment processes at the nearshore of Fire Island, New York / M. S. Parlak, B. U. Ayhan, J. C. Warner [et al.] // Coastal Sediments. New Orleans, USA, 2023. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0173.
5. Иппен А. Д. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев / пер. с англ. А. В. Некрасова. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1970. 392 с.
6. Guo Y. Hydrodynamics in Estuaries and Coast: Analysis and Modeling // Water. 2022. Vol. 14. P. 1478. <https://doi.org/10.3390/w14091478>.
7. Антоненков Д. А., Щодро А. Е. Контроль и методика моделирования гидрологических процессов при проектировании гидротехнических сооружений в устьевых взморьях рек // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 55–62. DOI 10.33075/2220-5861-2021-4-55-62.
8. Щодро А. Е. Разработка методов расчета местных размывов несвязного грунта в зоне влияния речных и морских сооружений с учетом динамики водного потока и транспорта наносов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 74–87.
9. Antonenkov D. A., Shchodro A. E. Hydraulic Structures that Contribute to the Sediments Directed Transfer and the Mass Transfer Activation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. P. 032027. DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032027.
10. Шарп Д. Д. Гидравлическое моделирование. Москва : Мир, 1984. 280 с.
11. Frostick L. E., McLellan S. J., Mercer T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London : Taylor & Francis Group, 2011. 272 p. DOI 10.1201/b11335.
12. Клавен А. Б., Копалиани З. Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. Санкт-Петербург : Нестор-История, 2011. 544 с.

References

1. Ashpiz E., Savin A., Tlyavlin R., Tlyavolina G. Urgent issues of anti-deformation measures to protect coastal railways. *Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*, 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation. 2019. Vol. 2. P. 841–852.
2. Yan Y. H., Song D. H., Bao X. W., Wang N. The Response of Turbidity Maximum to Peak River Discharge in a Macrotidal Estuary. *Water*. 2021;13:106. <https://doi.org/10.3390/w13010106>.
3. Keen T. R., Slingerland R. L., Bentley S. J. [et al.]. Sediment Transport on Continental Shelves: Storm Bed Formation and Preservation in Heterogeneous Sediments. *Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves* (eds. M. Z. Li, C. R. Sherwood and P. R. Hill). 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118311172.ch14>.
4. Parlak, M. S., Ayhan B. U., Warner J. C. [et al.] Wave asymmetry impacts on sediment processes at the nearshore of Fire Island, New York. *Coastal Sediments*. 2023, New Orleans, USA. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0173.
5. Ippen A. T. Estuary and coastline hydrodynamics. Translated from English by A. V. Nekrasova. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. 392 p. (In Russ.).
6. Guo Y. Hydrodynamics in Estuaries and Coast: Analysis and Modeling. *Water*. 2022;14:1478. <https://doi.org/10.3390/w14091478>.
7. Antonenkov D. A., Shchodro A. Ye. Control and methodology for modeling hydrological processes in the design of hydrotechnical structures in the estuarine coastal areas of rivers. *Environmental Control Systems*. 2021;(46):55–62. DOI 10.33075/2220-5861-2021-4-55-62.
8. Shhodro A. E. Reparation of methods for assimilation of local undercutting of cohesionless soil under the influence of river and marine constructions in consideration of water flow and sediment transport. *Ecological safety of coastal and shelf zones of sea*. 2018;(2):74–87. (In Russ.).
9. Antonenkov D., Shchodro A. Hydraulic Structures that Contribute to the Sediments Directed Transfer and the Mass Transfer Activation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. P. 032027. DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032027.
10. Sharp D. D. *Hydraulic modelling*. Moscow: Mir; 1984. 280 p.
11. Frostick L. E., McLellan S. J., Mercer T. G. *Users guide to physical modelling and experimentation*. London: Taylor & Francis Group; 2011. 272 p. DOI 10.1201/b11335.
12. Klaven A. B., Z. D. Kopaliani. *Experimental Studies and Hydraulic Modeling of River Flows and Channel Processes*. Saint Petersburg: Nestor-History; 2011. DOI 10.3141/2202-12.

Информация об авторах

Г. В. Тляевлина – кандидат технических наук, заведующая лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве Научно-исследовательского центра «Морские берега»; докторант кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта (МИИТ).

В. А. Петров – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве Научно-исследовательского центра «Морские берега».

Р. М. Тлявлин – кандидат технических наук, заместитель генерального директора Научно-исследовательского центра транспортного строительства – руководитель Научно-исследовательского центра «Морские берега».

Г. А. Емельянова – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта (МИИТ).

Information about the authors

G. V. Tlyavolina – Candidate of Engineering, Head of the Modeling, Calculations and Standardization in Hydraulic Engineering Laboratory, Joint Stock Company ‘Central Research Institute of Transport Construction’, R&D Centre ‘Morskie berega’; doctoral student of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport.

V. A. Petrov – Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of the Modeling, Calculations and Rationing in Hydraulic Engineering Laboratory, Joint Stock Company ‘Central Research Institute of Transport Construction’, R&D Centre ‘Morskie berega’.

R. M. Tlyavlin – Candidate of Engineering, Head of the R&D Centre ‘Morskie berega’, Joint Stock Company ‘Central Research Institute of Transport Construction’.

G. A. Emelianova – Doctor of Engineering, Professor of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT).

Статья поступила в редакцию 11.04.2025; одобрена после рецензирования 21.08.2025; принятая к публикации 29.08.2025.

The article was submitted 11.04.2025; approved after reviewing 21.08.2025; accepted for publication 29.08.2025.

Научная статья
УДК 656.627.21
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_52

Методический подход к ускоренной оценке грузоподъемности мостов на автомобильных дорогах в особый период

Валерий Николаевич Мячин¹, Дмитрий Владимирович Мирошников^{2✉},
Дмитрий Александрович Шестовицкий³

^{1, 2} Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева,
Санкт-Петербург, Россия

³ Петербургский государственный университет путей сообщений Императора Александра I, Санкт-Петербург,
Россия

¹ vnmyachin@yandex.ru

² d1084@mail.ru✉

³ shestovitsky@mail.ru

Аннотация. Срок службы постоянных автодорожных мостов может достигать 50 лет и более без проведения капитальных работ, направленных на повышение эксплуатационной надежности. В связи с этим техническое состояние таких сооружений значительно варьируется, причем большая часть объектов находится в неудовлетворительном состоянии.

Актуальной проблемой остается несоответствие проектной и фактической несущей способности мостовых конструкций, а также отсутствие оперативных методов оценки грузоподъемности мостов в полевых условиях. Это критично при необходимости организации движения автомобильной, военной или специальной техники по мостам, имеющим разрушения. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки упрощенных методик приближенного определения грузоподъемности и условий безопасного пропуска техники.

В данной статье предложен методический подход к оперативной оценке грузоподъемности пролетных строений железобетонных мостов, суть которого заключается в определении несущей способности путем расчета максимальных изгибающих моментов в балках с учетом постоянных и временных нагрузок. Для упрощения вычислений авторы разработали специальные графические зависимости, учитывающие реальное состояние объектов и позволяющие оценить грузоподъемность на основе данных визуального обследования, без использования сложных математических моделей.

Данный методический подход может быть применен военными инженерами для ускоренной оценки грузоподъемности пролетных строений мостов в полевых условиях. Он позволяет в короткие сроки выполнить анализ технического состояния пролетных строений и принять решение о возможности пропуска техники, что особенно важно в условиях чрезвычайных ситуаций или военных действий.

Ключевые слова: мост, особый период, оценка грузоподъемности, несущая способность, повреждение (дефект), изгибающий момент

Для цитирования: Мячин В. Н., Мирошников Д. В., Шестовицкий Д. А. Методический подход к ускоренной оценке грузоподъемности мостов на автомобильных дорогах в особый период // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 52–61. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_52.

Original article

A methodical approach to the accelerated assessment of the load capacity of bridges on highways in a special period

Valery N. Myachin¹, Dmitry V. Miroshnikov^{2✉}, Dmitry A. Shestovitsky³

^{1, 2} Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg State University of Railway Transport Emperor Alexander I, St. Petersburg, Russia

¹ vnmyachin@yandex.ru

² d1084@mail.ru✉

³ shestovitsky@mail.ru

Abstract. The service life of major road bridges can reach 50 years or more without major repairs aimed at improving their operational reliability. As a result, the technical condition of such structures varies significantly, with most of them being in poor condition.

One of the main issues is the discrepancy between the design and actual load-bearing capacity of bridge structures, as well as the lack of operational methods for assessing their load-bearing capacity in the field. This is

particularly critical when it comes to allowing vehicles, military equipment, or special vehicles to pass through bridges that have been damaged. These factors necessitate the development of simplified methods for approximately determining the load capacity and conditions for safe passage of vehicles.

This article proposes a methodological approach for the operational assessment of the load capacity of reinforced concrete bridge spans. The essence of the methodology is to determine the load capacity by calculating the maximum bending moments in the beams, taking into account the constant and temporary loads. To simplify the calculations, the authors have developed special graphical dependencies that allow for the assessment of load capacity based on visual inspection data without the use of complex mathematical models.

This methodological approach can be applied by military engineers for an accelerated assessment of the load capacity of bridge spans in the field. It allows for a quick analysis of the technical condition of bridge spans and the decision-making process regarding the possibility of passing vehicles, which is particularly important in emergency situations or military operations.

Keywords: bridge, special period, load capacity assessment, bearing capacity, damage (defect), bending moment

For citation: Myachin V. N., Miroshnikov D. V., Shestovitsky D. A. A methodical approach to the accelerated assessment of the load capacity of bridges on highways in a special period. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):52–61. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_52.

Введение

Обеспечение пропуска техники военно-транспортного потока по мостам на автомобильных дорогах – одна из важнейших задач дорожных войск в особый период. Ввиду интенсивного воздействия вероятного противника по мостам военные инженеры, как правило, возводят в кратчайшие сроки взамен подвергшихся воздействию противника постоянных мостов временные или краткосрочные мосты из табельных средств или местных материалов.

Количество табельных мостов дорожных войск ограничено, применение местных строительных материалов также может быть затруднено из-за их наличия. Поэтому оценка грузоподъемности частично разрушенных постоянных мостов в кратчайшие сроки и определение возможности пропуска по ним техники военно-транспортного потока является

актуальной задачей для мостовых частей дорожных войск в особый период.

Как показывает опыт вооруженных конфликтов и локальных войн, постоянные мосты на автомобильных дорогах могут быть разрушены в ходе ударов противника по колоннам войск частично, с возможностью их быстрого ремонта и восстановления воинского движения в кратчайшие сроки. Это подтверждается и ходом специальной военной операции (СВО) на Украине, где у большого количества постоянных железобетонных мостов вследствие воздействия по ним крылатых ракет средней дальности и реактивной артиллерии (типа HIMARS) частично разрушены покрытие и плита проезжей части балок пролетного строения (рис. 1, 2).

Нанесение ударов по мостам, как правило, осуществлялось с применением ракетных комплексов, таких как «Точка», реактивной



Rис. 1. Последствия ударов ВСУ по Антоновскому мосту



Рис. 2. Последствия ударов ВСУ по мосту на Каховской ГЭС

системы залпового огня «Ольха» и американских РСЗО HIMARS, отличающихся значительной дальностью и высокой точностью поражения объектов. В качестве боеприпасов чаще всего использовались реактивные снаряды типа M31, оснащенные 91-килограммовой моноблочной осколочно-фугасной боевой частью в стальном корпусе.

Такие снаряды при помощи GPS успешно наводятся на стационарные цели. Приближаясь, управляемый снаряд начинает вертикальное падение на цель, что дает ему высокую пробивную силу. Однако полностью разрушить мост такие снаряды не в состоянии. Фугасные боевые части, как правило, оставляют лишь отдельные пробоины в железобетонных конструкциях пролетного строения и мостовом полотне, существенно не повреждая опоры моста.

В складывающейся оперативно-тыловой обстановке при массовом разрушении мостовых переходов перед частями дорожных войск будет стоять задача в кратчайшие сроки обеспечить движение военно-транспортного потока. Кроме колонн автомобильной техники, по мостам потребуется пропустить и особо тяжелые одиночные транспортные средства: трейлеры, тягачи и специальные виды техники. Командир отделения инженерной разведки должен определить грузоподъемность поврежденного постоянного

моста с целью его использования для восстановления воинского движения по автомобильной дороге.

Применяемые в настоящее время методики определения грузоподъемности железобетонных мостов, основанные на детальном расчете по нормам проектирования мостов, включая моделирование напряженно-деформированного состояния с учетом дефектов, являются трудоемкими и порой невозможны в полевых условиях.

Цель исследования – предложить упрощенный инструмент оценки грузоподъемности мостов на автомобильных дорогах в особый период, который учитывает повреждения пролетного строения и позволяет военным инженерам принимать предварительные решения по пропуску техники без полного пересчета конструкции.

Материалы и методы исследования

При расчете грузоподъемности автодорожных мостов в качестве эталонных используются нагрузки по схемам АК (нормативная нагрузка от автотранспортных средств), НК (нормативная нагрузка от автотранспортных средств, осуществляющих перевозки тяжеловесных грузов, пропускаемых в специальном режиме) и эталонной трехосной нагрузки. Однако в особый период для определения возможности пропуска

техники военно-транспортного потока в качестве эталонных нагрузок предлагается применять нагрузки НГ-60 и Н-30, которые соответствуют реальному составу транспортного потока в военное время [1].

Как известно, грузоподъемность пролетного строения принимают по грузоподъемности наиболее слабого несущего элемента (главной, поперечной или продольной второстепенной балки и пр.) Таким образом, применяя математический аппарат вероятностного и детерминированного анализа, грузоподъемность моста [2] можно определить по формуле

$$\min G = \left| \frac{(S_{ult} i - S_{const} i)}{S_{ki}} \right| K, \quad (1)$$

где $\min G$ – минимальная грузоподъемность i -го элемента моста; $S_{ult} i$ – несущая способность i -го элемента конструктивной системы; $S_{const} i$ – усилие в i -м элементе от j -го фактора внешних нагрузок и воздействий; S_{ki} – усилие в i -м элементе от временной эталонной нагрузки; K – масса транспортного средства из состава произвольной нагрузки, в единицах которой определяется класс грузоподъемности.

Определение предельного усилия S_{ult} (несущей способности) элементов моста осуществляется по геометрическим размерам и механическим (прочностным, деформативным) свойствам материалов, сложившимся к рассматриваемому периоду времени с учетом характера статической работы конструктивной системы.

В свою очередь, расчет тавровых и двутавровых сечений с плитой в сжатой зоне следует

производить в зависимости от положения границы сжатой зоны:

1. Граница сжатой зоны проходит в плите (рис. 3, a), т. е. соблюдается условие

$$R_p A_p + R_s A_s \leq R_b b_f' x + R_{sc} A_s + \sigma_{pc} A_p', \quad (2)$$

где R_p – расчетное сопротивление растяжению в напрягаемой арматуре, МПа, определяется по табл. 7.16 СП 35.13330.2011; R_s – расчетное сопротивление растяжению в ненапрягаемой арматуре, МПа, определяется по табл. 7.16 СП 35.13330.2011; A_s – площадь поперечного сечения сжатой арматуры; R_b – расчетное сопротивление бетона соответствующего класса по прочности на сжатие, МПа, определяется по табл. 7.62 СП 35.13330.2011; b_f – ширина сжатой зоны; R_{sc} – расчетное сопротивление сжатию в ненапрягаемой арматуре, МПа, определяется в соответствии с п. 7.38 СП 35.13330.2011; σ_{pc} – наибольшее сжимающее напряжение в напрягаемой арматуре.

В данном случае расчет необходимо производить по формуле

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_{01} - a_s') + \sigma_{pc} A_p' (h_0 - a_p'), \quad (3)$$

при этом высоту сжатой зоны бетона x следует определять исходя из условия

$$R_p A_p + R_s A_s - R_{sc} A_s' - \sigma_{pc} A_p' = R_b b x. \quad (4)$$

2. Граница сжатой зоны проходит в ребре (см. рис. 3, \bar{b}), т. е. условие (2) не соблюдается.

Тогда расчет должен выполняться из условия $M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_b (b_f' - b) h_f' (h_0 - 0,5h_f') + R_{sc} A_s' (h_{01} - a_s') + \sigma_{pc} A_p' (h_0 - a_p'),$ (5)

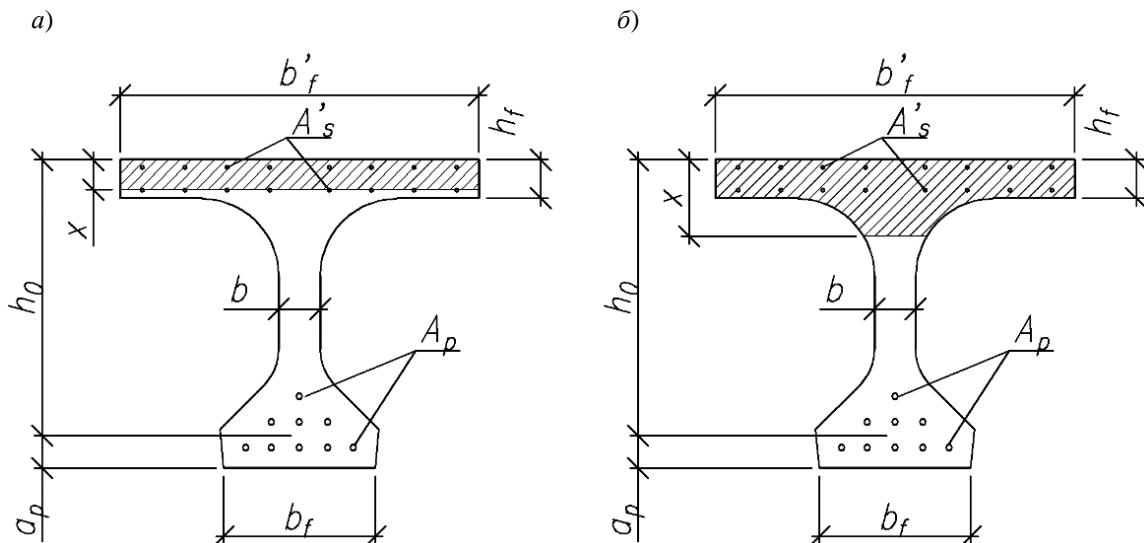


Рис. 3. Расчетная схема несущей способности балки:
а – сжатая зона в плите; б – сжатая зона в ребре

при этом для определения высоты сжатой зоны бетона x следует использовать формулу

$$R_p A_p + R_s A_s - R_{sc} A'_s - \sigma_{pc} A'_p = R_b b x + R_b (b'_f - b) h'_f. \quad (6)$$

Результаты исследования

В зависимостях (3) и (4) для определения максимального изгибающего момента все величины будут детерминированными, кроме ширины сжатой зоны b_f , которая в данном случае будет являться стохастической величиной, зависящей от диаметра отверстия в плите z (рис. 4).

Таким образом, для ускоренной оценки максимального изгибающего момента балки пролетного строения можно изобразить зави-

симость несущей способности M_{ult} от величины z с помощью графика (рис. 5).

Расчетные усилия от постоянных нагрузок определены из условия равномерного распределения постоянных нагрузок между балками. Постоянные нагрузки принимаются в виде интенсивности на 1 п. м линии влияния.

Следовательно, расчетное усилие от постоянных нагрузок определяется по формуле [3]:

$$S_{\text{const}} = \sum (\gamma_{fi} g_i \omega_i), \quad (7)$$

где γ_{fi} – коэффициенты надежности к учитывающим постоянным нагрузкам, принимаемые в соответствии с данными табл. 2 ОДМ 218.4.025–2016; g_i – интенсивность учитываемых посто-

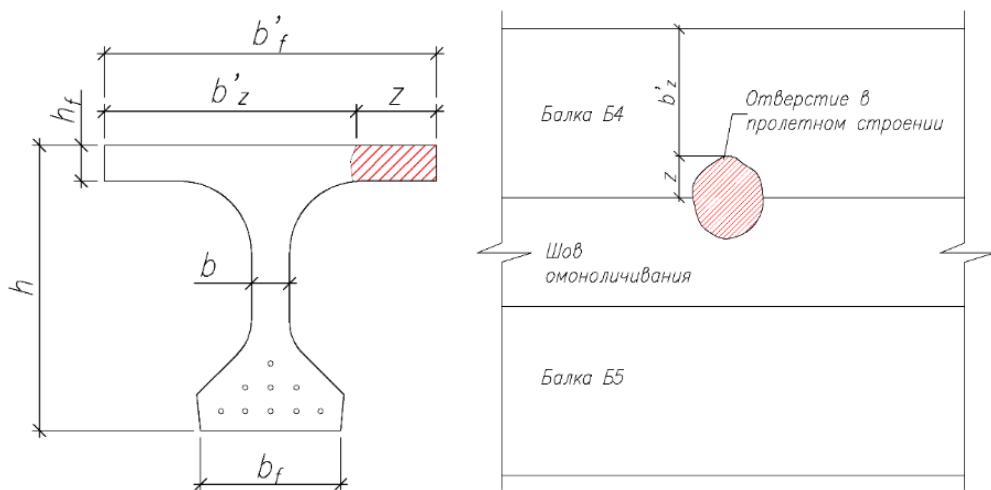


Рис. 4. Главная балка Б4 пролетного строения с отверстием в плите проезжей части

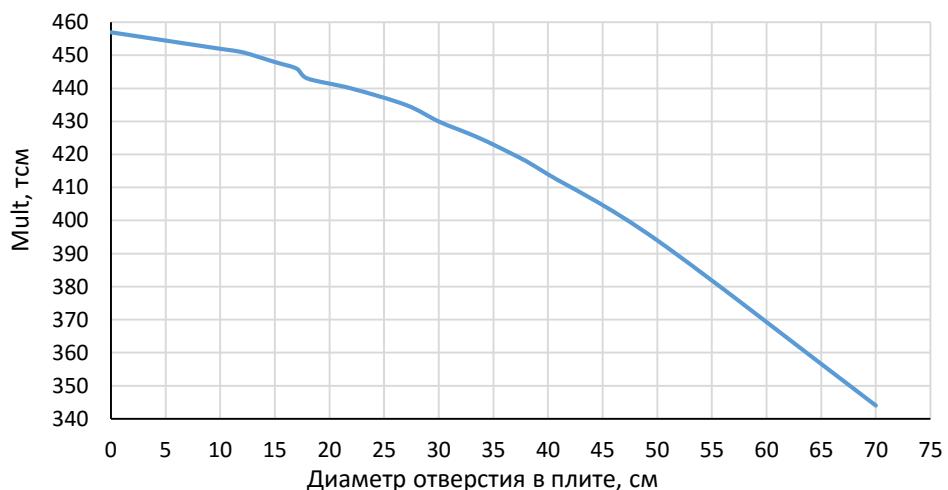


Рис. 5. Зависимость несущей способности M_{ult} двутавровой балки пролетного строения длиной 24 м от диаметра отверстия z

янных нагрузок, кПа ($\text{тс}/\text{м}^2$); ω_i – площадь поверхности влияния воздействия под зоной приложения каждой постоянной нагрузки, м^2 .

Нормативная интенсивность от веса балки пролетного строения принимается в соответствии с данными типового проекта.

Наибольший изгибающий момент от постоянных нагрузок возникает в середине пролета. Определить его возможно по формуле

$$M_n = g \omega_m, \quad (8)$$

где ω_m – площадь линии влияния момента в середине балки.

Величина ω_m определяется как

$$\omega_m = \frac{(L-x)x}{2}, \quad (9)$$

где L – расчетная длина пролетного строения, м; x – координата по длине балки до отверстия.

Частично разрушенная балка, несущая способность которой соответствует усилиям, воспринимаемым ей от собственного веса и других постоянных нагрузок на ней, исключается из расчета. Балки, которые не могут нести свой собственный вес, считаются полностью разрушенными и в расчетах не учитываются, а усилия от их собственного веса перераспределяют между остальными балками с учетом

пространственных методов расчета пролетных строений. При этом проезд транспортных средств по участкам, расположенным над разрушенными балками, независимо от результатов расчетов не допускается. Указанные участки должны быть ограждены.

Следовательно, при разном габарите моста переменными величинами являются шов омоноличивания и расстояния между балками, которые влияют на ширину выравнивающего слоя, гидроизоляции и защитного слоя. Также переменной величиной является толщина покрытия проезжей части (асфальтобетона). В свою очередь, площадь линии влияния, в соответствии с формулой (9), будет варьироваться в зависимости от расчетной длины балок пролетного строения.

Таким образом, для ускоренной оценки максимального изгибающего момента от постоянных нагрузок можно вывести зависимость в виде графика (рис. 6).

Воздействие от вертикальной временной нагрузки при различных ее положениях на ездовом полотне определяют процедурой «прокатки» схемы нагрузки по поверхностям либо линиям влияния. Необходимо отметить, что при загружении поверхностей влияния про-

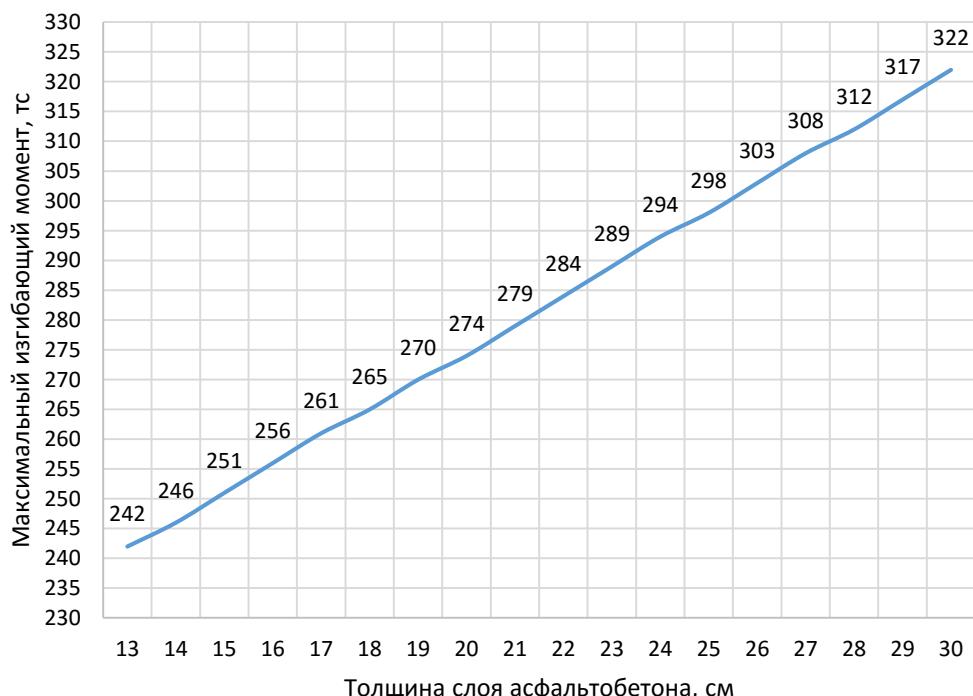


Рис. 6. График для вычисления максимального изгибающего момента от собственного веса пролетного строения моста для габарита Г-11,5

пространственная работа конструкции пролетного строения учтена в ординатах сформированной поверхности влияния. При загружении линии влияния пространственное распределение нагрузки учитывается при помощи коэффициента поперечной установки.

Воздействия от временных вертикальных нагрузок при использовании аппарата загружения линий влияния с учетом коэффициентов поперечной установки определяют по формулам [3]:

$$S_{\text{НГ-60}} = K_{\text{ПУ}} \gamma_f \text{НГ-60} (1 + \mu) v \omega, \quad (10)$$

$$S_{\text{Н-30}} = K_{\text{ПУ}} \gamma_f \text{Н-30} (1 + \mu) \sum S_i (\sum P_{ki} a_{ki}), \quad (11)$$

где $S_{\text{НГ-60}}$, $S_{\text{Н-30}}$ – воздействия от нагрузок НГ-60 и Н-30 (или произвольных колесных нагрузок) соответственно; $K_{\text{ПУ}}$ – коэффициенты поперечной установки для нагрузок по соответствующим схемам; $\gamma_f \text{НГ-60}$, $\gamma_f \text{Н-30}$ – коэффициенты надежности к осевой и распределенной частям временной нагрузки соответственно; $(1 + \mu)$ – динамические коэффициенты равномерно распределенной части нагрузки НГ-60 или Н-30; v – интенсивность распределенной временной части нагрузки НГ-60 на i -й полосе, кПа (tc/m^2); ω – площадь линии влияния воздействия под зоной приложения распределенной временной нагрузки; S_i – коэффициент полосности; P_{ki} – давление на k -е колесо временной нагрузки на i -й полосе; a_{ki} – ордината линии влияния воздействия под k -й осью на i -й полосе.

Также допускается вместо сосредоточенных величин давлений на оси использовать величины давления, распределенные по длине отпечатков колес.

Для определения коэффициента поперечной установки $K_{\text{ПУ}}$ линии влияния давления на рассматриваемую балку загружаются нагрузками НГ-60 и Н-30 самым невыгодным образом [4].

Для вычисления коэффициента поперечной установки необходимо произвести расчет для каждой балки и для каждого вида нагрузки отдельно.

Коэффициент поперечной установки для нагрузки НГ-60 определяется как сумма ординат линии влияния давления под точками приложения сосредоточенных сил по формуле [3]:

$$K_{\text{ПУ}} \text{НГ-60} = 0,5(y_1 + y_2). \quad (12)$$

Для полосовой нагрузки Н-30 коэффициент поперечной установки определяется методом внецентренного сжатия:

$$K_{\text{ПУ}} \text{Н-30} = 0,5(\sum_1^2 y_i \max + S_i \sum_3^n y_i \max), \quad (13)$$

где y_i – ординаты линии влияния под осями колес временной нагрузки; S_i – коэффициент полосности.

Однако, если рассматривать поврежденное пролетное строение, по которому возможно пропускать транспорт только по определенной схеме и вероятность разрушения которого возникает при одновременном загружении двух или более полос движения, коэффициент полосности S_i следует принимать равным единице [5, 6]. В данном случае предлагается пропускать транспорт только одной колонной по одной полосе (рис. 7).

Дальнейшие расчеты производятся для балки с максимальными значениями $K_{\text{ПУ}}$.

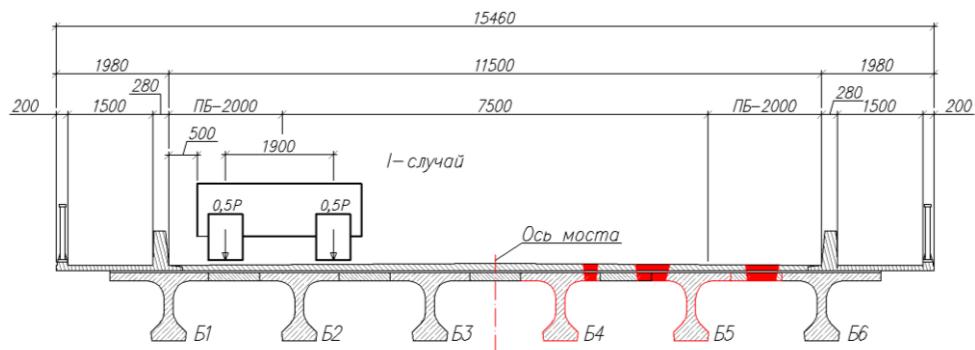
Из формул (10), (11) следует, что для определенной длины пролетного строения неизменными величинами для каждого вида нагрузки являются коэффициенты надежности к осевой и распределенной частям временной нагрузки [6], динамические коэффициенты, интенсивность и площадь линии влияния воздействия под зоной приложения распределенной временной нагрузки НГ-60, P_{ki} – давление на k -е колесо временной нагрузки и ордината линии влияния воздействия под k -й осью нагрузки Н-30. Переменной величиной остается коэффициент поперечной установки, так как он будет иметь различные значения для i -й балки.

Коэффициенты [7], $\gamma_f \text{Н-30}$, $(1 + \mu)_{\text{НГ-60}}$, $(1 + \mu)_{\text{Н-30}}$, v являются табличными величинами. Значение ω – площади линий влияния под нагрузкой НГ-60 можно также вычислить для каждой длины пролета и принять как детерминированную величину. Аналогично значение $\sum P_{ki} a_{ki}$ становится детерминированной величиной после расчета для каждого пролетного строения.

Единственным значением, которое будет переменным для i -й балки, является $K_{\text{ПУ}}$. Следовательно, для ускоренной оценки изгибающего момента от временной нагрузки можно составить график (рис. 8).

Таким образом, имея графики (см. рис. 5, 6, 8) и подставляя значения M_{ulti} , $M_{\text{const} i}$, M_{ki}

а)



б)

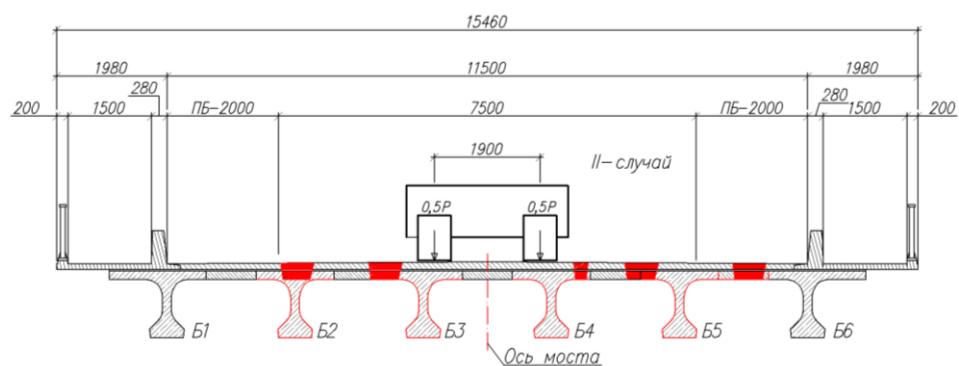
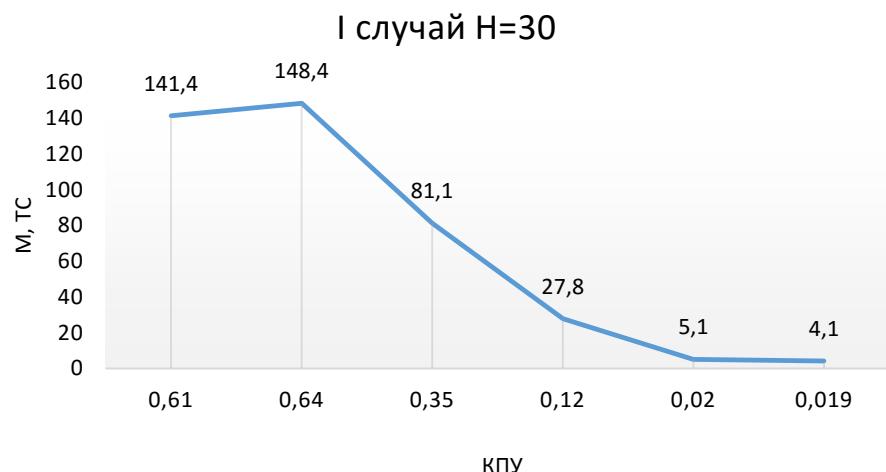


Рис. 7. Расчетная схема поперечного сечения моста габаритом Г-11,5 под автомобильную нагрузку Н-30:
а – по I случаю загружения; б – по II случаю загружения

а)



б)

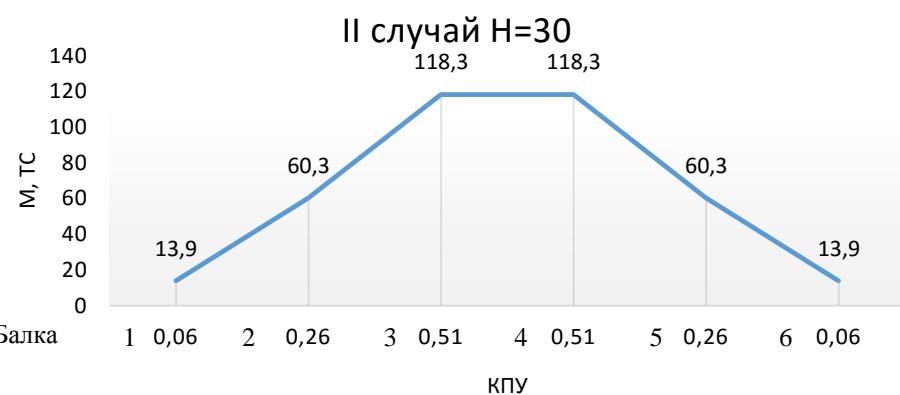


Рис. 8. Зависимость изгибающего момента от KПУ под нагрузку Н-30:
а – по I случаю загружения; б – по II случаю загружения

в формулу (1), можно в кратчайшие сроки определить грузоподъемность пролетного строения автодорожного моста [8, 9] под эквивалентную военную нагрузку НГ-60, а также автомобильную Н-30.

Выводы

На основе данного подхода к оценке грузоподъемности мостов возможно в мирное время, в период заблаговременной подготовки, с применением такой базы, как АБДМ (автоматизированная база данных по мостам),

подготовить необходимые данные для прогнозирования вероятного снижения грузоподъемности мостов на сети автомобильных дорог в результате воздействия противника [10].

В настоящее время ведется работа по созданию программно-расчетного комплекса, позволяющего с незначительной погрешностью оперативно оценивать грузоподъемность железобетонных мостов после воздействия по ним вероятного противника.

Список источников

1. ВСН 32–89. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов. Москва : Минавтодор, 1991. 189 с.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* : дата введения 2011-05-20. Москва, 2011. 321 с.
3. ОДМ 218.4.025–2016. Методические рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Общая часть. Москва : ФДА, 2019. 58 с.
4. Саламахин П. М. Проблемы, вызывающие необходимость замены нормативных временных нагрузок АК для автодорожных мостовых сооружений // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2010.
5. ОДМ 218.4.026–2016. Методические рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва : ФДА, 2020. 222 с.
6. Озорнин А. А., Аникин М. Н., Мирошников Д. В. Предложение по ускоренной оценке грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на военно-автомобильных дорогах. Санкт-Петербург : ВА МТО, 2024. 7 с.
7. ГОСТ 33384–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование мостовых сооружений. Общие требования. Москва, 2015. 24 с.
8. ГОСТ 31937–2011. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва, 2011. 89 с.
9. ОДМ 218.5.2.001–2022. Методические рекомендации по частичной замене железобетонных балок эксплуатируемого пролетного строения на сталежелезобетонные и железобетонные при проведении капитальных ремонтов, ремонтов и аварийных работ. Москва, 2022. 77 с.
10. Военные автодорожные мосты : инструкция по определению условий пропуска техники. Москва : Вениздат, МО СССР, 1977. 200 с.

References

1. VSN 32-89. Instructions for determining the load capacity of reinforced concrete girder superstructures of operated highway bridges. Moscow: Minavtodor; 1991. 189 p.
2. SP 35.13330.2011 Bridges and pipes. Rules of examinations and tests. Updated version of SNiP 2.05.03-84*. Moscow; 2011. 321 p.
3. ODM 218.4.025–2016. Methodological recommendations for determining the load capacity of operated bridge structures on public roads. The general part. Moscow: FDA; 2019. 58 p.
4. Salamakhin P.M. Problems causing the need to replace the standard temporary loads of AK for highway bridge structures. Scientific article. Moscow: MADI; 2010. 8 p.
5. ODM 218.4.026–2016. Methodological recommendations for determining the load capacity of operated bridge structures on public roads. concrete and reinforced concrete structures. Moscow: FDA; 2020. 222 p.
6. Ozornin A. A., Anikin M. N., Miroshnikov D. V. Proposal for an accelerated assessment of the load capacity of operated bridge structures on military highways Scientific article. St. Petersburg: VA MTO; 2024. 7 p.

7. GOST 33384–2015. The interstate standard. Public roads. Design of bridge structures. General requirements. Moscow; 2015. 24 p.
8. GOST 31937–2011. Rules of inspection and monitoring of technical condition. Moscow; 2011. 89 p.
9. ODM 218.5.2.001–2022. Methodological recommendations for the partial replacement of reinforced concrete beams of an operational superstructure with steel-reinforced concrete and reinforced concrete during major repairs, repairs and emergency work. Moscow; 2022. 77 p.
10. Military highway bridges. Instructions for determining the conditions for passing equipment. Paramilitary. Ministry of Defense of the USSR. Moscow; 1977. 200 p.

Информация об авторах

В. Н. Мячин – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры военных мостов и переправ Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

Д. В. Мирошников – адъюнкт кафедры военных мостов и переправ Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

Д. А. Шестовицкий – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщений Императора Александра I.

Information about the authors

V. N. Myachin – Doctor of Engineering, Professor, Associate Professor of the Military Bridges and Crossings Department, Military Academy of Logistics named after Army General A. V. Khrulev.

D. V. Miroshnikov – Associate Professor of the Military Bridges and Crossings Department, Military Academy of Logistics named after Army General A. V. Khrulev.

D. A. Shestovitsky – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Bridges Department, St. Petersburg State University of Communications named after Emperor Alexander I.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 19.08.2025; принята к публикации 06.10.2025.

The article was submitted 15.04.2025; approved after reviewing 19.08.2025; accepted for publication 06.10.2025.

Научная статья
УДК 625.745.12
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_62

Планирование работ по содержанию мостовых сооружений на основе мониторинга технического состояния

Татьяна Васильевна Самодурова¹✉, Станислава Валерьевна Кузнецова²

^{1,2} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ tsamodurova@cchgeu.ru✉

² kuznetsovastanislava@gmail.com

Аннотация. Обеспечение нормативного состояния сети автомобильных дорог и искусственных сооружений на них – одна из приоритетных задач Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года и национального проекта «Безопасные качественные дороги». Увеличение интенсивности движения на автомобильных дорогах Российской Федерации, особенно в направлении южных регионов, предъявляет все более жесткие требования к их техническому состоянию. Наиболее сложными и требующими наибольших финансовых вложений на этапе эксплуатации являются искусственные сооружения. Техническое состояние как вновь построенных мостовых сооружений, так и тех, что были приведены в нормативное состояние посредством ремонтно-восстановительных работ, будет зависеть от своевременно принятых мер по их ремонту, капитальному ремонту или реконструкции.

Целью настоящего исследования являлось рассмотрение существующих инструментов сбора исходных данных о техническом состоянии мостовых сооружений или парка мостовых сооружений, выявление плюсов и минусов существующих баз данных для хранения и обработки информации об искусственных сооружениях, определение методов прогноза технического состояния на основе долгосрочного мониторинга для наиболее рационального планирования затрат на их содержание.

В статье приведены основные этапы прогнозирования затрат на содержание искусственных сооружений, современные технологии сбора исходных данных, их преимущества и недостатки относительно традиционных; рассмотрены основные возможности и недостатки существующих баз данных для хранения и обработки информации о сооружениях; предложены методы прогнозирования развития дефектов искусственных сооружений на основе данных долгосрочного мониторинга, а также механизмы, позволяющие оптимизировать затраты на период содержания искусственных сооружений благодаря прогнозу развития дефектов во времени для конкретного парка искусственных сооружений.

Ключевые слова: мостовые сооружения, развитие дефектов, эксплуатация, мониторинг

Для цитирования: Самодурова Т. В., Кузнецова С. В. Планирование работ по содержанию мостовых сооружений на основе мониторинга технического состояния // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 62–69. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_62.

Original article

Planning bridge maintenance work based on technical condition monitoring

Татьяна В. Самодурова¹✉, Станислава В. Кузнецова²

^{1,2} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹ tsamodurova@cchgeu.ru✉

² kuznetsovastanislava@gmail.com

Abstract. Ensuring the normative condition of road networks and the artificial structures on them is one of the priority tasks of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 and the National Project 'Safe and High-Quality Roads'. The increase in traffic intensity on the roads of the Russian Federation, especially in the direction of the southern regions, imposes increasingly stringent requirements on their technical condition. The technical condition of both newly built bridge structures and those that were brought to standard condition through repair and restoration work will further depend on the timely measures taken to repair, overhaul or reconstruct them.

The purpose of this study was to examine existing tools for collecting initial data on the technical condition of bridge structures or a fleet of bridge structures, identify the pros and cons of existing databases for storing and processing information on artificial structures, and determine methods for predicting technical conditions based on long-term monitoring to enable the most rational planning of costs for their maintenance.

The article presents the main stages of forecasting the costs of maintaining artificial structures, modern technologies for collecting initial data, their advantages and disadvantages relative to traditional ones, considers the main possibilities and disadvantages of existing databases for storing and processing information about structures, proposes methods for forecasting the development of defects in artificial structures based on long-term monitoring data, mechanisms that allow optimizing costs for the period of maintenance of artificial structures due to the forecast of the development of defects over time for a specific park of artificial structures.

Keywords: bridge structures, defect development, maintenance, monitoring

For citation: Samodurova T. V., Kuznetsova S. V. Planning bridge maintenance work based on technical condition monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):62–69. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_62.

Введение

Целью Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года и национального проекта «Безопасные качественные дороги» является приведение транспортно-эксплуатационного состояния федеральных дорог в соответствие с требованиями нормативных документов. Неотъемлемой частью автомобильных дорог являются искусственные сооружения. При этом мостовые сооружения являются наиболее сложными и важными элементами дорожной инфраструктуры. Таким образом, повышение качества автомобильных дорог невозможно без решения вопросов, связанных с приведением к нормативному состоянию искусственных сооружений.

В настоящее время техническое состояние мостового сооружения оценивается по шестибалльной системе в соответствии с ОДМ 218.3.014–2011 «Методика оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах». Оценка назначается по результатам технических осмотров и обследований в зависимости от степени соответствия свойств функциональному назначению в рассматриваемый период времени и имеющихся дефектов. Таким образом, срок службы моста зависит от качества и объективности проведенного обследования, оценки технического состояния и рациональности назначения ремонтно-восстановительных работ.

Целью балансодержателей является поддержание парка мостовых сооружений в нормативном состоянии в условиях сжатого финансирования. Для достижения этой цели необходимо грамотное распределение затрат на содержание мостовых сооружений в текущем периоде и рациональное планирование расходов на долгосрочную перспективу.

Планирование затрат на содержание осуществляется в рамках федерального бюджета

на один и три года и прогнозного периода на пять и десять лет. В связи с этим крайне важно учитывать не только текущее состояние сооружений, но и их прогнозное техническое состояние. Зачастую планирование проведения работ происходит вручную и ключевую роль в этом играет квалификация специалиста, который опирается на свой опыт и ожидания в части будущего технического состояния искусственного сооружения и развития его дефектов.

Для поддержания нормативного состояния искусственных сооружений все более актуальным становится вопрос совершенствования системы мониторинга их технического и транспортно-эксплуатационного состояния и автоматизации процесса планирования затрат на содержание на долгосрочную перспективу [1–4].

Материалы и методы исследования

Для прогнозирования затрат на содержание искусственных сооружений необходимо осуществить работы, которые можно разделить на четыре этапа:

1. Сбор данных:

- о технических характеристиках сооружения;
- о материалах и технологиях, используемых при строительстве и ремонтно-восстановительных работах;
- об оценке прошлого и текущего технического состояния сооружения, в том числе грузоподъемности и наличии дефектов;
- о проведенных ремонтно-восстановительных работах.

2. Анализ данных:

- выявление закономерностей развития дефектов;
- оценка влияния внешних факторов (погоды, интенсивности движения, проведения ремонтно-восстановительных работ).

3. Моделирование:

- прогнозирование износа конструкций на основе прошлого и текущего состояния;
- создание цифровых двойников мостов для моделирования различных сценариев;
- разработка вероятных сценариев проведения работ в рамках эксплуатации.

4. Оптимизация:

- рекомендации по оптимальным срокам проведения профилактических и ремонтно-восстановительных работ;

– планирование профилактических работ для минимизации затрат в будущем.

Таким образом, процедура планирования затрат на содержание может быть представлена в виде схемы, приведенной на рис. 1. Она может быть применена как к одному конкретному сооружению, так и к парку мостовых сооружений.

Большое влияние на итоговый результат оказывает сбор исходных данных, их корректная обработка и хранение, поэтому при проведе-

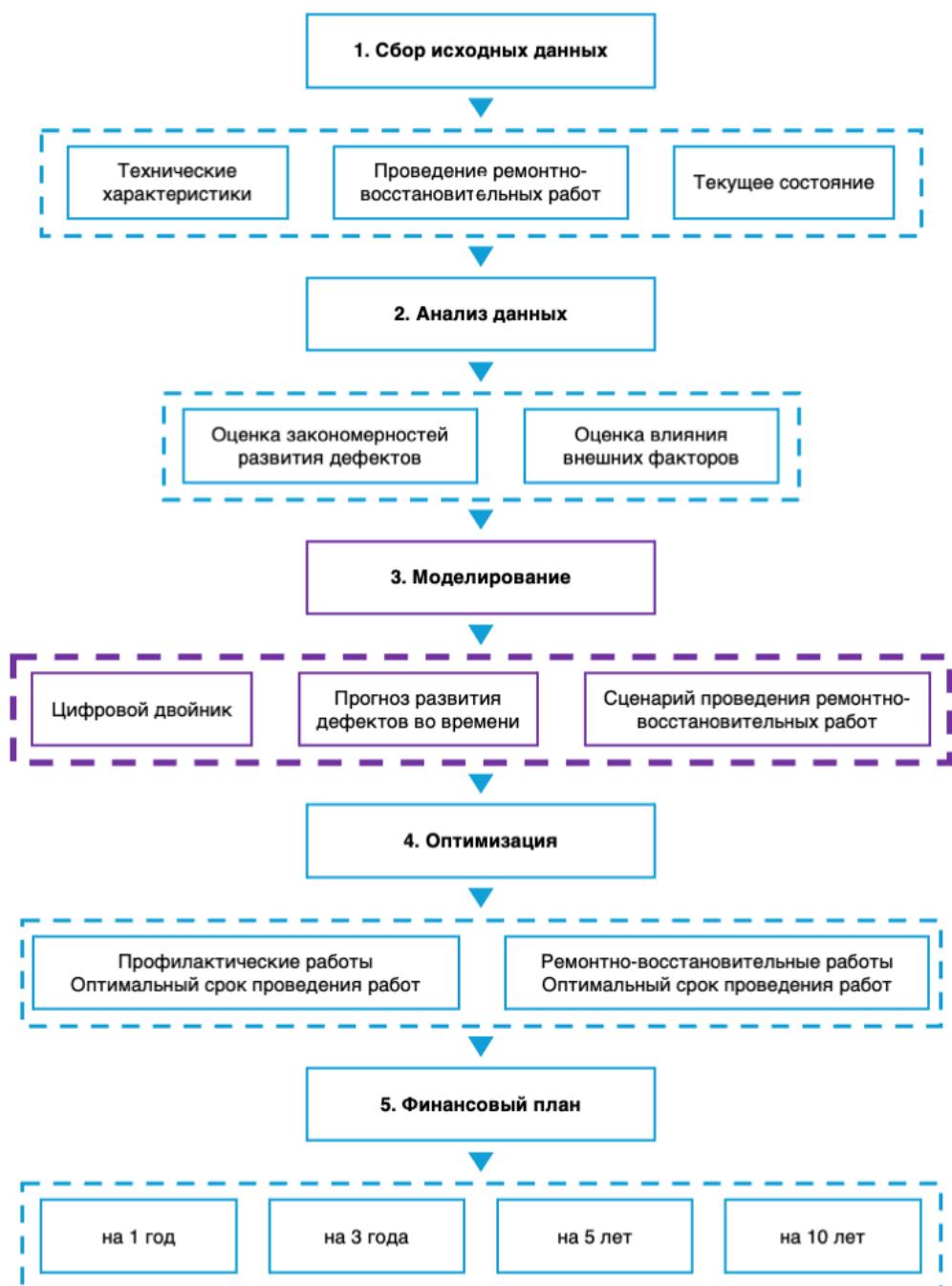


Рис. 1. Схема планирования затрат на содержание

нии обследований для назначения текущей оценки мостового сооружения и планирования ремонтных работ необходимо использовать возможности современных автоматизированных технологий сбора и обработки данных.

При проведении обследований выполняются полевые и камеральные работы в соответствии с действующими нормативными документами. Оба вида работ включают в себя большой перечень этапов их проведения, перечень необходимой для анализа документации, технические средства и технологии сбора информации, а также правила ее обработки. Результатом проведения мониторинга является определение грузоподъемности сооружения, назначение оценки его технического состояния, разработка заключения и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

Особое внимание в исследовании удалено этапу моделирования, на котором могут быть решены многие из вышеуказанных проблем.

Результаты исследования

Процесс обследования является длительным и трудоемким, а результаты не всегда бывают объективными из-за ряда трудностей, которые возникают при проведении работ, в том числе при составлении ведомости дефектов и назначении их категорий, а также при определении общей оценки технического состояния мостового сооружения. Для снижения влияния человеческого фактора и сокращения времени проведения полевых и камеральных работ возможно использовать современные технологии сбора данных. К таким технологиям можно отнести наземное и мобильное лазерное сканирование, а также беспилотную

фотосъемку и построение полигональной модели методом фотограмметрии [5]. Данные методы имеют как преимущества, так и недостатки относительно традиционных методов проведения обследований. Кроме того, некоторые балансодержатели применяют мобильные приложения, позволяющие фиксировать изменение/появление дефектов в непосредственной близости к сооружению. Сравнение различных технологий сбора исходных данных приведено в табл. 1.

Применение современных технологий сбора данных, таких как лазерное сканирование и метод фотограмметрии, может стать эффективным дополнением к традиционным методам и позволит снизить влияние человеческого фактора, сократить время проведения полевых и камеральных работ, что в целом повысит качество исходных данных и даст возможность получить более объективную оценку технического состояния искусственных сооружений.

Как показывают результаты исследований, наиболее уязвимыми и нагруженными конструкциями мостовых сооружений являются пролетные строения [6, 7]. Наиболее распространенные дефекты пролетных строений и мостового полотна приведены на рис. 2. Образование данных дефектов является следствием низкого качества строительства и последующего уровня содержания, механического воздействия транспортных средств, негативного воздействия окружающей среды.

Для корректного анализа данных и последующей автоматизации процесса планирования затрат на содержание искусственных

Сравнительная характеристика различных технологий сбора данных

Критерий оценки	Технология обследования		
	Традиционная	Лазерное сканирование (наземное, мобильное)	Фотограмметрия (беспилотная съемка)
Точность съемки	Высокая	Высокая	Средняя
Детальность съемки	Низкая	Высокая	Высокая
Стоимость оборудования	Низкая	Высокая	Высокая
Скорость выполнения полевых работ	Низкая	Высокая	Высокая
Скорость выполнения камеральных работ	Высокая	Низкая	Низкая
Безопасность проведения работ	Средняя	Высокая	Высокая
Объем дополнительных геодезических работ	Низкий	Низкий	Высокий
Качество определения отдельных дефектов	Высокое	Среднее	Среднее

Таблица 1

сооружений необходимо обладать исходными данными и сведениями о прошлом, текущем и перспективном техническом состоянии.

Хранение информации в цифровом формате о технических характеристиках и состоянии мостовых сооружений на федеральных автомобильных дорогах обеспечивают базы данных, такие как АБДМ и АИС ИССО-Н.

На примере системы АИС ИССО-Н [8] можно выделить основные задачи, которые решают такие базы данных:

- хранение информации о технических характеристиках сооружения;
- хранение информации об оценке текущего технического состояния сооружения, в том числе о существующих дефектах;
- оценка грузоподъемности для возможности пропуска нагрузки по сооружению;
- учет работ по содержанию сооружения;
- вывод отчетных документов.

Кроме того, в системе АИС ИССО-Н есть модуль планирования работ по содержанию, но его функционал не позволяет назначать приоритетность ремонтных работ с учетом

временной составляющей (прогнозного технического состояния). Фактический выбор сооружений и планирование затрат производится вручную профильным специалистом.

Планирование проведения ремонтно-восстановительных работ осуществляется в том числе с учетом регламентных сроков проведения работ. Результаты выполненных ранее исследований [6], приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод о том, что фактические сроки проведения ремонтных работ на мостовых сооружениях наступают раньше сроков, установленных в нормативных документах, а дефекты пролетных строений и мостового полотна начинают появляться уже в первые годы эксплуатации.

В результате несоответствия фактических и нормативных сроков службы элементов мостов затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ возрастают в связи с накоплением большого количества дефектов и ухудшением технического состояния к моменту наступления регламентированного срока проведения ремонтных работ.



Рис. 2. Основные дефекты пролетного строения и мостового полотна

Таблица 2

Фактические и нормативные сроки эксплуатации

Элемент	Фактический срок эксплуатации до первого дефекта, лет	Фактический срок эксплуатации до первого/последующего ремонта*, лет	Межремонтный срок в соответствии с ГОСТ 33178–2014, ГОСТ Р 58861–2020, СП 35.13330.2011, лет
Балка пролетного строения	2–8	7/14/19/22	30–40
Мостовое полотно	2–4	7/14/19	10–20

*Под ремонтном понимаются все виды работ, вследствие выполнения которых дефект будет устранен

Таким образом, особое значение для планирования работ имеют фактические сроки развития тех или иных дефектов с учетом особенностей конкретного сооружения / парка сооружений. В этом случае важную роль играют модели, которые могут давать прогноз развития дефектов со временем. С целью учета временной составляющей при расчете затрат на эксплуатацию сооружений необходимо предварительно провести анализ результатов долгосрочного мониторинга, существующего на балансе парка мостов, выявить наиболее распространенные дефекты и определить фактический процесс развития и накопления дефектов мостовых сооружений в процессе эксплуатации.

В качестве математической модели, описывающей процесс развития дефектов, возможно принять логистические кривые Ферхольста – Перла. Такие модели используются не только при анализе развития социальных и экономических процессов, но и для описания процесса разрушения материалов [9, 10].

Общий вид дифференциального уравнения имеет вид

$$\frac{dh}{dt} = kh(H - h), \quad (1)$$

а его решение выглядит следующим образом:

$$h = \frac{H}{1+a \cdot \exp(-kH(t-t_0))}, \quad (2)$$

где h – характеристика физического износа конструкции (линейный параметр размера дефекта); t – время; k – декремент экспоненты, характеризующий потенциальную скорость роста размера дефекта; H – максимальное значение параметра размера дефекта;

$$a = \frac{H}{h_0} - 1; \quad (3)$$

h_0, t_0 – значение параметра размера дефекта и времени процесса в точке перегиба логистической кривой, в которой

$$\frac{d^2h}{dt^2} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) параметры H, k, h_0, t_0 – эмпирические постоянные в соответствующем периоде эксплуатации конструкции.

Пример решения данного уравнения и применения его для анализа реального развития дефектов конкретных сооружений приведен в работе [6]. Для каждого мостового сооружения появление дефектов носит случайный характер, но их развитие для сооружений, расположенных в одинаковых климатических

условиях, в целом схожее, поэтому логистические кривые могут быть использованы при анализе и прогнозе развития технического состояния любого искусственного сооружения или парка искусственных сооружений.

Вопрос планирования затрат необходимо решать комплексно и учитывать большое количество различных факторов, а также обладать инструментами и современными механизмами сбора исходных данных, их анализа и моделирования. Совершенствование таких технологий в процессе мониторинга мостовых сооружений позволит повысить полноту и достоверность информации для оценки их состояния.

В настоящее время решение таких задач возможно на основе использования технологии информационного моделирования (BIM) [11–13], которая позволяет усовершенствовать управление объектами капитального строительства на всех этапах жизненного цикла, повысить достоверность и объективность собираемых данных, обеспечить интеграцию с дистанционными системами мониторинга, а значит, и целостность информации, ее формирование и представление в необходимом виде.

Процесс моделирования является ключевым в планировании работ по содержанию. От степени его автоматизации и полученных результатов прогнозного состояния искусственных сооружений зависит корректность назначения того или иного вида работ. Развитие технологий моделирования технического и транспортно-эксплуатационного состояния сооружений позволит снизить влияние субъективного выбора сооружений и видов работ на них, повысить корректность назначения и планирования бюджета на кратко- и долгосрочную перспективу, грамотно распределить финансирование в условиях ограниченного бюджета и большого парка мостовых сооружений.

Выводы

Результаты проведенного исследования:

- Предложена схема, описывающая порядок действий и этапы планирования затрат на содержание мостовых сооружений, которая может быть применена как к одному конкретному сооружению, так и к парку мостовых сооружений. Данная последовательность этапов позволит решать задачи управления планированием затрат на эксплуатацию.

2. Проанализированы современные методы сбора исходных данных о состоянии мостовых сооружений. Выявлены их преимущества и недостатки, предоставляющие возможность осуществлять выбор методов мониторинга сооружений.

3. Предложена математическая модель, позволяющая прогнозировать техническое состояние сооружения и выявлять закономерности развития дефектов во времени. Использование моделей приведет к снижению затрат на содержание сооружений, повышению их безопасно-

сти и долговечности за счет назначения своевременных, оптимальных профилактических и ремонтных работ.

4. Обосновано, что для совершенствования системы мониторинга мостовых сооружений необходимо развивать и шире внедрять технологии информационного моделирования для линейных объектов и использование цифровых двойников искусственных сооружений, что позволит повысить эффективность управления парком мостовых сооружений на этапе эксплуатации.

Список источников

1. Нененко Н. В. Обоснование приоритетов мостовых сооружений при планировании работ по ремонту на основании комплексной оценки технических характеристик качества // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2010. № 2 (18). С. 105–114.
2. Нигаматова О. И., Овчинников И. Г. Системы управления состоянием мостовых сооружений // Науковедение : интернет-журнал. 2015. Т. 7, № 3. С. 1–15.
3. Бильченко А. В., Кислов А. Г. Особенности эксплуатации и стратегия ремонта городских мостовых сооружений // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2010. № 33. С. 32.
4. Crevello G., Noyce P. Service Life Predictions for Reinforced Concrete Bridges // Structure magazine. 2015. October. P. 10–13.
5. Кузнецова С. В., Кузнецов А. О., Самодурова Т. В. Обследование мостовых сооружений с применением цифровых технологий // Научная опора Воронежской области : сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. С. 127–129.
6. Кузнецова С. В. Моделирование развития дефектов железобетонных пролетных строений мостовых сооружений в процессе эксплуатации с использованием логистической кривой // Дороги и Мосты. 2021. Вып. 45-1. С. 130–147.
7. Дмитриенко Е. А., Почтар Н. В. Основные типы дефектов и повреждений железобетонных конструкций транспортных сооружений, причины их возникновения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119) С. 134–138.
8. Рыболов Ю. В. Автоматизированная информационно-аналитическая система по искусственным сооружениям на автомобильных дорогах // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2 (5). С. 126–135.
9. Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов / под ред. И. В. Ильина, Д. И. Трубецкова. Москва : Издательство Московского университета, 2010. 412 с.
10. Петров В. В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. Москва : Инфра-Инженерия, 2004. 480 с.
11. Волков И. Н., Самодурова Т. В. Технологии информационного моделирования на стадии содержания автомобильных дорог // Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. 2022. С. 208–210.
12. Самодурова Т. В, Гладышева О. В., Перегудова В. Н. Перспективы использования технологий информационного моделирования на этапе эксплуатации автомобильных дорог // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком-2018) : сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. Саратов, 2018. С. 380–382.
13. Luo Y. BIM for Bridge Design. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/304908112_BIM_for_Bridge_Design (дата обращения: 31.03.2025).

References

1. Nenenko N. V. Justification of bridge structure repair priorities based on comprehensive assessment of technical quality characteristics. *Scientific Bulletin of Voronezh State Technical University. Construction and Architecture*. 2010;(18):105–114. (In Russ.).
2. Nigmatova O. I., Ovchinnikov I. G. Bridge condition management systems. *Naukovedenie*: online journal. 2015;7(3):1–15. (In Russ.).
3. Bilchenko A. V., Kislov A. G. Features of operation and repair strategy for urban bridge structures. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2010;(33):32. (In Russ.).
4. Crevello G., Noyce P. Service Life Predictions for Reinforced Concrete Bridges. *Structure Magazine*. 2015. October. 10–13.
5. Kuznetsova S. V., Kuznetsov A. O., Samodurova T. V. Inspection of bridge structures using digital technologies. *Scientific Support of the Voronezh Region. Proceedings of the Voronezh State Technical University Undergraduate and Postgraduate Research Paper Winners Competition in Priority Areas of Science and Technology Development*. Voronezh: Voronezh State Technical University. 2021. P. 127–129. (In Russ.).
6. Kuznetsova S. V. Modeling the development of defects in reinforced concrete bridge spans during operation using logistic curves. *Roads and Bridges Collection*. 2021;(45-1):130–147. (In Russ.).
7. Dmitrienko E. A., Pochtar N. V. Main types of defects and damages in reinforced concrete structures of transport facilities and their causes. *Bulletin of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016;(119):134–138. (In Russ.).
8. Rybalov Yu. V. Automated information-analytical system for artificial structures on highways. *CAD and GIS of Highways*. 2015;(5):126–135. (In Russ.).
9. Ilyin I. V., Trubetskoy D. I. (Editors.). Modeling nonlinear dynamics of global processes. Moscow: Moscow University Publishing House; 2010. 412 p. (In Russ.).
10. Petrov V. V. Nonlinear incremental structural mechanics. Moscow: Infra-Engineering; 2004. (In Russ.).
11. Volkov I. N., Samodurova T. V. Technologies of information modeling-leveling at the stage of maintenance of highways. *Proceedings of the scientific research works competition winners from students and postgraduates of Voronezh State Technical University in priority areas of science and technology development*. 2022. P. 208–210. (In Russ.).
12. Samodurova T. V., Gladysheva O. V., Peregudova V. N. Prospects for using information modeling technologies at the operational stage of highways. *Role of the supporting university in the development of Saratov region's transport and energy complex*. 2018. P. 380–382. (In Russ.).
13. Luo Y. BIM for Bridge Design. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/304908112_BIM_for_Bridge_Design.

Информация об авторах

Т. В. Самодурова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета.

С. В. Кузнецова – аспирант Воронежского государственного технического университета.

Information about the authors

T. V. Samodurova – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Design Highways and Bridges Department, Voronezh State Technical University

S. V. Kuznetsova – Postgraduate of Voronezh State Technical University.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 29.08.2025.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 21.07.2025; accepted for publication 29.08.2025.

Научная статья
УДК 624.21/8
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_70

Учет особенностей температурного режима поверхности моста при зимнем содержании

Татьяна Васильевна Самодурова^{1✉}, Сергей Сергеевич Салиев²

^{1, 2} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ tsamodurova@cchgeu.ru✉

² salievserge@yandex.ru

Аннотация. Проблема повышения безопасности движения на мостах остается актуальной. Высокое эксплуатационное состояние транспортных сооружений необходимо поддерживать в неблагоприятных погодных условиях, особенно в зимний период. Мосты считаются более «холодными» по сравнению с участками дороги, и скользкость на них образуется чаще, технологии борьбы с зимней скользкостью имеют свои особенности.

Цель исследования заключается в выявлении конструктивных особенностей мостов, влияющих на образование зимней скользкости, и разработке методов ее прогнозирования для повышения безопасности движения. Анализ показывает, что мосты, в отличие от участков дорог, характеризуются более низкой температурой поверхности из-за отсутствия грунтового основания, многослойности материалов и высокой теплоотдачи, а это приводит к более частому образованию льда. Для определения температурного режима покрытия могут использоваться экспериментальные методы, включая измерения датчиков автоматических дорожных метеостанций (АДМС), а также специальные расчеты, основанные на решении уравнения нестационарной теплопроводности с введением граничных условий, учитывающих конструктивные особенности мостовых сооружений.

Приведены описание и анализ технических средств, используемых при погодном мониторинге искусственных сооружений как за рубежом, так и в России. Рассмотрены особенности установки дорожных датчиков, входящих в состав АДМС, на мостах, возникающие при этом проблемы и пути их решения. Отмечена необходимость разработки предупреждений о возможном образовании скользкости на основе информации, получаемой с датчиков.

Представлена физическая постановка задачи формирования температурного режима моста под воздействием внешних факторов. Предложена математическая модель для расчета температуры покрытия моста в виде уравнения нестационарной теплопроводности в многослойных конструкциях, описаны особенности граничных условий. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: мост, зимняя скользкость, температура поверхности, методы определения, виртуальная метеостанция, модель для расчета

Для цитирования: Самодурова Т. В., Салиев С. С. Учет особенностей температурного режима поверхности моста при зимнем содержании // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_70.

Original article

Accounting for the specifics of the bridge surface temperature regime during winter road maintenance

Tatiana V. Samodurova^{1✉}, Sergey S. Saliev²

^{1, 2} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹ tsamodurova@cchgeu.ru✉

² salievserge@yandex.ru

Abstract. The issues of enhancing traffic safety on bridges remain consistently relevant. Maintaining the high operational condition of transportation structures under adverse weather conditions, particularly during winter, is crucial. Bridges are considered 'colder' compared to road sections, with slipperiness forming more frequently on them, anti-icing technologies for bridges have distinct characteristics.

The research aims to identify structural features of bridges influencing winter slipperiness formation and develop methods for its prediction to improve traffic safety. Analysis shows that bridges, unlike road segments, exhibit lower surface temperatures due to the absence of a soil base, multilayered material composition, and high

thermal conductivity, leading to increased ice formation. Experimental methods, including sensor measurements from automatic road weather stations (ARWS), and specialized calculations based on solving non-stationary heat conduction equations with boundary conditions accounting for bridge design specifics, can determine pavement temperature regimes.

The paper describes and analyzes technical systems used for weather monitoring of artificial structures both internationally and in Russia. Installation specifics of road sensors integrated into ARWS on bridges, associated challenges, and solutions are examined. The necessity of developing ice formation warnings based on sensor-derived data is emphasized.

A physical formulation of the problem regarding bridge temperature regime formation under external factors is presented. A mathematical model for calculating bridge pavement temperature is proposed, represented by a non-stationary heat conduction equation for multi-layer structures, with boundary condition peculiarities described. Further research objectives are outlined.

Keywords: bridge, winter slipperiness, surface temperature, determination methods, virtual weather station, calculation model

For citation: Samodurova T. V., Saliev S. S. Accounting for the specifics of the bridge surface temperature regime during winter road maintenance. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):70–76. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_70.

Введение

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года предусматривает реализацию нескольких долгосрочных целей развития транспортной системы до 2030 г. и на прогнозный период до 2035 г. [1]. Среди них можно отметить увеличение объемов и скорости перемещения грузов, а также ускоренное внедрение новых технологий. В соответствии с основными положениями стратегии для пользователей дорог необходимо обеспечить повышение качества транспортных услуг в части комфорта и безопасности перевозок.

Проблема повышения безопасности движения на транспортных сооружениях остается актуальной. Высокое эксплуатационное состояние дорог необходимо поддерживать в неблагоприятных погодных условиях, особенно в зимний период. Различные виды зимней скользкости и опасные метеорологические явления влияют на сцепные качества покрытий и повышают риск возникновения дорожно-транспортных происшествий [2]. Автомобильные дороги и сооружения на них характеризуются большим разнообразием конструктивных элементов. Однако, несмотря на их значительную линейную протяженность и однородность основных конструктивов (дорожная одежда, грунтовые условия), зимняя скользкость может образовываться на небольших участках дорог. Это объясняется влиянием особенностей микроклимата в зоне прохождения дороги [3, 4].

Особым температурным режимом характеризуются искусственные сооружения. Конструктивные и теплотехнические параметры на мостах

и на участках дорог различаются. Как правило, мосты считаются более «холодными» по сравнению с участками дороги, и скользкость на них образуется чаще. Зарубежные исследователи достаточно давно уделяют особое внимание изучению условий образования скользкости на искусственных сооружениях и их различию с участками дороги, а также их прогнозированию с целью проведения профилактических мероприятий [5–7].

Профилактическая обработка покрытий с целью предупреждения обледенения требует более низких норм распределения противогололедных реагентов, что позволяет значительно снизить их расход, выполнять экологические требования и повысить безопасность движения.

В статье рассматриваются различные варианты определения температурного режима покрытий искусственных сооружений на дорогах – основного параметра, влияющего на условия образования зимней скользкости.

Материалы и методы исследования

Для исследования температурного режима покрытий мостовых сооружений могут использоваться различные методы теоретического и экспериментального исследования. Экспериментальные исследования связаны со сбором и анализом результатов непосредственных измерений температуры покрытия. Для этих целей в настоящее время используются датчики, которые входят в состав технических средств дорожных погодных информационных систем (RWIS) [8]. Основная структурная единица таких систем – автоматическая дорожная метеостанция (АДМС) – специальное техническое устройство, предназначенное для сбора в автоматическом режиме метеорологической и дорожной

информации и передачи ее в центр обработки данных. В настоящее время АДМС входят в подсистему метеорологического мониторинга интеллектуальных транспортных систем.

Согласно ГОСТ Р 71094–2024 «Интеллектуальные транспортные системы. Подсистема метеомониторинга», АДМС подразделяются на стационарные, устанавливаемые на дорогах и искусственных сооружениях, мобильные и виртуальные. Стандартом рекомендуется большой набор датчиков для измерения погодных и дорожных параметров [4]. Краткая характеристика датчиков для оценки состояния покрытия мостов в зимний период приведена в табл. 1.

Первоначально автоматические дорожные метеостанции устанавливались только на участках дороги. Датчики для измерения температуры по глубине дорожной конструкции и на ее поверхности врезались непосредственно в конструкцию дорожной одежды и размещались на полосе наката (продольной полосе на поверхности проезжей части дороги, соответствующей траектории движения колес транспортных средств). Размеры таких датчиков по высоте составляют от 8 до 10 см, их верхняя грань совпадает с поверхностью покрытия. Датчики этого типа называются

контактными. Внешний вид такого датчика и место установки приведены на схеме (рис. 1).

Из-за размеров контактных датчиков их не используют на мостовых сооружениях, так как врезка датчика может привести к ослаблению конструкции в месте его установки. В последнее время все более широко используются бесконтактные датчики, которые устанавливаются над дорожной конструкцией (как видеокамеры) и позволяют определять температуру и состояние покрытия.

При дальнейшем развитии систем погодного мониторинга для транспортных сооружений особое внимание стали уделять выбору мест установки АДМС. Как правило, отдают предпочтение участкам наиболее частого и первоочередного образования скользкости в зимний период. Такие участки определяют в ходе опроса специалистов, занимающихся содержанием транспортных сооружений. По результатам опроса зарубежных специалистов было выявлено, что мостовые сооружения отличает более раннее и более частое образование скользкости. Из них более 43 % составляют мосты через водные препятствия (из-за повышенной влажности воздуха) и 30 % – железнодорожные мосты (как правило, металлические), на остальных сооружениях (путепроводах на транспортных

Краткая характеристика основных датчиков АДМС

Вид датчика	Измеряемые параметры	Примечание
Датчик температуры и относительной влажности воздуха	Температура воздуха, относительная влажность воздуха	Позволяет рассчитать точку росы
Датчик скорости ветра	Скорость ветра	Позволяет рассчитать порывы ветра
Датчик направления ветра	Направление ветра	–
Специальный дорожный датчик	Температура на поверхности дороги и покрытия Толщина слоя воды, снега, льда	Позволяет оценить состояние поверхности дороги (сухо, влажно, лед, снег)

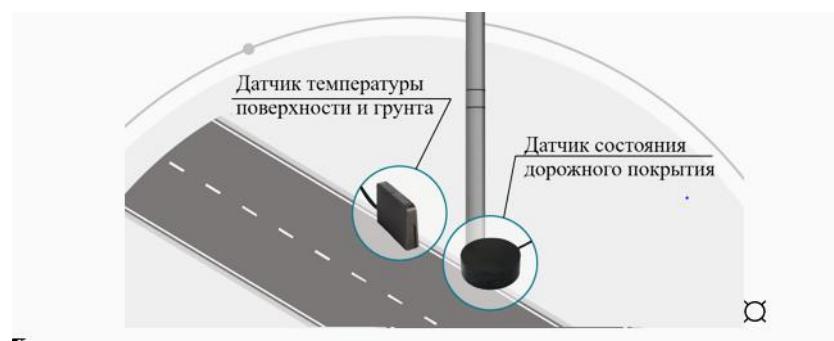


Рис. 1. Схема дорожного датчика

развязках автомобильных дорог) скользкость образуется реже. При этом 60 % всех искусственных сооружений, подверженных раннему образованию скользкости, были выполнены из бетона и 40 % из стали [6].

Схема установки АДМС на мостах имеет ряд отличий, которые связаны с конструктивными особенностями искусственных сооружений. Их характеристика приведена в табл. 2.

Наличие таких особенностей привело к дальнейшему развитию как дорожных датчиков, так и технологий обработки искусственных покрытий противогололедными реагентами, особенно для зимнего содержания аэродромов и искусственных сооружений. Швейцарской фирмой Boschung была разработана система автоматического обнаружения и ликвидации обледенения, которая устанавливается в основном на мостах [8]. В России также появились автоматические системы обеспечения противогололедной обстановки на мостах [9]. Их установка регламентируется нормативными документами.

Основное назначение АДМС – сбор метеорологической и специальной дорожной информации непосредственно на сооружениях, где велико влияние особенностей микроклимата [4]. Однако сама по себе информация, без ее специальной обработки, не представляет ценности для дорожной службы. Основное назначение систем дорожного погодного мониторинга – выдача предупреждений о возможном образовании зимней скользкости. Заблаговременность

таких предупреждений должна быть такой, чтобы успеть провести профилактические мероприятия на обслуживаемом участке дороги и искусственных сооружениях.

Алгоритм выработки таких предупреждений использует информацию активных дорожных датчиков (при их наличии) или может быть разработан на основе методов математического моделирования и входить в состав «виртуальной дорожной метеостанции» [10].

В России началось активное внедрение систем погодного мониторинга на дорогах. Информация об использовании архивных погодных данных, накопленных за периоды наблюдений, в настоящее время отсутствует. Период наблюдения еще мал, но обработка и анализ такой информации – актуальная задача, решение которой позволит совершенствовать оперативное управление работами по зимнему содержанию.

Для реализации технологий профилактики необходимы специальные производственно-технологические предупреждения о состоянии покрытия. Для получения прогностических зависимостей требуется большой объем статистической информации, которой на данный момент нет. Подход к решению этой задачи с использованием методов математического моделирования для участков дорог описан в работе [11]. Для мостовых сооружений необходимо разработать аналогичную модель, учитывая при постановке задачи те особенности, которые указаны выше (см. табл. 2).

Характеристика особенностей установки датчиков на искусственных сооружениях

Особенности установки датчиков	Параметры, отражающие особенности	Проблема	Пути решения
Конструктивные	Толщина асфальтобетонного покрытия на мостах	Врезка контактных датчиков создает опасность повреждения бетонной плиты пролетного строения	Установка бесконтактных датчиков
Тепловой режим конструкций мостов	Теплофизические характеристики материалов	Меньшая тепловая инерция конструкции по сравнению с участком дороги, более частое обледенение	Постоянный контроль за температурой покрытия
Место размещения	Высота моста над руслом реки и уровнем земли	Большая часть пролетного строения находится на открытой местности, высокие скорости ветра и относительная влажность воздуха	
Мосты – объекты транспортной критической инфраструктуры	Пропускная способность и безопасность движения	Врезка контактных датчиков создает проблему пробок в период их установки	Установка бесконтактных датчиков, запрещение остановки и стоянки транспорта

Результаты исследования

Для разработки математической модели расчета температуры покрытия искусственного сооружения рассмотрим физическую и математическую постановку задачи. При этом воспользуемся схемами, приведенными на рис. 2

Конструкция дорожной одежды (см. рис. 2, а) – многослойное полупространство, с основанием из грунта в мерзлом и талом состояниях (индексы «м» и «т» на схеме). На определенной глубине температура грунта T_g постоянна [11]. Пролетное строение автодорожных мостов следует рассматривать как многослойные пластины, находящиеся в среде с постоянно меняющейся температурой. В этой системе каждый слой имеет определенные теплофизические характеристики: теплопроводность λ и удельную теплоемкость c , которые являются в общем случае функциями координаты x , времени t , температуры T , плотности материала конструктивного слоя ρ и его влажности W_1 .

$$\lambda = \lambda(x, t, T, \rho, W_1); \quad c = c(x, t, T, \rho, W_1). \quad (1)$$

В начальный момент времени $t = 0$ распределение температуры по глубине дорожной одежды и земляного полотна может быть представлено в виде соотношения

$$T_{t=0} = T(x, 0). \quad (2)$$

Под действием периодически изменяющихся параметров внешней среды изменяется и температурный режим всей конструкции.

Теплофизические характеристики материалов конструктивных слоев мостовой конструкции и установившийся в ней темпера-

турный режим определяют теплоинерционные свойства покрытия, а его температура будет зависеть также и от условий теплообмена с атмосферой, которые характеризуются суммарным коэффициентом теплообмена:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_i. \quad (3)$$

Конвективная составляющая коэффициента теплообмена α_k характеризует теплопотери покрытия в зависимости от скорости ветра, на процесс конвективного теплообмена оказывает определенное влияние транспортный поток. Составляющая α_i учитывает приток или потери тепла излучением и зависит от радиационного баланса мостового покрытия. Он определяется цветом покрытия, шероховатостью, расположением поверхности по отношению к направлению солнечных лучей.

Описание физических процессов позволяет выбрать в качестве математической модели для расчета температуры мостового покрытия уравнение нестационарной теплопроводности, которое учитывает резкое изменение параметров внешней среды и теплоинерционные свойства конструкции.

Таким образом, математическая модель должна содержать дифференциальное уравнение, включающее теплофизические параметры и геометрические размеры конструкции, а также граничные условия и начальное распределение температуры. Для расчета температурного режима конструкции может быть использовано одномерное уравнение теплопроводности:

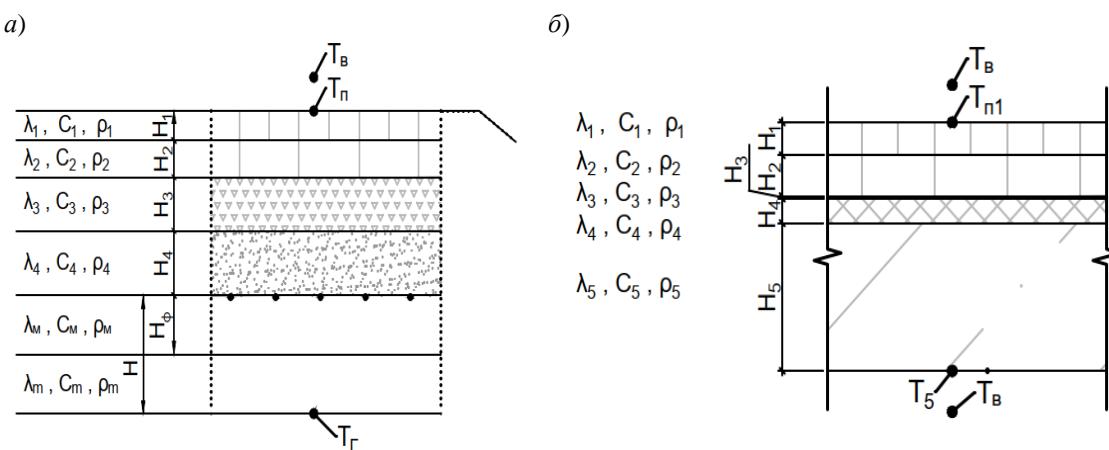


Рис. 2. Расчетные схемы для формирования математической модели:
а – конструкции дорожной одежды; б – железобетонного моста

$$c\rho \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}] + q, \quad (4)$$

где $T(x, t)$ – температура в мостовой конструкции на глубине x в момент времени t , $^{\circ}\text{C}$; q – плотность теплового потока в конструкции, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Анализ расчетных схем, представленных на рис. 2, показывает, что модели нестационарной теплопроводности для дорожной конструкции и моста будут иметь различия в постановке начальных и граничных условий.

На поверхности мостовой конструкции происходит сложный теплообмен, определяемый граничными условиями II рода, при которых задана интенсивность теплового потока, и III рода с определением условий теплообмена с окружающей средой. Граничное условие запишем в виде [11]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha [T_n(t) - T_b(t)] + \rho_n q_n, \quad (5)$$

где ρ_n – коэффициент поглощения мостовым покрытием радиации; q_n – интенсивность падающего на покрытие излучения, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Второе граничное условие будет существенно отличаться от дорожной конструкции с постоянной температурой грунта на определенной глубине T_g , так как мост – многослойная пластина, находящаяся в среде с той же температурой воздуха, но нижняя грань ее не испытывает влияния солнечной радиации:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha [T_n(t) - T_s(t)]. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом особенностей мостовых конструкций предложено в виде математической модели уравнение нестационарной теплопроводности в общем виде.

Задачи дальнейших исследований – получение рабочей (упрощенной) модели, определение числовых значений параметров в уравнениях, выбор метода решения системы уравнений (4), разработка алгоритма и программы расчета температуры покрытия моста.

Выводы

Результаты проведенного исследования:

1. Проанализированы и описаны особенности формирования температуры покрытия и зимней скользкости на мостовых конструкциях и причины, определяющие эти особенности.

2. Проведен анализ и дано описание технических средств, используемых при погодном мониторинге искусственных сооружений как за рубежом, так и в России. Отмечено, что для повышения эффективности работы систем погодного мониторинга необходима разработка предупреждений о возможном образовании скользкости на основе информации, получаемой с датчиков.

3. На основе физической постановки задачи предложена математическая модель расчета температуры мостового покрытия в виде уравнения нестационарной теплопроводности. Установлены различия в постановке граничных условий для расчета температуры покрытия дороги и моста.

4. По результатам работы сформулированы задачи дальнейших исследований.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : в ред. распоряжения Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // КонсультантПлюс : надежная правовая поддержка : [сайт]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 24.03.2025).
2. Васильев А. П. Ремонт и содержание автомобильных дорог : справочная энциклопедия дорожника. В 9 т. Том 2 / под ред. А. П. Васильева. Москва : Информавтодор, 2004. 507 с.
3. Беер В. Техническая метеорология. Ленинград : Гидрометеоролог, 1966. 290 с.
4. Самодурова Т. В., Давидчук М. С., Салиев С. С. Учет микроклиматических особенностей участка автомобильной дороги при зимнем содержании // Научный журнал строительства и архитектуры. 2025. № 1 (77). С. 123–136.
5. Ask B., Ask T. Expert System Control of Automated Ice Prevention Equipment for Bridges // Xth PIARC International Winter Road Congress. Luteria, Sweden, 1998. P. 899–912.
6. Takle Eugene S. Bridge and Roadway Frost. Occurrence and Prediction by Use of an Expert System // Journal of Applied Meteorology. 1990. Vol. 29. P. 727–734.
7. Takle Eugene S., Alamo J. Bridge Frost: Observations and Forecasts by Numerical Methods // Mid-Continent Transportation Research Symposium, Proceedings. Ames, Iowa, 2003. 6 р.
8. Самодурова Т. В. Погодный мониторинг в системе оперативного управления зимним содержанием автомобильных дорог : обзорная информация. Москва : Информавтодор, 2006. 88 с.

9. Самодурова Т. В., Салиев С. С. Повышение безопасности движения на искусственных сооружениях в зимний период с применением системы автоматического распределения противогололедных материалов // Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2024. С. 202–205.

10. Boschung M. jr. The next step in the RWIS evolution: the Virtual Station // 10th International Road Weather Conference, 22–24 March. Davos, Switzerland, 2000. P. 161–168.

11. Самодурова Т. В. Оперативное управление зимним содержанием дорог : научные основы : монография. Воронеж : Издательство Воронежского государственного университета, 2003. 168 с.

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast until 2035, as amended by Decree of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated 27.11.2021 (In Russ.). [Electronic resource]. URL: <http://www.consultant.ru>.
2. Vasiliev A. P. Repair and Maintenance of Highways: Reference Encyclopedia for Road Workers: Vol. 9, Vol. 2 Moscow: Informavtodor; 2004. 507 p. (In Russ.).
3. Beer V. Technical Meteorology. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1966. 290 p. (In Russ.).
4. Samodurova T. V., Davidchuk M. S., Saliev S. S. Accounting for micro-climatic features of a road section during winter maintenance. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2025;(77):123–136. (In Russ.).
5. Ask B., Ask T. Expert System Control of Automated Ice Prevention Equipment for Bridges. *Xth PIARC International Winter Road Congress*. Lutera, Sweden, 1998. P. 899–912.
6. Takle Eugene S. Bridge and Roadway Frost. Occurrence and Prediction by Use of an Expert System. *Journal of Applied Meteorology*. 1990;29:727–734.
7. Takle Eugene S., Alamo J. Bridge Frost: Observations and Forecasts by Numerical Methods. Mid-Continent Transportation Research Symposium, Proceedings. Ames, Iowa, 2003. 6 p.
8. Samodurova, T. V. Weather Monitoring in the Operational Management System for Winter Maintenance of Highways. Overview Information. Moscow: Informavtodor; 2006. 88 p. (In Russ.).
9. Samodurova T. V., Saliev S. S. Improving traffic safety on artificial structures during the winter period using an automated anti-icing material distribution system. *Proceedings of the winners of the competition of scientific research works by students and postgraduates of Voronezh State Technical University on priority directions for the development of science and technology*. Voronezh; 2024. P. 202–205. (In Russ.).
10. Boschung M. jr. The next step in the RWIS evolution: the Virtual Station. *10th International Road Weather Conference*, 22–24 March. Davos, Switzerland, 2000. P. 161–168.
11. Samodurova T. V. Operational management of winter road maintenance: Scientific foundations: Monograph. Voronezh: Publishing House of Voronezh State University; 2003. 168 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Т. В. Самодурова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета.

С. С. Салиев – аспирант Воронежского государственного технического университета.

Information about the authors

T. V. Samodurova – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Design Highways and Bridges Department, Voronezh State Technical University

S. S. Saliev – Postgraduate of Voronezh State Technical University.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 07.07.2025; принятая к публикации 29.08.2025.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 07.07.2025; accepted for publication 29.08.2025.

Научная статья
УДК 624.21:620.178
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_77

Применение методов тензометрии для исследования напряженно-деформированного состояния балочных пролетных строений

Иван Сергеевич Бондарь^{1✉}, Евгений Николаевич Ремизов²

^{1, 2} ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

¹ ivan_sergeevich_08@mail.ru[✉]

² zhenya.berberogly2004@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлен результат работы студентов, состоящих в научном кружке «Транспортные сооружения» ALT Университета имени Мухамеджана Тынышпаева. Под руководством И. С. Бондаря в лабораторных условиях студенты собственноручно создали стенд с рычажным нагружением. В качестве испытуемого образца для исследований использовали металлическую балку двутаврового сечения, на которую в середине пролета прикрепили с помощью клея на цианкрилатной основе тензорезисторы по схеме подключения полумост. Нагружение металлической балки осуществлялось гирями разных весов от 2 до 5 кг, которые навешивались на рычажную систему. Для отработки и считывания показаний с тензодатчиков использовался измерительный комплекс «ТЕНЗО», позволяющий в реальном времени получать относительные деформации по каждому тензодатчику. Программа «ТЕНЗО» автоматически строит графики относительных деформаций и напряжений. Далее студенты в программе Microsoft Excel строили график напряженного состояния макета балочного пролетного строения. Применение тензометрической программно-аппаратной системы в процессе обучения помогает студентам инженерных специальностей проводить исследования, связанные с прочностью материалов конструкций, в безопасных лабораторных условиях.

Ключевые слова: тензометрия, тензорезистор, макет металлической балки, пролетное строение, деформации, напряженное состояние

Для цитирования: Бондарь И. С., Ремизов Е. Н. Применение методов тензометрии для исследования напряженно-деформированного состояния балочных пролетных строений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 77–86. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_77.

Original article

Application of strain gauge methods to study the stress-strain state of beam spans

Ivan S. Bondar^{1✉}, Evgeny N. Remizov²

^{1, 2} ALT University named after Mukhamedjan Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan

¹ ivan_sergeevich_08@mail.ru[✉]

² zhenya.berberogly2004@gmail.com

Abstract. This article presents the results of work carried out by students belonging to the Transport Structures research group at the Mukhamedzhan Tynyshpaev University ALT. Under the guidance of I. S. Bondar, the students built a lever loading test bench in the laboratory. A metal I-beam was used as the test specimen, to which strain gauges were attached in the middle of the span using cyanoacrylate adhesive in a half-bridge connection. The metal beam was loaded with weights ranging from 2 to 5 kg, which were hung on the lever system. The TENZO measuring complex was used to process and read the readings and strain gauges, allowing real-time relative deformations to be obtained for each strain gauge. The TENZO program automatically plots graphs of relative deformations and stresses. Next, students use Microsoft Excel to plot a graph of the stress state of the beam span structure model. The use of a strain gauge software and hardware system in the educational process helps students and master's students in engineering specialties to conduct research related to the strength of structural materials in laboratory conditions that are safe for students.

Keywords: tensometry, strain gauge, metal beam model, span structure, deformations, stress state

For citation: Bondar I. S., Remizov E. N. Application of strain gauge methods to study the stress-strain state of beam spans. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(76):77–86. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_77.

Введение

Современные экспериментальные исследования в области механики, материаловедения и инженерных наук требуют высокоточных методов измерения деформаций и напряжений. Тензометрические программно-аппаратные системы играют ключевую роль в таких исследованиях, позволяя фиксировать малейшие изменения формы и структуры материалов под воздействием внешних нагрузок [1–5]. Эти системы широко применяются при испытаниях конструкций, анализе прочности материалов, а также в научных экспериментах, где необходима достоверная регистрация изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) [6–11].

Тензометрия представляет собой совокупность экспериментальных методов определения механического напряжения элементов конструкции мостовых сооружений. Одним из примеров использования тензометрии на практике является проведение силовых испытаний с целью выявления показателей прочности и получения информации (определение напряжений, возникающих в металлоконструкциях, нагрузок, действующих на них в условиях эксплуатации, усилий, требуемых для совершенствования конструкции, применяемых в транспортных сооружениях) [12–15].

С целью обучения студентов навыкам работы с высокоточным измерительным оборудованием, необходимым для проведения различных научных и практических исследований, силами студентов в лаборатории «Испытание пути и искусственных сооружений» создан испытательный стенд. Он предоставляет возможность на практике освоить методы и технологии, используемые в тензометрии, что является важ-

ным аспектом подготовки будущих специалистов в области инженерии и материаловедения. Использование стенд позволяет студентам изучать теорию и практику тензометрии, наглядно увидеть, как работают измерительные приборы, а также научиться правильно интерпретировать полученные данные. Стенд предназначен для проведения испытаний на прочность различных конструкций, выявления их физических характеристик и пределов прочности. Студенты учатся определять напряжения, возникающие в металлоконструкциях, и нагрузки, действующие на них в условиях эксплуатации, что является ключевым аспектом для проектирования и анализа инженерных решений. Полученные данные об усилиях и нагрузках помогут студентам в процессе проектирования новых конструкций и оптимизации существующих, что особенно важно в области транспортных сооружений. Таким образом, испытательный стенд является важным инструментом для подготовки квалифицированных специалистов, способных эффективно работать с современным измерительным оборудованием и применять свои знания на практике.

Например, в натурных испытаниях балочного металлического пролетного строения Семипалатинского железнодорожного моста через р. Иртыш применялся тензометрический программно-аппаратный комплекс [9]. Общий вид берегового 27-метрового балочного пролетного строения моста железнодорожной линии Семей – Алматы представлен на рис. 1. Клепаная металлическая балка с диагональными и поперечными связями, тип полотна – на деревянных брусьях, год постройки (установки в пролет) – 2008.



Rис. 1. Общий вид берегового пролетного строения Семипалатинского железнодорожного моста

Схема расположения тензорезисторов представлена на рис. 2 [9].

Измерение напряжений в балочном металлическом пролетном строении железнодорожного моста (длиной 27,0 м) проводилось от проходящих составов (табл. 1): электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый); тепловоз СКД-6 (с цистерной); «Тальго» – пассажирский скоростной состав (23 вагона); электровоз СКД-6 (одиночный); «Тальго» – пассажирский скоростной состав (23 вагона); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый, 55 полувагонов); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый, 69 полувагонов); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый, 27 полу-

вагонов); электровоз ТЭ33А (пассажирский состав, 10 вагонов); электровоз ТЭ33А (одиночный); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый, 54 полувагона); электровоз СКД-6 (одиночный); электровоз ТЭ33А (пассажирский состав, 18 вагонов); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – груженый, 41 полувагон); электровоз ВЛ-80 (грузовой состав – сборка, 63 полувагона и 2 платформы) [9].

В качестве примера на рис. 3 приведены диаграммы изменения напряжений в левой металлической двутавровой балке длиной 27,0 м при проходе по пролетному строению тепловоза ТЭ33А с грузовым составом (сборки) со скоростью 25 км/ч.

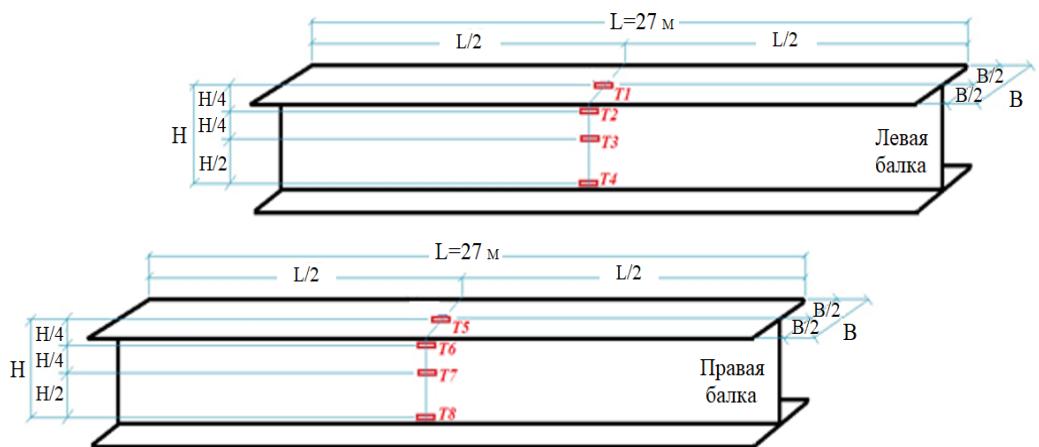


Рис. 2. Схема расстановки датчиков на балочные пролетные строения: T1, T2...T8 – тензорезисторы; L, B, H – геометрические данные металлической двутавровой балки

Таблица 1

Напряжения в средней части металлической 27-метровой балки, МПа

№ п/п	Время	Направление	Подвижной состав	Левая балка		
				T1	T2	T4
1	8:52	В Алматы	Грузовой	-45,5	5,3	41,5
2	9:00	В Семей	СКД-6 + цистерна	-44,8	3,9	42,2
3	9:44	В Семей	«Тальго»	-40,2	3,9	36,9
4	9:50	В Алматы	ТЭ33А	-37,6	4,6	34,9
5	9:58	В Семей	Грузовой	-44,2	5,9	38,9
6	10:07	В Семей	СКД-6	-39,6	3,9	36,3
7	10:22	В Алматы	«Тальго», 23 вагона	-37,6	3,9	34,3
8	10:32	В Семей	Грузовой, 55 полувагонов	-40,2	3,9	34,9
9	10:41	В Алматы	Грузовой, 69 полувагонов	-38,9	3,3	33,6
10	10:55	В Семей	Грузовой, 27 полувагонов	-37,5	3,9	33,6
11	11:27	В Алматы	Пассажирский, 10 вагонов	-39,6	3,9	34,9
12	11:34	В Семей	ТЭ33А	-37,6	3,3	34,9
13	11:40	В Алматы	Грузовой, 54 полувагона	-52,1	4,6	46,8
14	12:07	В Алматы	СКД-6	-41,5	5,3	34,9
15	12:28	В Алматы	Пассажирский, 18 вагонов	-40,2	3,3	34,9
16	12:40	В Алматы	Грузовой, 41 полувагон	-56	5,3	48,8
17	12:54	В Алматы	Грузовой сборка, 63 полу- вагона + 2 платформы	-58,7	6,6	51,4

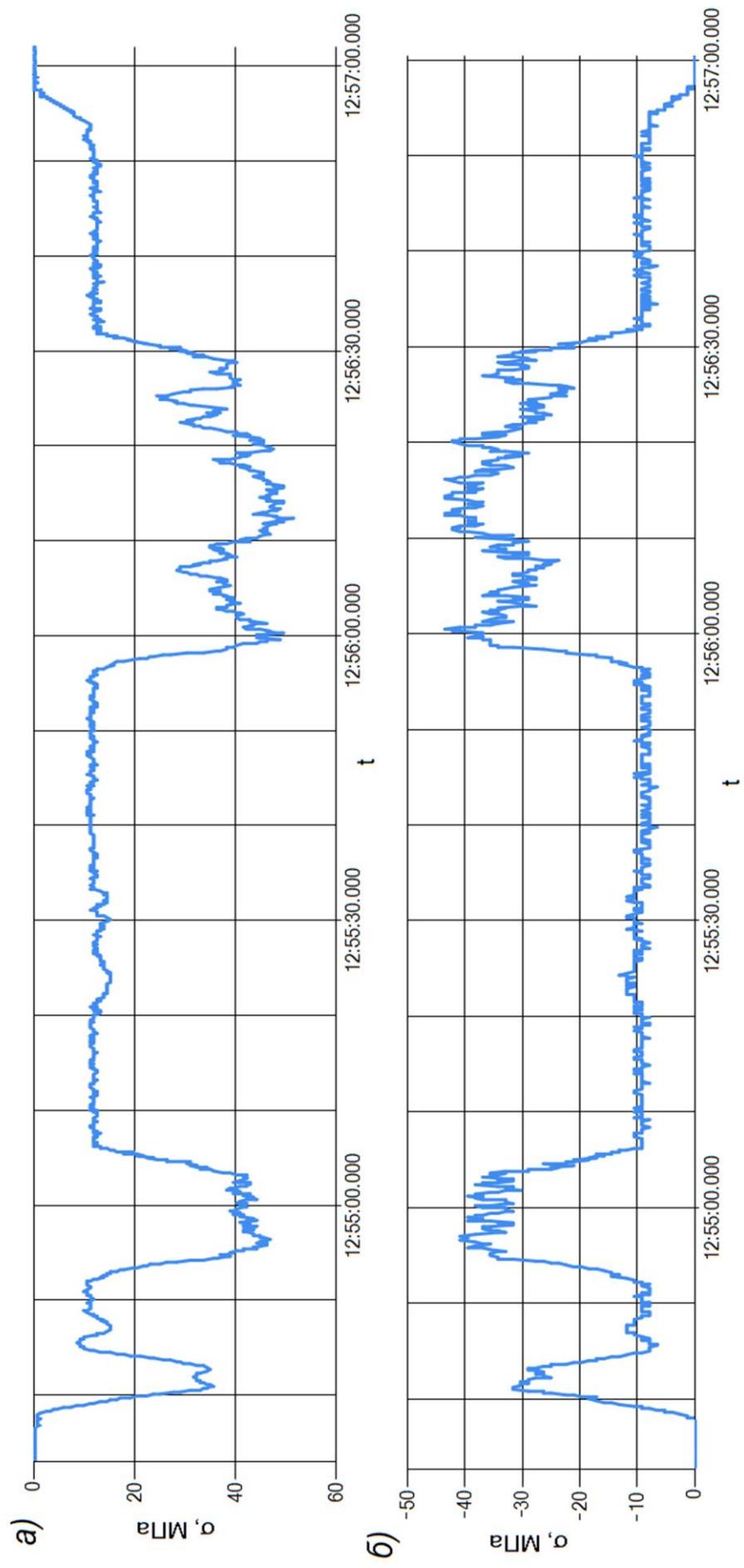


Рис. 3. Диаграмма напряжений в левой металлической двутавровой балке длиной 27,0 м:
 a – в верхнем пояссе балки; b – в нижнем пояссе балки

По представленным в табл. 1 результатам натурных испытаний металлического балочного берегового пролетного строения моста через р. Иртыш железнодорожной линии Семей – Алматы можно судить о том, что наибольшее загружение было зафиксировано от грузового состава (54 полувагона) в 11:40 в верхней полке (T1) – 52,1 МПа и в нижней части ребра (T2) 46,8 МПа. Сравнение полученных экспериментально данных с расчетными показало: суммарные напряжения от воздействия постоянных и временных нагрузок не превышают предела прочности металла этого пролетного строения, что свидетельствует о его достаточной грузоподъемности.

Так как проводить обучение студентов непосредственно на функционирующем объекте (железнодорожном мосту) небезопасно, был создан макет пролетного строения, по конструктивному исполнению схожий с главной балкой испытываемого ранее пролетного строения.

Материалы и методы исследования

Силами группы студентов, состоящих в научном кружке «Транспортные сооружения», под руководством преподавателя кафедры «Ар-

хитектурно-строительная инженерия» кандидата технических наук, PhD МОН РК, ассоциированного профессора (доцента) МНиВО РК И. С. Бондаря с целью проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях был собран испытательный стенд. Для этого использовались металлические уголки и профиль квадратного сечения, применяемый в качестве рычажной системы.

В качестве испытуемого образца для исследований использована металлическая балка двутаврового сечения. Ее уложили на подвижную опорную часть слева и неподвижную справа. Затем к металлической балке прикрепили с помощью клея на цианкрилатной основе десять тензорезисторов (сопротивление которых 200 Ом), пять из которых являются активными, т. е. с них снимаются основные показания деформаций (мкм/м), а пять – компенсационными (рис. 4, а). Чтобы не оторвать усики тензорезистора, их припаивают к контактной площадке, от которой провода следуют на модули с усилителями МР-55. Подключение и настройка системы являются важными этапами для получения достоверных результатов исследований. Усилители МР-55

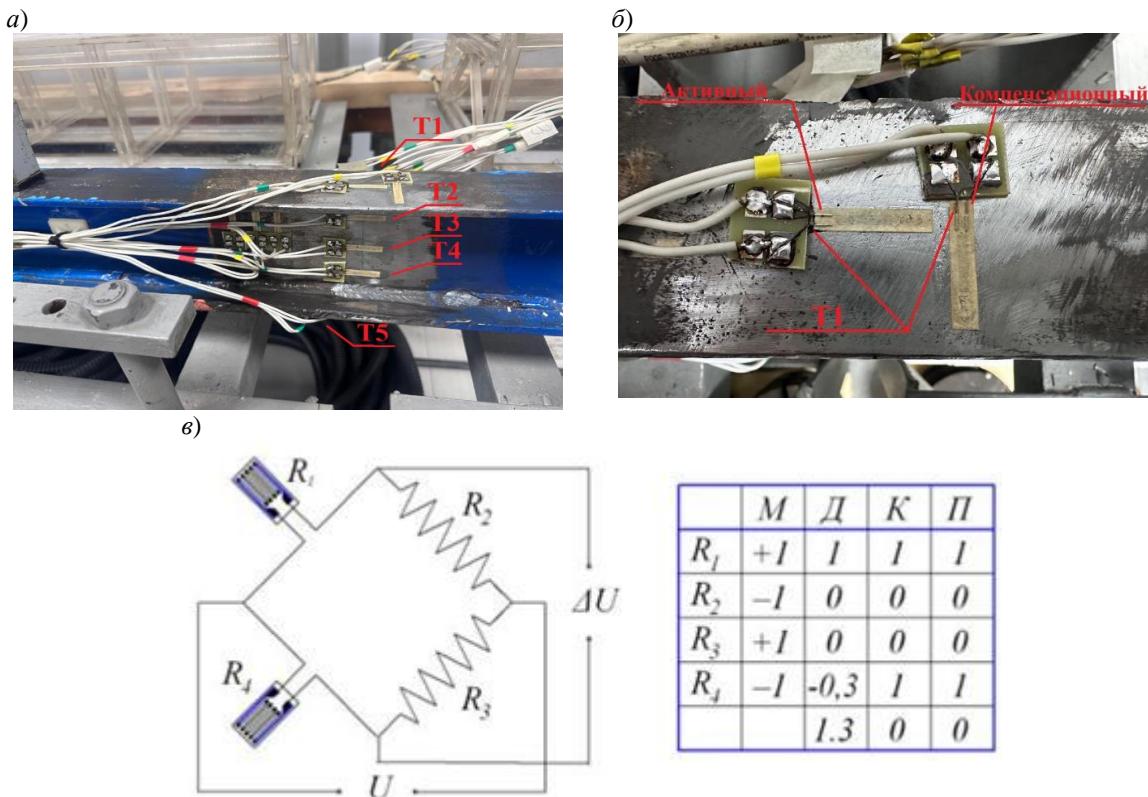


Рис. 4. Фотографии наклеенных тензодатчиков (а, б) и схема подключения полумост (в)

могут работать по различным схемам подключения тензорезисторов (мост, полумост и четвертьмост). Эксперименты проводились по схеме полумост (см. рис. 4, в), когда один тензорезистор, активный, установлен в продольном направлении образца, другой, компенсационный, – в поперечном (см. тензодатчик 1 (T1) на рис. 4, б).

После подключения тензометрической программно-аппаратной системы (рис. 5) и проверки ее работоспособности следует настроить в программе каждый модуль по отдельности: периодичность опроса, частоту фильтра усилителя, скалярный коэффициент усиления, настройку значений чувствительности, корректировку погрешности самого модуля (выставить сигнал по нулям) и т. д.

Нагружение металлической балки осуществлялось рычажной системой (плечо рычага 21 см) гирями разных весов – от 2 до 5 кг (общий вес 104 кг), нагрузка составила 2 283,28 Н (см. рис. 5). Каждую гирю навешивали на штанги, прикрепленные к рычагам, с интервалом в 15–20 с.

После фиксации всех этапов нагружения программа «ТЕНЗО» по полученным значениям автоматически строит графики относительных деформаций в мкм/м (рис. 6, а) по каждому тензодатчику (T1, T2, T3, T4, T5). Для того чтобы перейти от относительных де-

формаций к напряжениям, в программе есть функция расчета. После введения коэффициента для металла 210 000 график строится автоматически (см. рис. 6, б).

Результаты исследования

После отбора пиковых значений напряжений получаем табл. 2 и график напряженного состояния макета балочного пролетного строения от нагрузки в 104 кг (2 283,28 Н) – рис. 7.

В соответствии с общепринятыми представлениями о работе разрезной балки при ее загружении вертикальной нагрузкой, воздействующей вниз, верхний пояс сжимается, а нижний растягивается. При подключении тензорезисторов с изменением полярности меняются знаки «–» на «+», а числовые значения остаются неизменными.

Обсуждение результатов

По рис. 7 видно, что макет металлического балочного пролетного строения работает по классической схеме, однако из общей картины выделяется график тензодатчика 3. Это объясняется тем, что загружение рычагов происходило не одновременно, а последовательно.

Дальнейшие исследования студентов инженерных специальностей будут направлены на подбор нагрузки, по характеру и степени воздействия схожей с реальным железнодорожным составом.



Рис. 5. Макет балочного пролетного строения под нагрузкой 104 кг (2 283,28 Н) и подключенная тензометрическая программно-аппаратная система

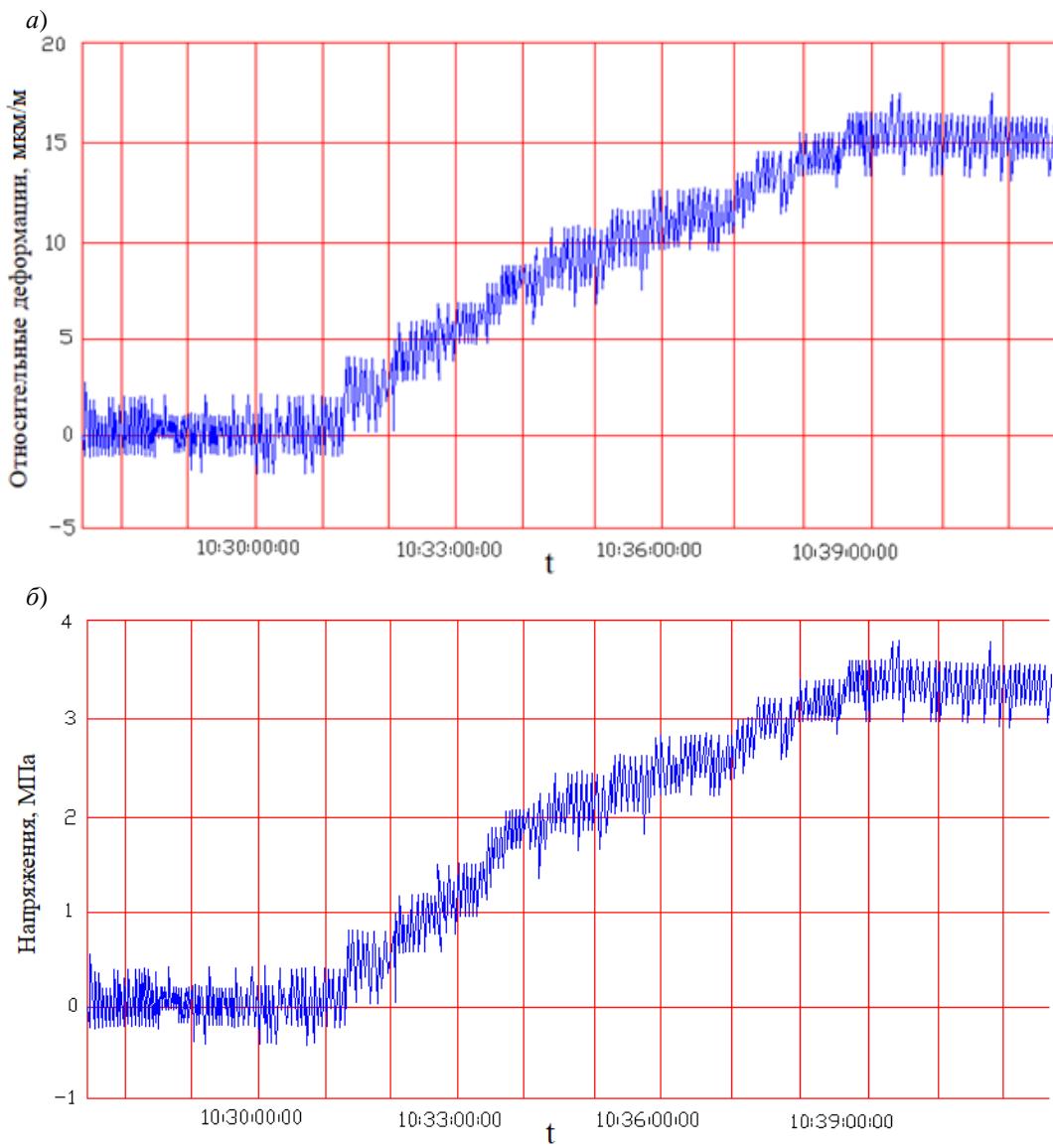


Рис. 6. Значения, полученные в программе «ТЕНЗО»:
 a – относительные деформации, мкм/м; δ – напряжения, МПа

Данные тензорезисторов, МПа

Таблица 2

Ступень нагрузжения	Масса груза, кг	Сила F , Н	T1	T2	T3	T4	T5
0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	219,55	0,77	0,42	0	-0,42	-0,71
2	28	614,70	1,55	0,83	0,38	-0,84	-1,45
3	44	966,00	2,32	1,25	-0,43	-1,26	-2,28
4	58	1 273,34	3,09	1,67	0,46	-1,68	-3,04
5	74	1 624,63	3,86	2,09	-0,59	-2,10	-3,74
6	88	1 931,98	4,65	2,31	0,63	-2,52	-4,45
7	96	2 107,68	5,41	2,91	-0,68	-2,94	-5,36
8	100	2 195,48	6,18	3,17	0,73	-3,15	-6,03
9	104	2 283,28	6,95	3,39	-0,75	-3,36	-6,81

Примечание. T1, T2, ..., T5 – тензодатчики, установленные на двутавровой металлической балке (см. рис. 1, a); F – нагрузка, действующая на балку с учетом плеча рычага в 21 см.

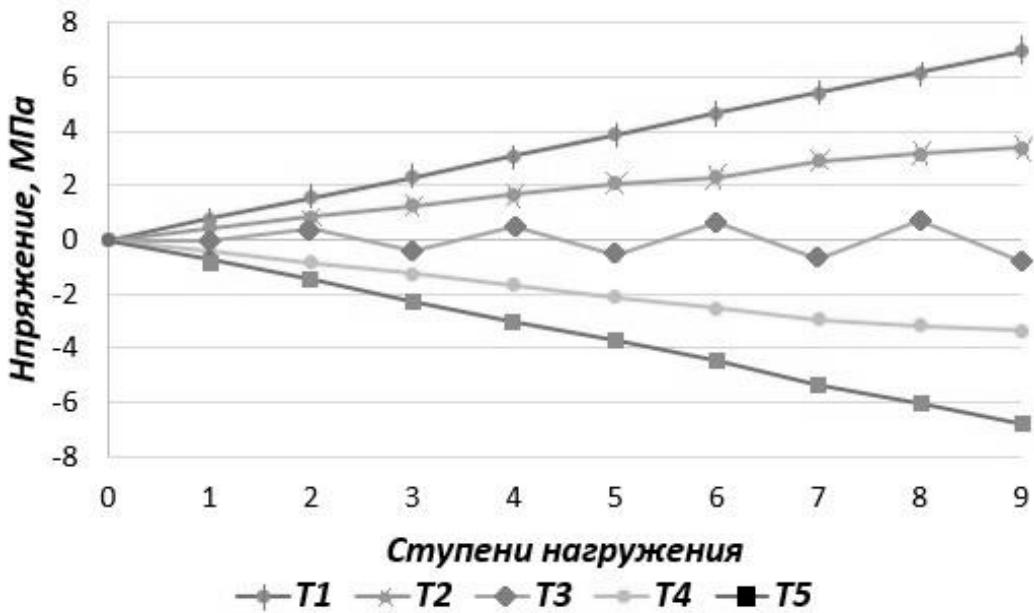


Рис. 7. График напряженного состояния макета балочного пролетного строения

Выводы

Применение тензометрической программно-аппаратной системы открывает широкие возможности для дальнейших исследований, включая анализ прочности материалов (определение способности материала выдерживать нагрузки без разрушения, которое проводится с помощью разрушающих (например, испытаний на растяжение, изгиб, удар) и неразрушающих методов, позволяющих получить характеристики прочности (предел текучести, предел прочности, относительное удлинение) и оценить пригодность конструкции в условиях эксплуатации), оптимизацию конструкций и совершенствование методов измерений, в

обучающем процессе студентов инженерных специальностей. Таким образом, представленная работа вносит вклад в развитие экспериментальной механики и материаловедения, представляет практический интерес для изучения механических свойств материалов и напряженно-деформированного состояния.

Собранная установка и макет двутавровой металлической балки позволяют студентам моделировать загружения гирями. Следующая задача авторов – подобрать такой груз, чтобы смоделировать воздействие реальной подвижной нагрузки, затем сравнить напряжения в макете и в фактическом пролетном строении с изучением масштабного коэффициента.

Список источников

1. Бокарев С. А., Прибытков С. С., Яшнов А. Н. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 193 с.
2. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / С. А. Бокарев, А. Н. Яшнов, И. И. Снежков, А. В. Слюсарь // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 9. С. 25–26.
3. Бокарев С. А., Соловьев Л. Ю., Рогова Е. В. Методика оценки грузоподъемности сталежелезобетонных железнодорожных пролетных строений // Известия вузов. Строительство. 2009. № 3/4 (603/604). С. 106–114.
4. 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. P. 145–151.
5. Поляков С. Ю. Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния асфальтобетона на металлическом мосту // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика : материалы международной научно-практической конференции : в 3 ч. Ч. 1. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2018. С. 164–172.

6. Приближенное исследование колебаний пути и подвижного состава без затухания при различных динамических параметрах / М. Ч. Апсеметов, Р. А. Жумабаев, А. Е. Айдаралиев, У. Т. Шекербеков // Вестник КГУСТА. 2004. Вып. 3 (6). С. 26–30.
7. Определение напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов / И. С. Бондарь, Н. М. Махметова, М. Я. Квашнин, С. С. Хасенов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 92–100. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_92.
8. Бондарь И. С., Квашнин М. Я., Хасенов С. С. Напряженно-деформированное состояние пролетных строений путепровода от подвижной нагрузки 25 тонн на ось // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71). С. 45–54. DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_45.
9. Технический отчет. Обследование и испытание металлического, железнодорожного моста через р. Иртыш железнодорожной линии «Семей – Алматы». Алматы : КазАТК им. М. Тынышпаева, 2017. 127 с.
10. Колебания моста через реку Нарын на 318 км автомобильной дороги Бишкек-Ош при взрыве в ГЭС Камбар-Ата-2 / М. Ч. Апсеметов, А. Е. Айдаралиев, У. Т. Шекербеков [и др.] // Сборник докладов 7-го Казахстанско-Китайского международного симпозиума, 2–4 июня 2010 г. Алматы, 2010. С. 514–518.
11. Interaction of frame structures with rolling stock / S. Abdullayev, I. Bondar, G. Bakyt [et al.] // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2021. Vol. 445. P. 22–28. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.3>.
12. Determination of natural modes of railway overpasses / S. Abdullayev, G. Bakyt, M. Aikumbekov [et al.] // Journal of Applied Research and Technology. 2021. Vol. 19. P. 1–10.
13. Development of safety methods on artificial structures of railway lines / A. Akbayeva, G. Muratbekova, Z. Altayeva [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6 (1), No. 120. P. 43–52. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269964.
14. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges // Structural Control Health Monitoring. 2011. Vol. 19. P. 565–578. DOI 10.1002/stc.448.
15. 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). P. 1–10. DOI 10.1177/1687814016684272.

References

1. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Yashnov A. N. Maintenance of artificial constructions with the use of information technologies. Moscow: State Educational Institution Training and Methodical Center for Education on Railway Transport; 2008. P. 195. (In Russ.).
2. Bokarev S.A., Yashnov A.N., Snejzhkov I.I., Slyusar A.V. Small-size automated systems for the ISSO diagnostics. *Track and Track Facilities*. 2007;(9):25–26. (In Russ.).
3. Bokarev S. A., Solovyev L.Yu., Rogova E.V. Methodology for estimating the load-carrying capacity of steel reinforced concrete railroad spans. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2009;(603/604):106–114. (In Russ.).
4. Belyi A, Karapetov E, Efimenko Yu. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg Example). *Procedia Engineering*. 2017;189:145–151.
5. Polyakov S. Yu. Experimental determination of stress-strain state of asphalt concrete on a metal bridge. *Innovative Factors of Transport Development. Theory and Practice: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference in 3 parts*. Part 1. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Transport University; 2018. P. 164–172. (In Russ.).
6. Apsemetov M. Ch., Zhumabaev R. A., Aydaraliev A. E., Shekerbekov U. T. Approximate study of vibrations of track and rolling stock without damping at different dynamic parameters rolling stock without damping at different dynamic parameters. *Bulletin of Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture*. 2004;(6):26–30. (In Russ.).
7. Bondar I. S., Makhmetova N. M., Kvashnin M. Ya., Hasenov S. S. Determination of Stress State and Dynamic Coefficients of Girder Bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;4(67):92–100. http://doi 10.52170/1815-9265_2023_67_92. (In Russ.).
8. Bondar I. S., Kvashnin M. Ya., Khasenov S. S. Stress-strain state of overpass spans from a moving load of 25 tons per axle. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):45–54. http://doi 10.52170/1815-9265_2024_71_45. (In Russ.).
9. Technical report. Survey and testing of metal, railroad bridge across the Irtysh River of the Semey-Almaty railroad line. Almaty: KazATK named after M. Tynyshpayev; 2017. 127p. (In Russ.).

10. Apsemetov M. Ch., Aidaraliev A. E., Shekerbekov U. T. [et al.]. Vibrations of the bridge over the Naryn River at 318 km of the highway Bishkek-Osh during the explosion in the Kambar-Ata-2 hydroelectric power station of Bishkek-Osh road at explosion in Kambar-Ata-2 HPP. *Proceedings of the 7-th Kazakhstan-China International Symposium, June 2-4, 2010*. Almaty, Kazakhstan, 2010. C. 514–518. (In Russ.).
11. Abdullayev S., Bondar I., Bakyt G. [et al.]. 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;445:22–28. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.3>.
12. Abdullayev S., Bakyt G., Aikumbekov M. [et al.]. Determination of natural modes of railway overpasses. *Journal of Applied Research and Technology*. 2021;19:1–10. <https://jart.icat.unam.mx/index.php/jart/> issue/view/82.
13. Akbayeva A., Muratbekova G., Altayeva Z. [et al.]. Development of safety methods on artificial structures of railway lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022;6(1)(120):43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269964>.
14. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges. *Structural Control Health Monitoring*. 2011;19:565–578. DOI 10.1002/stc.448.
15. 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;9(1):1–10. DOI 10.1177/1687814016684272.

Информация об авторах

И. С. Бондарь – кандидат технических наук, PhD МОН РК, ассоциированный профессор (доцент) МНиВО РК, ассоциированный профессор кафедры «Архитектурно-строительная инженерия» ALT Университета имени Мухамеджана Тынышпаева.

Е. Н. Ремизов – студент ALT Университета имени Мухамеджана Тынышпаева.

Information about the authors

I. S. Bondar – Candidate of Engineering, Ph.D. MES RK, Associate Professor of MNiVO RK, Associate Professor of the Architectural and Construction Engineering Department, ALT University named after Mukhamedjan Tynyshpayev.

E. N. Remizov – student of ALT University named after Mukhamedjan Tynyshpaev.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025; одобрена после рецензирования 20.07.2025; принята к публикации 29.08.2025.

The article was submitted 16.05.2025; approved after reviewing 20.07.2025; accepted for publication 29.08.2025.

Научная статья
УДК 624.21:620.178:691
doi:10.52170/1815-9265_2025_76_87

Анализ и причины обрушения моста через гавань Наньфан-ао в городе Суао уезда Илань на Тайване

Павел Германович Хардиков^{1✉}, Иван Сергеевич Бондарь²,
Дмитрий Владимирович Бирюков³

¹ «Сен-Гобен строительная продукция Рус», Санкт-Петербург, Россия

² ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

³ Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Санкт-Петербург, Россия

¹ lgnktsm@mail.ru✉

² ivan_sergeevich_08@mail.ru

³ b_d_v0402@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию вантовых конструкций в мостах и анализу причин их обрушения. Вантовые мосты, благодаря своей элегантной форме и высокой прочности, широко используются в современном строительстве, однако их обрушения представляют собой серьезную проблему для инженерного сообщества. В работе рассматриваются основные конструктивные особенности вантовых мостов, их преимущества и недостатки, а также факторы, способствующие их разрушению. Анализ причин обрушения арочного пролетного строения автодорожного моста через гавань Наньфан-ао в городе Суао уезда Илань на Тайване включает в себя изучение истории случаев обрушений, что позволяет выявить общие закономерности и причины, такие как ошибки в проектировании, недостаточное техническое обслуживание, влияние природных факторов и человеческий фактор. Рассматриваются также случаи, когда конструктивные дефекты, вызванные усталостью материалов или неправильной эксплуатацией, приводят к катастрофическим последствиям.

В статье представлена методология оценки состояния вантовых конструкций, включая использование современных технологий, таких как беспилотные летательные аппараты и системы мониторинга в реальном времени. Особое внимание уделяется рекомендациям по улучшению проектирования и эксплуатации вантовых мостов, что может существенно снизить риск их обрушения.

Таким образом, данное исследование не только подчеркивает важность понимания причин обрушений, но и предлагает практические решения для повышения безопасности вантовых конструкций, что имеет критическое значение для будущего мостостроения, а также важно для повышения надежности мостовых вантовых конструкций. Чтобы заранее предотвратить опасные ситуации, необходимо в соответствии с планом проводить обследование и испытания элементов мостовых конструкций с использованием специализированного оборудования и приборов, а также устанавливать системы мониторинга.

Ключевые слова: автодорожный арочный мост, вантовые подвески, обрушение, нормы обследования мостов

Для цитирования: Хардиков П. Г., Бондарь И. С., Бирюков Д. В. Анализ и причины обрушения моста через гавань Наньфан-ао в городе Суао уезда Илань на Тайване // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 87–98. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_87.

Original article

Analysis and causes of the collapse of the Nanfang Harbor Bridge in Suao Township, Yilan County, Taiwan

Pavel G. Hardikov^{1✉}, Ivan S. Bondar², Dmitry V. Biryukov³

¹ Saint-Gobain Building Products Rus, Saint Petersburg, Russia

² ALT University named after Mukhamedjan Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan

³ Military Academy of Material and Technical Support named after Army General A. V. Khrulev, Saint Petersburg, Russia

¹ lgnktsm@mail.ru✉

² ivan_sergeevich_08@mail.ru

³ b_d_v0402@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of cable-stayed structures in bridges and analyzing the causes of their collapse. Cable-stayed bridges, due to their elegant shape and high strength, are widely used in modern construction, but their collapse is a serious problem for the engineering community. This paper discusses the main design features of cable-stayed bridges, their advantages and disadvantages, and the factors contributing to their collapse. The analysis of the causes of the collapse of the arch span of the Nanfanaon Strait Road Bridge in Suao City, Yilan County, Taiwan includes a study of historical collapse cases, which reveals common patterns and causes such as design errors, inadequate maintenance, natural factors, and human factors. Cases where structural defects caused by material fatigue or improper operation lead to catastrophic consequences are also considered.

The paper presents a methodology for condition assessment of cable-stayed structures, including the use of modern technologies such as unmanned aerial vehicles (UAVs) and real-time monitoring systems. Special attention is given to recommendations for improving the design and operation of cable-stayed bridges, which can significantly reduce the risk of collapse.

Thus, this study not only emphasizes the importance of understanding the causes of collapses, but also offers practical solutions to improve the safety of cable-stayed structures, which is critical for the future of bridge engineering, and is also important for improving the reliability of cable-stayed bridge structures in the future. In order to prevent dangerous situations in advance, it is necessary to conduct inspections and tests of bridge structure elements in accordance with the plan, using specialized equipment and instruments, as well as to install monitoring systems.

Keywords: highway arch bridge, cable-stayed suspensions, collapse, bridge inspection standards

For citation: Hardikov P. G., Bondar I. S., Biryukov D. V. Analysis and causes of the collapse of the Nanfang Harbor Bridge in Suao Township, Yilan County, Taiwan. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):87–98. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_87.

Введение

В октябре 2019 г. произошло обрушение моста через гавань Наньфан-ао в городе Суао уезда Илань на Тайване, которое было широко освещено в новостях, в частности были показаны кадры с падением пролетного строения в воду с проезжающим по нему в этот момент бензовозом. Под мостом в момент обрушения находились три рыболовных судна (рис. 1). Общее количество погибших – шесть человек (члены экипажа рыболовных судов), пострадали и получили травмы девять членов экипажа, один водитель бензовоза и три офицера-спасателя.

По данным новостных ресурсов, основной причиной обрушения стала коррозия высокопрочных прядей в вантовых подвесках. Для подтверждения этой версии авторами публикации проведен анализ всех открытых источников [1–3], что позволило подробно смоделировать происшествие (табл. 1 и 2).

Полная длина мостового сооружения, включая подходы, была равна 896,92 м. Величина основного пролета через портовую зону 140 м. Ширина 15 м. Высота над водой 18 м. Проезжая часть состояла из двух полос движения в каждом направлении и центральной полосы вантовых подвесок (центральной ветки).



Rис. 1. Мост через гавань Наньфан-ао после обрушения пролетного строения

Таблица 1

Краткая история обрушившегося моста

Год	Вид выполняемых работ
1993	Проектирование сооружения
1995	Начало строительства (январь)
1997	Завершение строительства (сентябрь)
1998	Объект введен в эксплуатацию
2019	Обрушение объекта (октябрь), мост находился в эксплуатации около 21 года

Примечания: 1. Стоимость сооружения на момент возведения – 270 млн юаней.

2. Нормы проектирования: «Техническое задание на проектирование автомобильных мостов 76.1.19», «Техническое задание на проектирование сейсмостойких автомобильных мостов» Министерства связи КНР.

3. Проектирование и строительство моста реализовано при полном участии местных компаний: Liyong Construction Co., Ltd.

Таблица 2

История содержания и обслуживания моста

Год	Вид выполняемых работ
1997	Приемочные обследования и испытания (27 ноября). Гарантийный срок 5 лет – за гарантийный период не было ремонтных работ
2002	Выполнена диагностика по завершению гарантийного срока (19 ноября), в результате которой выявлено: <ul style="list-style-type: none"> 1) незначительная коррозия; <i>запланированные работы</i>: покраска и восстановление поврежденного антикоррозийного слоя; 2) дефекты деформационных швов (повреждение компенсаторов); <i>запланированные работы</i>: замена компенсаторов; 3) дефекты и повреждения перильного и транспортного ограждения; <i>запланированные работы</i>: замена поврежденных секций и сварка поврежденных узлов ограждения; 4) повреждение архитектурного и основного освещения; <i>запланированные работы</i>: ремонт системы освещения и замена неисправных прожекторов и фонарей; 5) локальные повреждения покрытия проезжей и проходной частей; <i>запланированные работы</i>: ямочный ремонт
2003	Закончены все работы по устранению данных дефектов (12 октября)

Примечание. Всего за период эксплуатации мост был обследован/диагностирован семь раз, что полностью соответствует положению «Руководства по содержанию дорог»; работы были выполнены Научно-исследовательским институтом транспорта Министерства транспорта.

Общая статическая схема пролетного строения представлена на рис. 2.

Центральный пролет, обрушившийся в результате происшествия, конструктивно состоит из стальной коробчатой арки, выступающей основным несущим элементом; в опорных узлах несущая арка разделена на два отдельных несущих луча, переходящих в поперечный элемент опорной диафрагмы и формирующих опорную зону пролетного строения. Стrelа подъема (возвышения) арки над пролетным строением 27,42 м. Общий вес пролетного строения 750 т. Опорание несущей арки на опорах выполнено через систему подвижных и неподвижных опорных частей (рис. 3).

Проезжая часть в виде стальной коробчатой балки жесткости устроена (подвешена) на сталь-

ных вантовых подвесках при помощи 13 стальных вантовых подвесок. Каждая вантовая подвеска состоит из 13 или 17 оцинкованных канатов семипроволочного типа К-7 диаметром 15,2 мм (площадь поперечного сечения 150 мм²). Защита вантовой пряди осуществлена оболочкой из полиэтилена высокой плотности (HDPE). Каждая вантовая подвеска через систему анкерных элементов закреплена (рис. 4): верхняя часть – в коробчатой арке пролетного строения, нижняя – в балке жесткости (проезжей части).

Секция коробчатой балки проезжей части отображена на рис. 5. Ширина в уровне проезда 15 м, ширина нижнего пояса 7 м, высота 2,5 м.

Балка жесткости пролетного строения скомпонована из монтажных блоков длиной 14,5 и 17 м заводского изготовления, монтажные

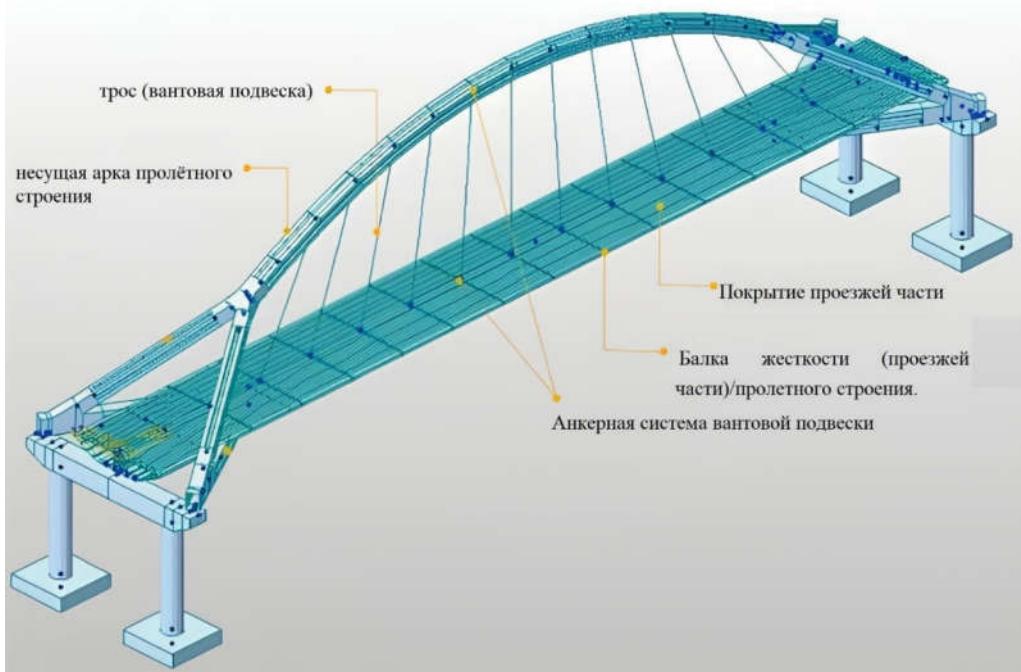


Рис. 2. Конструктивная схема моста через гавань Наньфан-ао

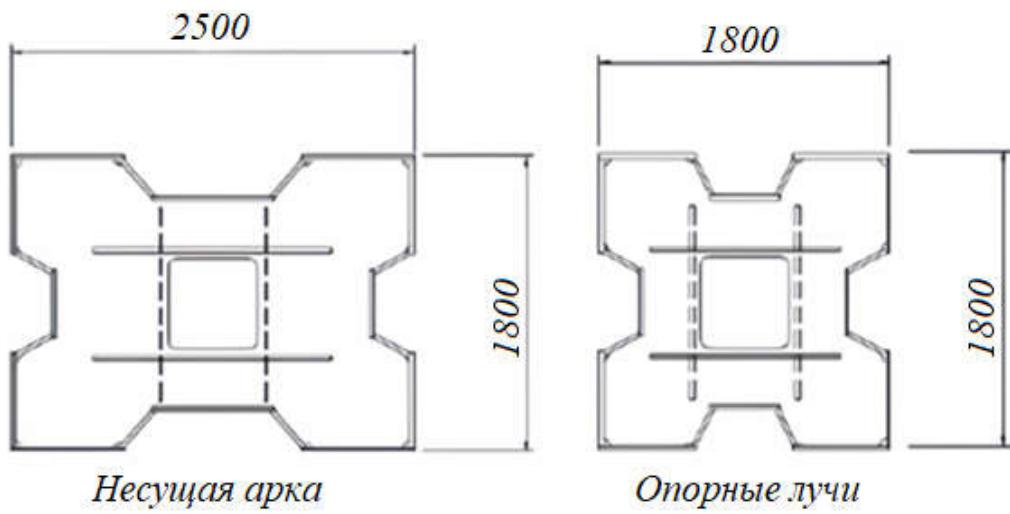


Рис. 3. Поперечное сечение несущей арки и опорных лучей (схема)

соединения сварные. Основным элементом жесткости в пролетном строении выступает «хребтовый» элемент т-образного сечения в котором расположены концевые анкеры вантовой системы. С «хребтовым» элементом симметрично (с левой и правой стороны) сопряжены два л-образных фасадных элемента, обладающие необходимой аэродинамической формой. Дополнительная жесткость поперечного сечения пролетного строения обеспечена постановкой диагональных трубчатых связей. Балка жесткости пролетного строения подкреплена

продольными трапециевидными ребрами жесткости ортотропного типа с различным шагом в зависимости от расположения.

Проезжая часть: асфальтовое покрытие – по нормам MS-4 «Справочник по асфальту» 1970 г., а также по нормам Японской дорожной ассоциации и Японской дорожной ассоциации 1978 г. Гидроизоляция: покрытие на основе синтетического каучука и растворителя, наносимое на сухой настил моста после пескоструйной обработки. Суммарная толщина покрытия от 8 до 9,2 см (рис. 6).

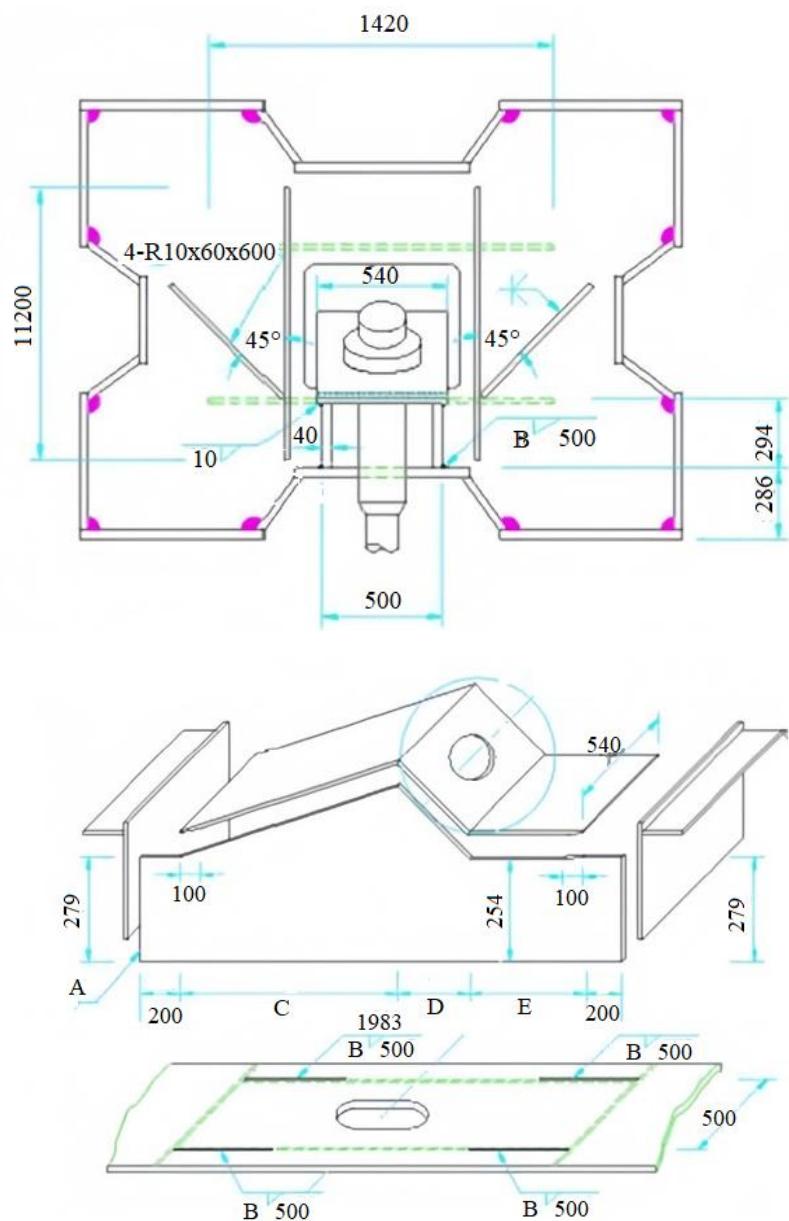


Рис. 4. Узлы анкеровки: в арке и пролетном строении / балке жесткости

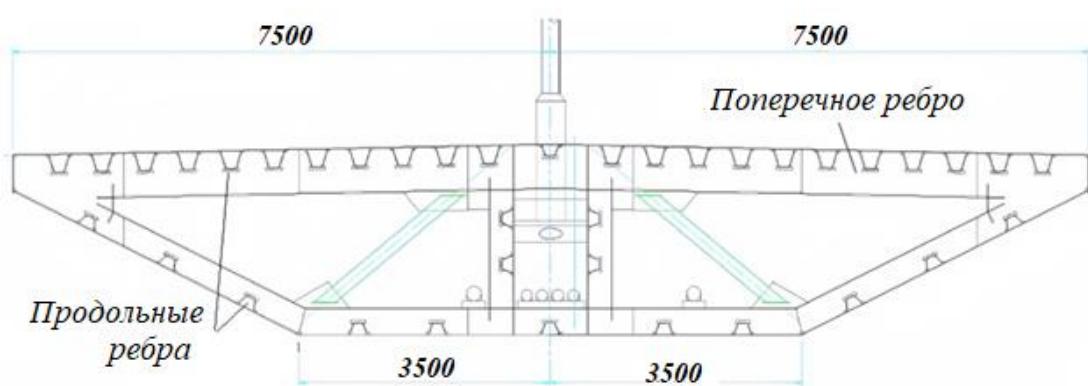


Рис. 5. Поперечный разрез коробчатой балки пролетного строения

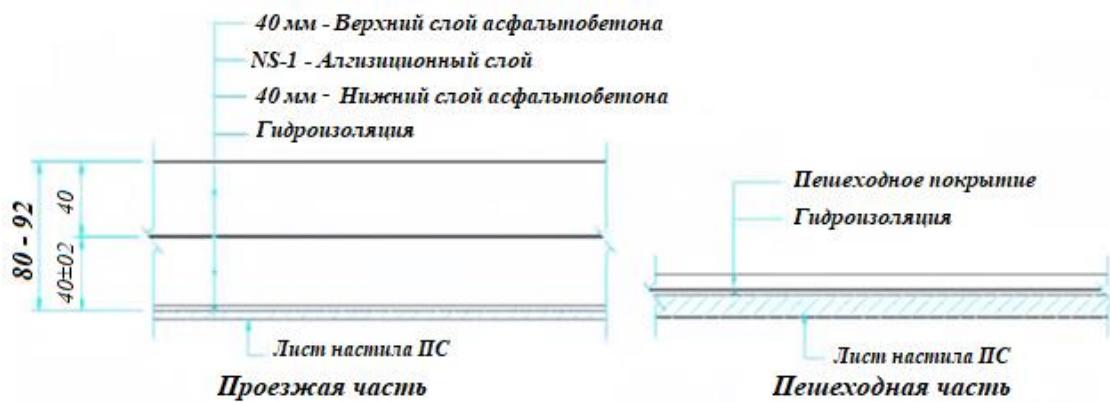


Рис. 6. Схема дорожной одежды на мосту (проезжая и пешеходная часть)

Материалы и методы исследования

С целью определения механизма разрушения сооружения был выполнен *анализ видеофрагмента обрушения*. После происшествия в Интернете появился видеофрагмент момента обрушения, на котором мост отображен детально и в максимально правильной фасадной проекции. Разрешение видео 960×540 пикселей. Формат видео 29,97 кадров в секунду, временной интервал между каждым кадром 0,033 с. Время видео варьировалось от 09:29:58,77 до 09:30:15,83; всего 513 кадров. На каждом кадре были определены контрольные/характерные точки, всего 30, из которых 14 (нижние) были расположены в балке жесткости под вантовыми узлами, а 16 точек на несущей арке (верхние) – в уровне узлов анкеровки вантовой системы симметрично нижним.

В 09:29:58,77, когда автоцистерна подъехала к нижнему якорю № 4, визуально наблюдаемых аномалий не отмечено. На следующем кадре автоцистерна незначительно сдвинулась к конечному якорю – ситуация та же.

В 09:30:02,77 (рис. 7) автоцистерна находилась вблизи конечного якоря – мост все еще находился в нормальном состоянии.

На следующем кадре в **09:30:02,80** (рис. 8) при внимательном анализе и сопоставлении контрольных точек уже можно предположить наличие первых деформаций в опорных узлах и арке, хотя они еще не очевидны и могут показаться оптическим искажением.

Балка жесткости начинает достаточно сильно вибрировать, что выражено в снижении резкости относительно предыдущего кадра, а также слегка проседать, как показано на рис. 9, в **09:30:03,03**.



Рис. 7. Кадр видеофрагмента, соответствующий времени 09:30:02,77

Верхний конец арки в зоне анкера № 8 начинает опускаться вниз, как показано на рис. 10, в 09:30:03,27. Середина балки жесткости в районе нижнего анкера № 5 уже образует четкий перелом с вершиной, направленной

вниз, также наблюдается смещение в узлах № 2, 3, 4 и 7. Анализируя вектор движения и смещения контрольных точек в опорных узлах, можно констатировать, что первым скосился опорный узел с западной стороны.

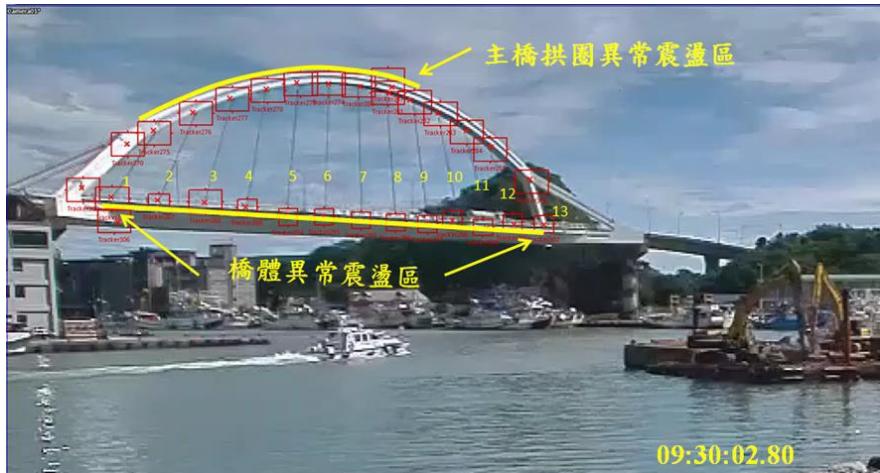


Рис. 8. Кадр видеофрагмента, соответствующий времени 09:30:02,80

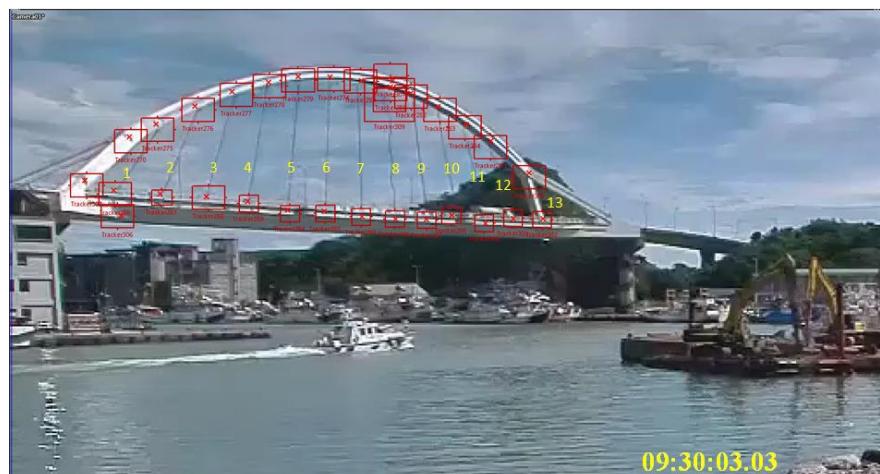


Рис. 9. Кадр видеофрагмента, соответствующий времени 09:30:03,03



Рис. 10. Кадр видеофрагмента, соответствующий времени 09:30:03,27

В 09:30:05,13 падающий мост коснулся поверхности моря, что соответствует кадру с временной отметкой 09:30:09,97 (рис. 11).

Результаты исследования

В качестве первичной причины обрушения было названо разрушение опорных узлов пролетного строения, зон опирания опорных площадок промежуточных опор. Как видно на рис. 12, де-

фектов разрушений и следов нарушения проектного положения в опирании пролетного строения не выявлено. Кроме этого, для облета и съемки сооружения был применен беспилотный летательный аппарат с лидаром (рис. 13). В ходе анализа полученного облака точек также не было выявлено смещений и нарушения опирания пролетного строения на опорах.



Рис. 11. Кадр видеофрагмента, соответствующий времени 09:30:05,13

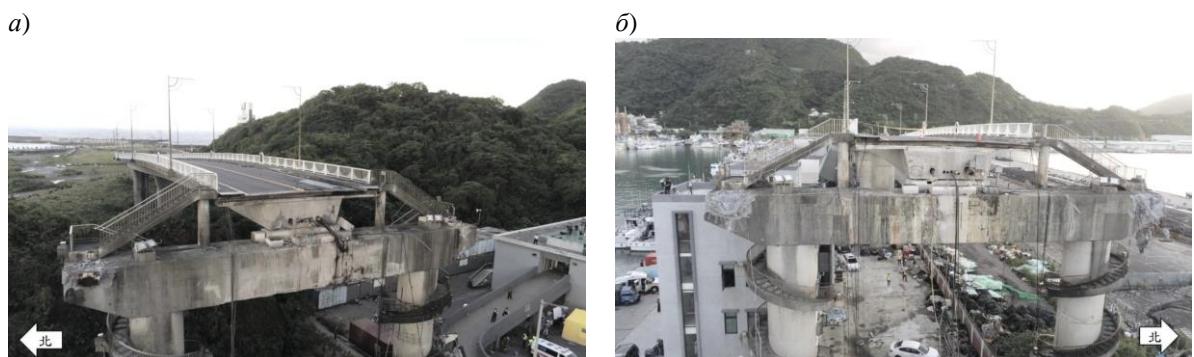


Рис. 12. Общее состояние опор и опорных площадок:
а – восточная опора; б – западная опора

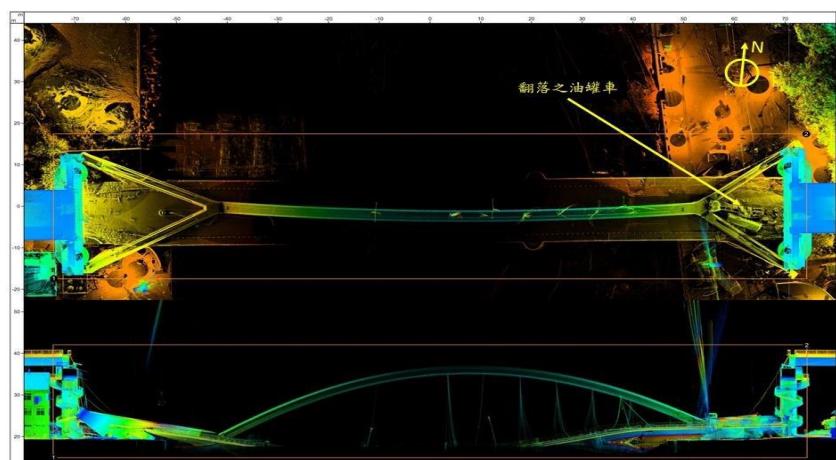


Рис. 13. Результаты анализа 3D-облака точек (контроль выполнен Национальным сейсмологическим центром по данным облета беспилотным летательным аппаратом, оснащенным LiDAR)

Следующее предположение заключалось в том, что причиной обрушения стали повреждения и нарушения системы анкеровки вант. Для чего в ходе проведения экспертизы было осмотрено и зафиксировано фактическое положение и состояние вантовой системы.

Обсуждение результатов

Рассмотрим соответствие положения отверстий для тросов и условий несущей способности анкеров концов арки. Конфигурация системы и статическая схема работы предполагают, что большая часть постоянной нагрузки от собственного веса моста должна восприниматься

вантовой системой. Фактические результаты обследования выявили факт несоосного расположения отверстий в нижних и верхних анкерах (анкерных плитах), а также незначительного расхождения в диаметрах отверстий, что проиллюстрировано на рис. 14. Некоторые из опорных (анкерных) плит имеют круглое углубление (рис. 15), диаметр которого аналогичен диаметру головки якоря. Видно, что центр углубления несоосен с центром отверстия.

Кроме этого, выявлено, что анкерная плита имеет 14 отверстий, а вантовая прядь № 10 – одно неиспользуемое отверстие (рис. 16).



Рис. 14. Несоосное расположение отверстий при наложении друг на друга опорных пластин и расхождение в диаметре отверстия

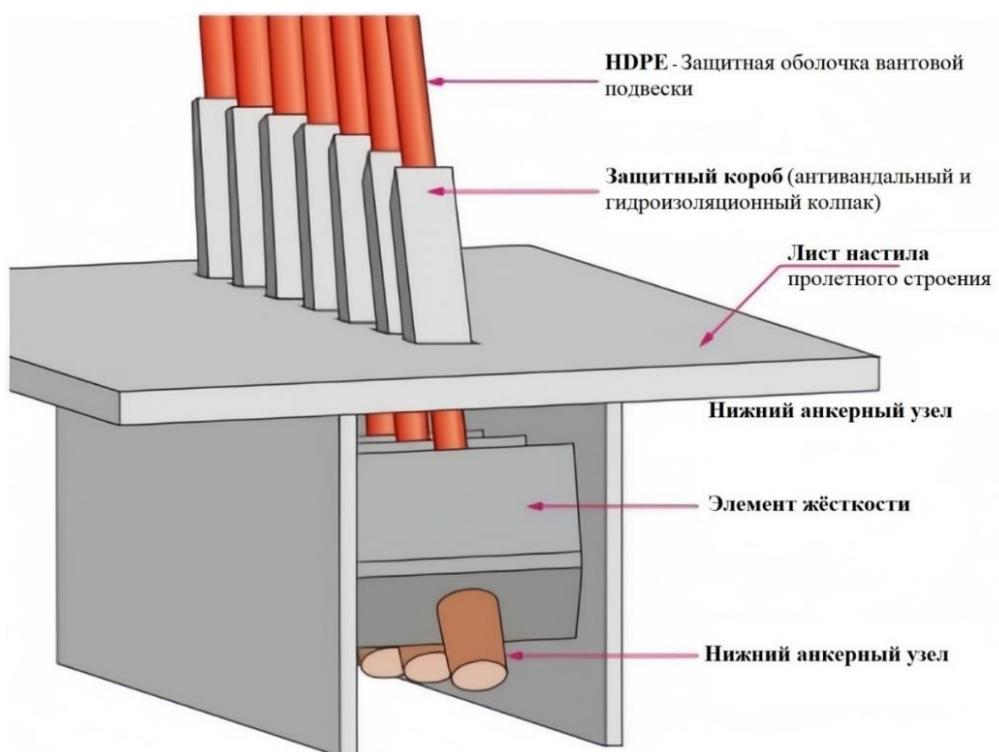


Рис. 15. Нижний анкерный узел, смоделированный Nikkei Construction на основе материалов Тайваньского национального комитета по расследованию безопасности на транспорте

По данным технического отчета Национального совета по транспортной безопасности Тайваня (TTSB) о расследовании происшествия с арочным мостом длиной 140 м, который обрушился в октябре 2019 г., дождевая вода и соль попали в балку и вызвали коррозию анкерных устройств, на основании чего было выполнено обследование в ноябре 2008 г. В его рамках не были выявлены угрожающие признаки, приведшие к обрушению в 2019 г., к которым следует отнести смещение и повреждение защитного кожуха нижнего вантового узла (рис. 17).

В результате длительной эксплуатации сооружения с повреждением и нарушением герметичности анкерного узла происходили регулярные протечки с переувлажнением нижележа-

щих элементов анкерных систем (несущих тро-сов и анкерных блоков). Следует отметить, что дождевая вода просачивалась в балку и накапливалась, вызывая ржавчину на проволоке и головке анкера, также ситуацию усугубил тропический климат и влажный соленый морской воздух. Экспертной группой были осмотрены, обмерены и инструментально обследованы 30 вантовых узлов, общее состояние вантовых элементов и анкерных узлов отражено на рис. 18.

Для своевременного предупреждения опасных ситуаций необходимо в плановом порядке производить обследование и испытания элементов конструкций мостов специализированным оборудованием и приборами, а также устанавливать мониторинговые системы [4–10].



Рис. 16. Фактическое положение канатов, установленных в вантовой пряди № 10



Рис. 17. Смещение защитного (антивандального/гидроизоляционного) короба



Рис. 18. Состояние анкерной пластины и высокопрочных прядей в уровне анкерных узлов:
1–13 – ванты и узлы

Выводы

Исследование показало, что особенно сильная коррозия была выявлена в вантовых узлах 7–13. Судя по всему, первым в результате коррозии оборвался вантовый кабель 11, что привело к обрушению моста. Входящие в данную вантовую прядь высокопрочные кабели были наиболее сильно подвержены коррозии со стороны коробчатой балки на левом борту (с восточной стороны), включая трос, который порвался первым. Именно с этой стороны наблюдалось смещение защитного кожуха и затвердевание полимерного герметика с нарушением герметичности. Еще до обрушения несколько высокопрочных жил, входя-

щих в состав прядей, были оборваны: на это указывают обрыв с образованием шейки и зоны деформации (текучести), а также застарелая коррозия на торцах оборванных жил. Эффективная площадь сечения кабеля составляла всего 22–27 % от первоначального размера, с соответственным снижением прочности до критических значений. Кроме того, опорная анкерная плита была треснута с выпасовкой и утратой в результате обрушения анкерных клиньев (цанг). Данные повреждения экспертным сообществом были определены как основные причины обрушения сооружения под весом проходящей по мосту топливной цистерны.

Список источников

1. Национальный комитет по расследованию проблем безопасности на транспорте (NTSIC). Информационный бюллетень. Отчет о крупном дорожно-транспортном происшествии на мосту Наньфангао через Южно-Китайское море. TTSB-HFR-20-05-001. 2019. URL: <https://www.ttsb.gov.tw/1133/1178/1179/25422/post> (дата обращения: 25.01.2025).
2. Национальный совет по расследованию безопасности на транспорте (NTSIB). Отчет о расследовании крупных транспортных происшествий. Том II. Крупное дорожно-транспортное происшествие, связанное с разрушением моста Наньфаньгао. TTSB-HOR-20-11-001. 2019. URL: <https://www.ttsb.gov.tw/1133/1178/1179/25422/post> (дата обращения: 11.03.2025).
3. Японский сайт «Технологии» // Мосты и метро. 2019. URL: <https://xtech.nikkei.com/search/> (дата обращения: 01.02.2025).
4. Приборы и оборудование для оценки надежности и устойчивости искусственных сооружений транспортной отрасли / И. С. Бондарь, М. Я. Квашнин, Ш. А. Абдрешов [и др.] // Вестник КаздорНИИ. 2024. № 3. С. 45–52.
5. Бондарь И. С., Хардиков П. Г., Ремизов Е. Н. Совершенствование нормативной базы по обследованию, диагностике и осмотрам автодорожных мостов в США в период с 1970-х годов по настоящее время // Вестник КаздорНИИ. 2025. № 1. С. 55–65.

6. Белый А. А. Опыт реализации и перспективы развития систем мониторинга инженерных конструкций на объектах транспортной и гражданской инфраструктуры // Вестник КаздорНИИ. 2025. № 1. С. 32–43.
7. Короткий А. А., Бахтеев О. А. Дорожно-транспортные происшествия: основные причины, анализ аварийности, методы снижения // Безопасность техногенных и природных систем. Компьютерные и информационные науки. 2019. № 2. С. 50–55. DOI 10.23947/2541-9129-2019-2-50-55.
8. Ландо Е. А. Автомобильные дороги и безопасность дорожного движения // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013. № 11. С. 15–22.
9. Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений / А. А. Карамышева, Д. А. Строев, М. А. Колотиенко, А. И. Коник // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3. С. 1–10.
10. Шумейко В. В., Карамышева А. А., Евтушенко А. И. Большепролетные вантовые несущие конструкции зданий и сооружений. Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2019. 85 с.

References

1. National Transportation Safety Investigation Committee (NTSIC) Fact Sheet. Report on the major traffic accident on the Nanfanggao Bridge over the South China Sea. Report edited by. TTSB-HFR- 20-05-001. Report Date: November 2019. (In Russ.). URL: <https://www.ttsb.gov.tw/1133/1178/1179/25422/post>.
2. National Transportation Safety Investigation Board (NTSIB) Major Traffic Accident Investigation Report, Volume II October 1, 108. Major traffic accident involving collapse of Nanfanggao Bridge: TTSB-HOR-20-11-001 Report Date: November 2019 R.O.C. (In Russ.). URL: <https://www.ttsb.gov.tw/1133/1178/1179/25422/post>.
3. Japanese Technoligion website. *Bridges and Subways*. 2019. (In Russ.). URL: <https://xtech.nikkei.com/search/>.
4. Bondar I. S., Kvashnin M. Y., Abdreshov Sh. A. [et al.]. Instruments and equipment for assessing the reliability and stability of artificial structures of the transportation industry. *Vestnik KazdorNII*. 2024;(3):45–52. (In Russ.).
5. Bondar I. S., Hardikov P. G., Remizov E. N. Perfection of the normative base for examination, diagnostics and inspections of highway bridges in the USA in the period from 1970s to the present time. *Vestnik of KazdorNII*. 2025;(1):55–65. (In Russ.).
6. Bely A. A. Experience of realization and prospects of development of the systems of monitoring of engineering structures at the objects of transport and civil infrastructure. *Vestnik KazdorNII*. 2025;(1):32–43. (In Russ.).
7. Korotkiy A. A., Bakhteev O. A. Road traffic accidents: the main causes, accident analysis, methods of reduction. *Safety of technogenic and natural systems. Computer and information sciences*. 2019;(2):50–55. (In Russ.). DOI 10.23947/2541-9129-2019-2-50-55.
8. Lando E. A. Automobile roads and traffic safety. *Visnik Prydniprovskaia Prydniprovskaia State Academy of Architecture and Architecture*. 2013;(11):15–22.
9. Karamysheva A. A., Stroev D. A., Kolotienko M. A., Konik A. I. Analysis and systematization of the causes of bridge structures failure. *Engineering Bulletin of Don*. 2019;(3):1–10. (In Russ.).
10. Shumeiko V. V., Karamysheva A. A., Evtushenko A. I. Large-span cable-stayed load-bearing structures of buildings and constructions. Rostov-on-Don: DSTU; 2019. 85 p. (In Russ.).

Информация об авторах

П. Г. Хардиков – эксперт по технической безопасности ООО «Сен-Гобен строительная продукция Рус». И. С. Бондарь – кандидат технических наук, PhD МОН РК, ассоциированный профессор (доцент) МНиВО РК, ассоциированный профессор кафедры «Архитектурно-строительная инженерия» ALT Университета имени Мухамеджана Тынышпаева.

Д. В. Бирюков – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Фортификации и специальных сооружений» Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

Information about the authors

P. G. Hardikov – technical safety expert of Saint-Gobain Construction Products Rus.

I. S. Bondar – Candidate of Engineering, VAK RF, Ph.D. MES RK, Associate Professor of MEE RK, Associate Professor of the Architectural and Construction Engineering Department, ALT University named after Mukhamedjan Tynyshpaev.

D. V. Biryukov – Candidate of Engineering, Senior Lecturer of the Fortification and Special Structures Department, Military Academy of Material and Technical Support named after Army General A. V. Khrulev.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025; одобрена после рецензирования 15.08.2025; принятая к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 16.05.2025; approved after reviewing 15.08.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья

УДК 624.21

doi:10.52170/1815-9265_2025_76_99

Допускаемые отклонения косвенного армирования в анкерных зонах предварительно напряженных конструкций

Владимир Рафаильевич Камалтдинов ^{1✉}, Максим Сергеевич Марченко ²,
Владислав Сергеевич Горячkin ³, Василий Владимирович Бойко ⁴

^{1, 2, 3, 4, 5} «СТС», Москва, Россия

¹ kamaltdinov@sts-hydro.ru✉

² marchenko@sts-hydro.ru

³ goryachkin@sts-hydro.ru

⁴ boiko@sts-hydro.ru

Аннотация. Требования к допускаемым отклонениям элементов анкерных зон предварительно напряженных элементов в нормативной документации не всегда учитывают габариты косвенного армирования, геометрические размеры анкеров, реальную несущую способность зоны передачи нагрузки от анкера на бетон.

В статье представлен опыт подбора допускаемого отклонения соосности спиралей косвенного армирования анкера с опорным стаканом на 55 прядей (ОС-55) поставщика системы предварительного напряжения (СПН) ООО «СТС», использующегося в системе предварительного напряжения защитной оболочки АЭС, и проверка допускаемого отклонения косвенного армирования анкера СПН с опорным стаканом на 19 прядей (ОС-19), наиболее часто встречающегося в мостовых конструкциях. Приведен пример разрушения анкерной зоны предварительно напряженной балки на объекте гражданского строительства из-за превышения допускаемых отклонений соосности спиралей и анкера, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

Представлен обзор отечественных и иностранных нормативных документов. Описаны выполненные конечно-элементные расчеты зон передачи нагрузки от анкеров СПН на бетон при различных значениях смещения спиралей косвенного армирования относительно оси анкера.

Анализ и сравнение результатов расчетов для анкерной зоны ОС-55, применяемой в реальных проектах, показал, что допускаемое отклонение по соосности может быть увеличено более чем в два раза относительно регламентируемого нормативными документами. Допускаемое отклонение смещения спиралей анкерной зоны ОС-19, указанное в нормативных документах, подтверждено конечно-элементным расчетом. Его увеличение допустимо только при отдельном обосновании.

Ключевые слова: предварительно напряженный железобетон, система предварительного напряжения, анкерная зона, косвенное армирование

Для цитирования: Допускаемые отклонения косвенного армирования в анкерных зонах предварительно напряженных конструкций / В. Р. Камалтдинов, М. С. Марченко, В. С. Горячkin, В. В. Бойко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76), спецвыпуск. С. 99–109. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_99.

Original article

Permissible deviations of indirect reinforcement in anchorage zones of prestressed structures

Владимир Р. Камалтдинов ^{1✉}, Максим С. Марченко ², Владислав С. Горячkin ³, Василий В. Бойко ⁴

^{1, 2, 3, 4, 5} STS Ltd., Moscow, Russia

¹ kamaltdinov@sts-hydro.ru✉

² marchenko@sts-hydro.ru

³ goryachkin@sts-hydro.ru

⁴ boiko@sts-hydro.ru

Abstract. Regulatory standards for permissible deviations in anchorage zones of prestressed elements often fail to account for the dimensions of indirect reinforcement, the geometric parameters of anchors, or the actual load-bearing capacity of the zone transferring forces from the anchor to the concrete.

This article presents a case study on determining the permissible misalignment tolerance between spiral indirect reinforcement and the OS-55 (55-strand) cup-type anchor supplied by STS Ltd., a prestressing system

provider. The anchor is used in the prestressing system of nuclear power plant (NPP) containment structures. Additionally, the study examines the permissible deviation of indirect reinforcement in the OS-19 (19-strand) anchor, commonly found in bridge structures. A real-world example of anchorage zone failure in a prestressed concrete beam from a civil engineering project is provided, demonstrating how excessive misalignment between the spiral reinforcement and anchor led to structural damage—highlighting the relevance of this research.

A review of domestic and international regulatory documents is presented. Finite element analyses were performed to evaluate load transfer zones from prestressing anchors to concrete under varying degrees of spiral reinforcement misalignment relative to the anchor axis.

Analysis and comparison of calculation results for the OS-55 anchorage zone, implemented in actual projects, showed that the permissible misalignment tolerance could be more than doubled compared to current regulatory limits. For the OS-19 anchorage zone, finite element analysis confirmed the permissible spiral displacement limits specified in standards. Any increase in this tolerance is only permissible if rigorously justified by additional verification.

Keywords: prestressed reinforced concrete, prestressing system, anchorage zone, indirect reinforcement

For citation: Kamaltdinov V. R., Marchenko M. S., Goryachkin V. S., Boiko V. V. Permissible deviations of indirect reinforcement in anchorage zones of prestressed structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):99–109. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_99.

Введение

Зона передачи нагрузки от анкера системы предварительного напряжения (СПН) на бетон является критически важной областью железобетонной конструкции. Разработчик СПН несет ответственность только за локальную область в зоне анкера, предусматривая в ней косвенное армирование для восприятия сжимающих напряжений, возникающих в бетоне. Общая зона влияния анкеров является зоной ответственности проектировщика сооружения. Локальная зона указана на общей схеме анкерной области (рис. 1).

Конструкция косвенного армирования анкерной зоны должна соответствовать применяемой системе предварительного натяжения [1], отвечать требованиям прочности, надежности и быть удобной при монтаже. Основные типы косвенного армирования:

- спираль косвенного армирования;
- хомуты косвенного армирования;
- двойное косвенное армирование – комбинация спирали и хомутов.

При монтаже косвенного армирования критически важно соблюдать проектное положение – обеспечивать соосность с анкером. Значительные отклонения в положении косвенного армирования могут приводить к разрушению анкерной зоны в процессе натяжения, причем до достижения уровня контролируемого усилия. На рис. 2 показан случай разрушения анкерной зоны балки на объекте гражданского строительства. Одной из главных причин разрушения стало смещение спирали косвенного армирования относительно центра анкерного стакана.

К косвенному армированию, как и к другим элементам арматурного каркаса, предъявляются требования по точности монтажа, устанавливаются допуски на отклонение от проектного положения.

В статье рассмотрено влияние величины допускаемых отклонений соосности спирали косвенного армирования и анкеров СПН для пучков из 19 и 55 канатов типа К7. Анкер с ОС-19 является наиболее распространенным для объектов

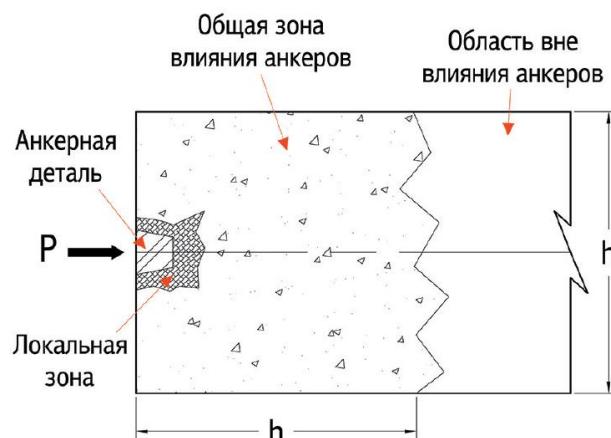


Рис. 1. Зоны влияния анкера в теле бетона



Рис. 2. Разрушение анкерной зоны при натяжении вследствие несоблюдения соосности косвенного армирования с анкерным элементом

транспортного строительства, а анкер с ОС-55 используется в системе предварительного напряжения защитной оболочки (СПЗО) АЭС.

В таблице приведен результат анализа отечественной и иностранной нормативной документации на предмет допускаемых отклонений косвенного армирования от оси анкера. Стоит отметить, что в указанных документах допускаемые отклонения не зависят от количества канатов в пучке, закрепляемом анкером.

В российской нормативной документации для атомного строительства нет определенных требований к допускаемым отклонениям косвенного армирования. Данная величина назначается проектировщиком СПН СПЗО атомной станции. Анкер ОС-55 имеет массу около 200 кг и спираль косвенного армирования диаметром витка 570–600 мм. При таких

габаритах допускаемое отклонение, регламентируемое [2], обеспечить затруднительно. Следовательно, в исследовании поставлено две задачи:

- расчетом определить допускаемое отклонение косвенного армирования анкерной зоны ОС-55;
- проверить допускаемое отклонение, регламентируемое в [2] для анкерной зоны ОС-19.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнялось на основании результатов конечно-элементных расчетов двух железобетонных призм. На основе рекомендаций, изложенных в прил. С.4 [7], к анализу приняты железобетонные призмы с нижеописанными параметрами. Аналогичные рекомендации приведены в проекте ГОСТ

Допускаемые отклонения соосности косвенного армирования с анкером

Документ	Соосность косвенного армирования с анкером
СП 46.13330.2012 «Мосты и трубы», п. 7.40, табл. 2 [2]	± 10 мм
СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции», п. 5.16.16, табл. 5.10 [3]	$\pm h/25$, но не более 25 мм
ACI 117 «Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials», sect. 2.2 [4]	При глубине расположения или толщине элемента менее 4 дюймов $\pm 1/4$ дюйма = 6,35 мм
	От 4 до 12 дюймов $\pm 3/8$ дюйма = 9,52 мм
	Свыше 12 дюймов $\pm 1/2$ дюйма = 12,7 мм
PTI/ASBI M50.3-12 «Guide specifications for grouted Post-Tensioning», sect. 9.3 [5]	От $\pm 1/4$ до $\pm 1/2$ дюйма = от 6,35 до 12,7 мм в зависимости от положения пучка и направления отклонения
EN 13670:2009 «Execution of concrete structures», sect. 10.6 [6]	При $h \leq 150$ мм ± 10 мм
	При $h = 400$ мм ± 15 мм
	При $h \geq 2500$ мм ± 20 мм

Примечание. h – высота сечения, мм; 1 дюйм = 25,4 мм.

«Системы предварительного напряжения конструкций с натяжением на бетон», утверждение которого планируется в 2025 г.

Призма для ОС-55 имеет размеры сторон 850×850 мм и высоту 1 700 мм. Размеры призмы соответствуют шагу по осям анкеров 720 мм. Класс бетона по прочности на сжатие при натяжении – В55, спираль косвенного армирования запроектирована из арматуры класса А500. Рассмотрены следующие варианты диаметров спиралей косвенного армирования (в осях) со смещениями 0, 10, 20, 30, 40 и 50 мм: 570; 580; 590; 600 мм.

Призма для ОС-19 имеет размеры 470×470 мм и высоту 940 мм. Размеры призмы соответствуют шагу по осям анкеров 400 мм. Класс бетона по прочности на сжатие при натяжении – В36, спираль косвенного армирования запроектирована из арматуры класса А400 диаметром 380 мм (в осях) с возможными смещениями 0, 5, 10, 15, 20, 25 мм.

Различные величины смещения оси спирали косвенного армирования относительно оси анкеров обусловлены геометрическими габаритами анкеров и спиралей. Максимальные значения смещения 25 мм для ОС-19 и 50 мм для ОС-55 соответствуют ситуации касания спирали тела анкера.

Контроль и сравнение результатов выполнены по следующим параметрам:

- предельная нагрузка при разрушении призмы;
- напряжения в спирали косвенного армирования;
- напряжения в хомутах призмы при 80 % от разрывного усилия пучка;
- напряжения в стакане при 95 % от разрывного усилия пучка;
- ширина раскрытия трещин по боковой грани призмы при 80 % от разрывного усилия в пучке.

Конструктивное армирование призм выполнено из арматуры класса А500 по [8]. Количество арматуры подобрано из условия обеспечения расхода армирования $50 \text{ кг}/\text{м}^3$, что идет в запас по сравнению с реальным армированием конструкций как защитной оболочки, так и пролетного строения моста.

ОС-19 и ОС-55 произведены из чугуна ВЧ-50 [10].

Стоит отдельно отметить, что, согласно требованиям [8, 9], зона передачи нагрузки на бетон анкера СПН должна воспринимать нагрузку не менее 110 % от нормативного разрывного усилия пучка. Согласно [1], прочность анкеров и анкерных зон бетона (с косвенным армированием) должна составлять не менее 95 % прочности арматурных элементов. При этом, согласно [9], и агрегатная прочность пучка канатов, закрепляемых клиновыми зажимами, должна быть не менее 95 % нормативного разрывного усилия пучка.

Завышение прочности зоны передачи нагрузки от анкера на бетон относительно нормативного разрывного усилия пучка на 15 % связано с возможной вариацией прочности бетона в реальной конструкции, отклонением соосности косвенного армирования, несоблюдением межосевого расстояния соседних анкеров и т. д. Данный факт используется при дальнейшем анализе результатов.

Конечно-элементные расчеты выполнены в программном комплексе Midas FEA NX. В одной расчетной модели совместно деформируются бетон, арматура и опорный стакан. Общий вид расчетной схемы с ОС-55 приведен на рис. 3, а с ОС-19 – на рис. 4.

Подробное описание расчетной модели и ее верификация с результатами физических полномасштабных испытаний приведены в ранее выполненном исследовании [10].

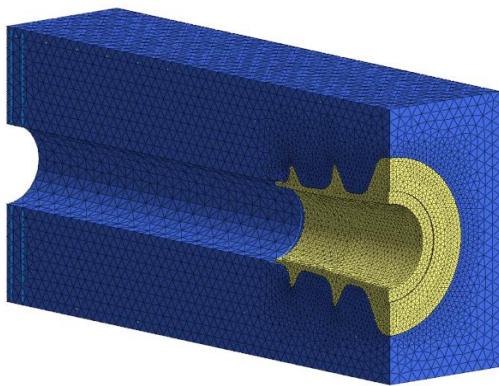
В каждой из расчетных схем рассмотрены вышеописанные ситуации со смещением оси спирали косвенного армирования относительно оси анкера (рис. 5).

Результаты исследований

На основании результатов конечно-элементных расчетов построены графики, отражающие зависимость различных параметров от принятого смещения спирали косвенного армирования. На рис. 6–8 приведены результаты расчетов для ОС-55.

На реальных объектах СПЗО АЭС для анкера с ОС-55 в составе СПН ООО «СТС» используется спираль диаметром 600 мм (в осях) из арматуры класса А500 при расстоянии между осями соседних анкеров 720 мм. Согласно результатам расчета для данной конфигурации косвенного армирования при классе бетона по прочности на сжатие В55

а)



б)

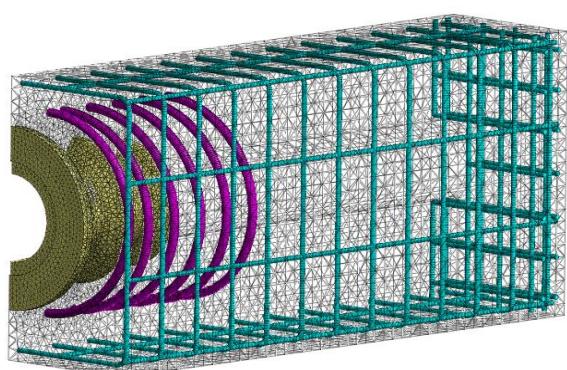
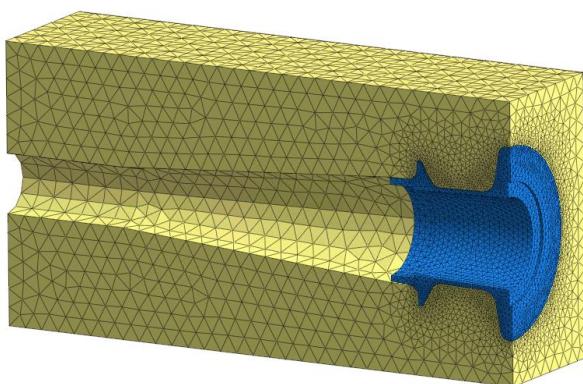


Рис. 3. OC-55. Общий вид расчетной схемы (а) и элементы армирования призмы (б)

а)



б)

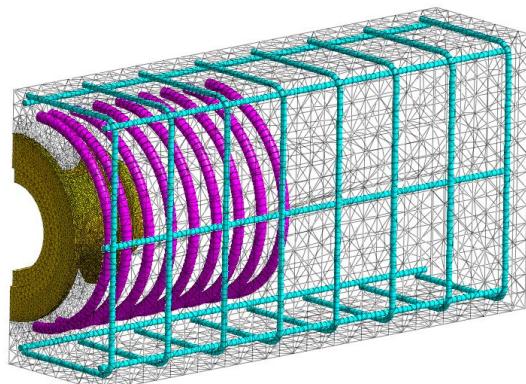


Рис. 4. OC-19. Общий вид расчетной схемы (а) и элементы армирования призмы (б)

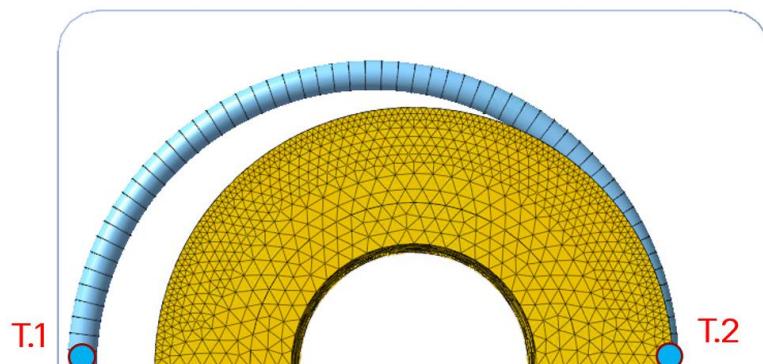


Рис. 5. Смещение спирали косвенного армирования относительно оси анкера в расчетной схеме

возможно принять допускаемое отклонение оси спирали от оси анкера до 50 мм включительно. Исходя из конструктивных особенностей армирования реальной анкерной зоны в СП3О допускаемое отклонение ограничено величиной 25 мм.

На рис. 9–11 приведены результаты расчетов для OC-19.

При отклонении оси спирали косвенного армирования от оси анкерной зоны на 10 мм для анкера с OC-19 выявлено снижение прочности зоны передачи нагрузки на бетон со 110 до 108 % нормативного разрывного усилия пучка. При этом требование [1] по прочности анкерной зоны выполняется до величины смещения спирали в 25 мм.

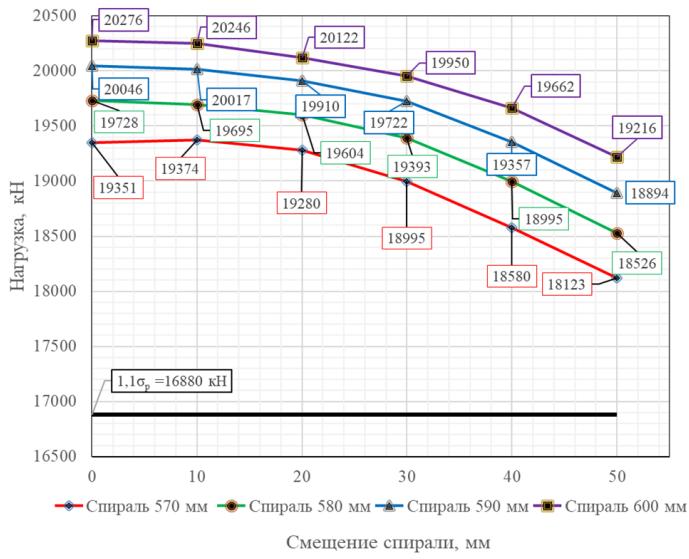


Рис. 6. Максимальная нагрузка на призму с ОС-55 при различных диаметрах спиралей косвенного армирования и их смещениях

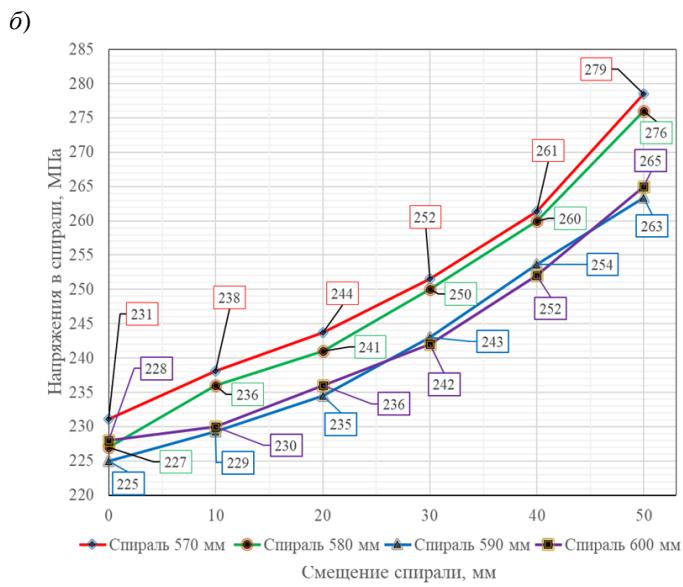
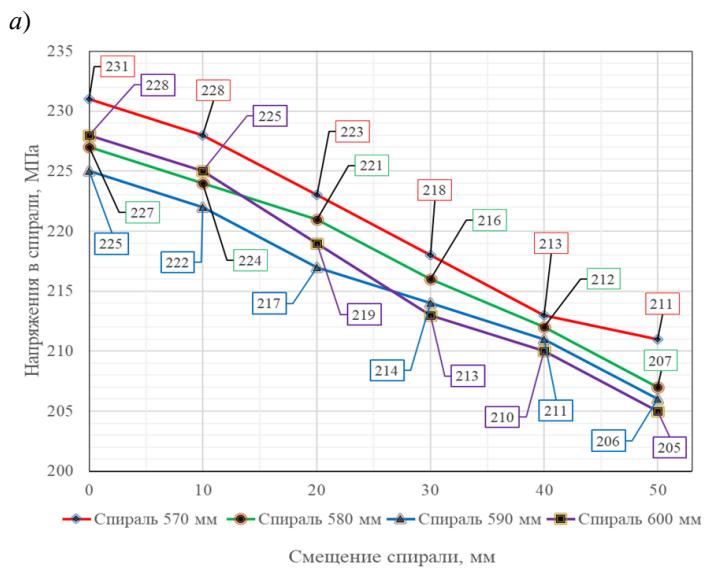


Рис. 7. Напряжения в спирале косвенного армирования (ОС-55) при 95 % от нормативного разрывного усилия пучка:

a – участок спирали в т. 1; б – участок спирали в т. 2

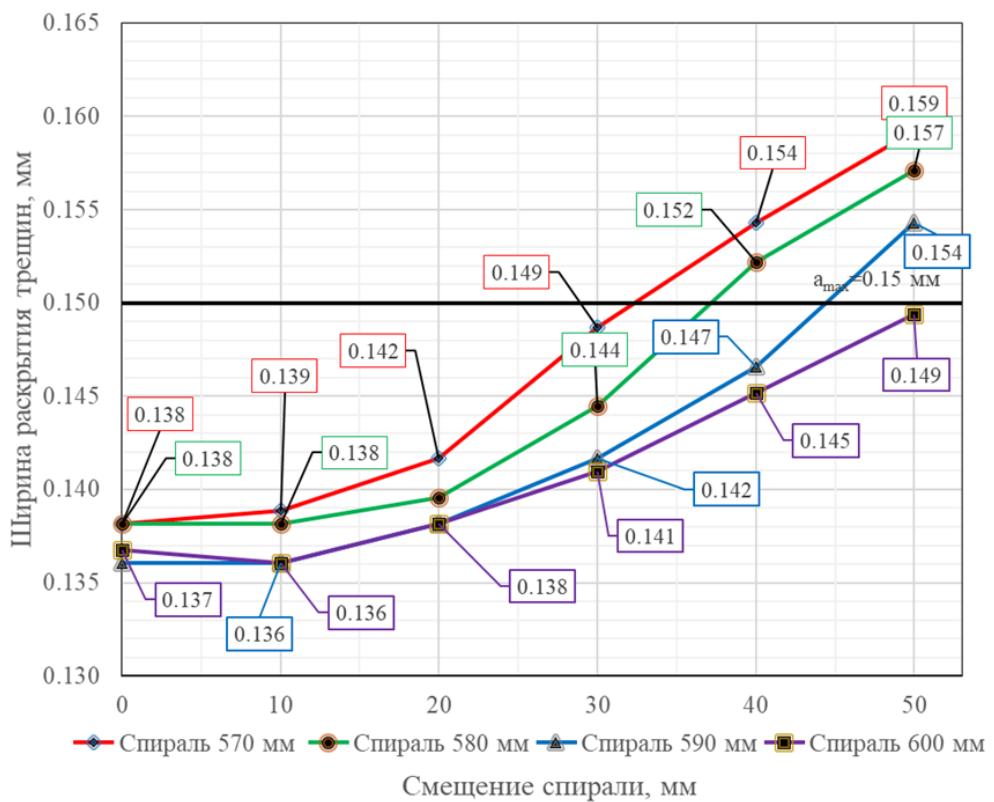


Рис. 8. Ширина раскрытия трещин по боковой грани призмы с ОС-55 при 80 % от нормативного разрывного усилия пучка

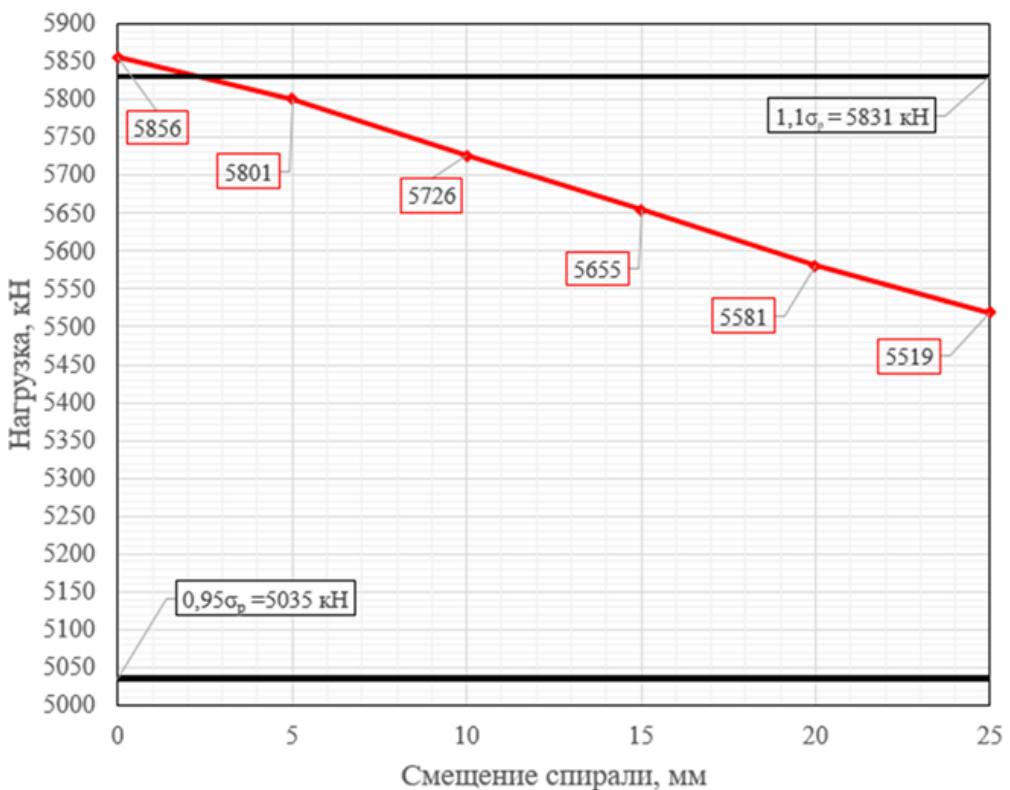
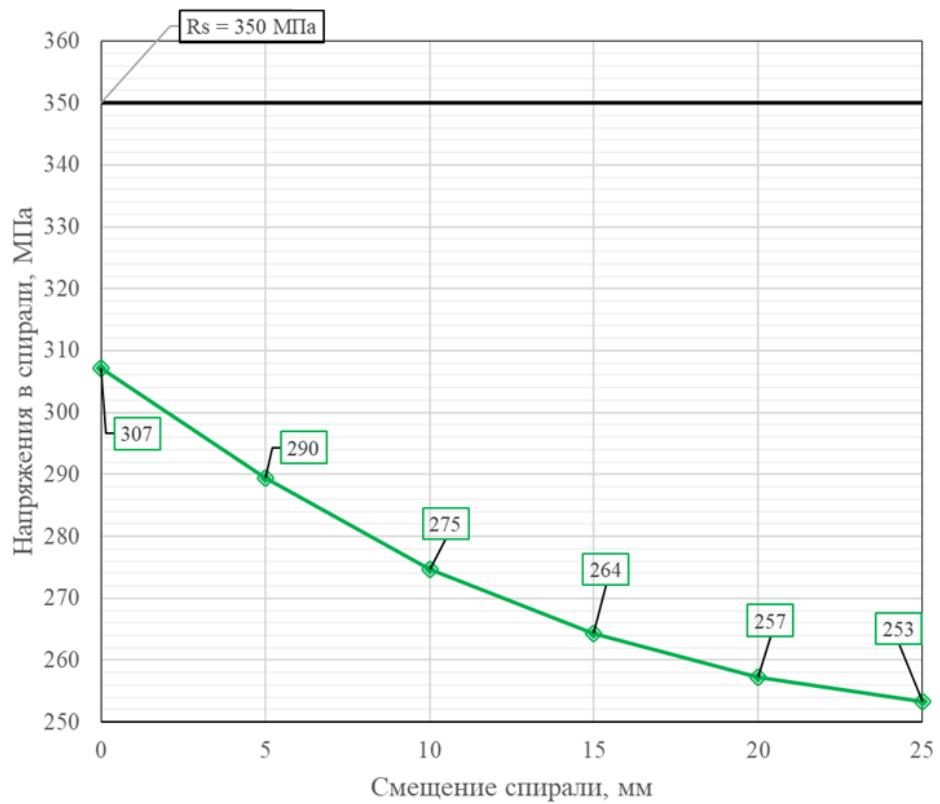


Рис. 9. Максимальная нагрузка на призму с ОС-19 при различных смещениях спиралей косвенного армирования

а)



б)

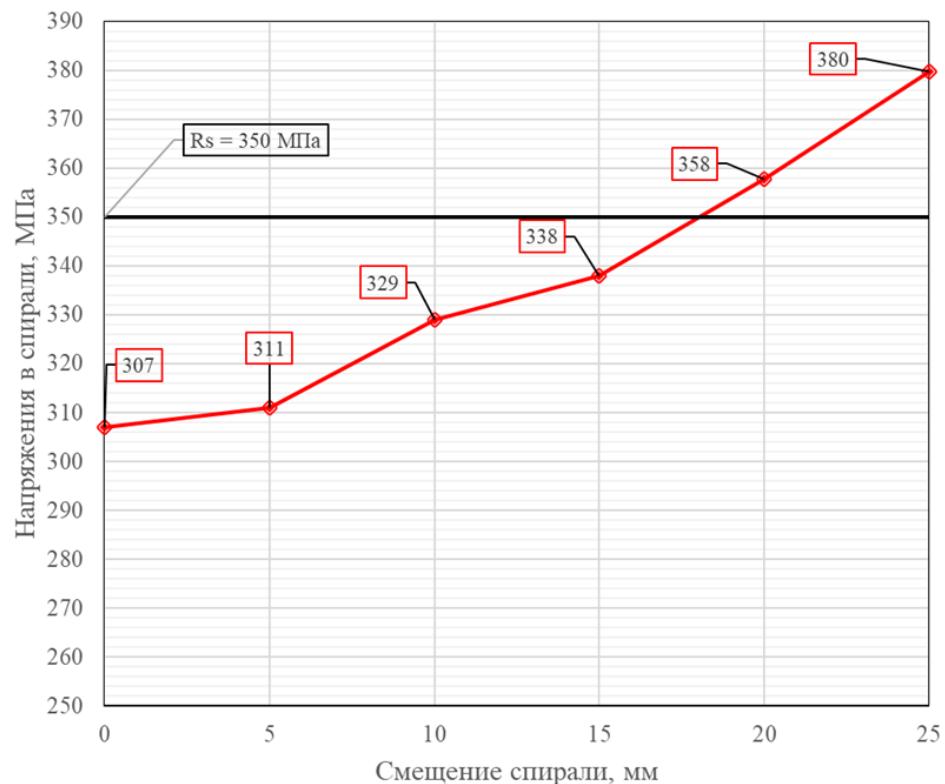


Рис. 10. Напряжения в спирали косвенного армирования (ОС-19) при 95 % от нормативного разрывного усилия пучка:
а – участок спирали в т. 1; б – участок спирали в т. 2

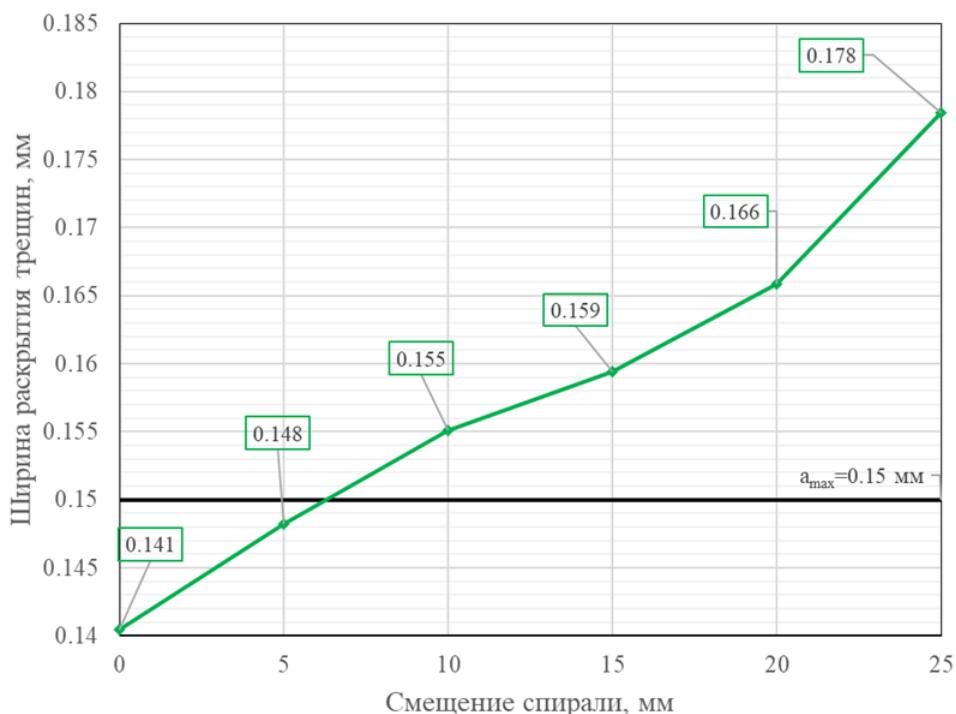


Рис. 11. Ширина раскрытия трещин по боковой грани призмы с ОС-19 при 80 % от нормативного разрывного усилия пучка

При величине отклонения оси спирали 10 мм ширина раскрытия трещин по боковой грани призмы превышает допустимое значение на 3 %, но, ввиду того что реально измеренная ширина раскрытия трещин в аналогичных испытаниях в среднем на 15–20 % ниже, чем полученные в расчете значения, превышение на 3 % не является определяющим фактором.

По результатам расчета выявлено, что зона передачи нагрузки на бетон от анкера с ОС-19 при классе бетона по прочности на сжатие В36 и косвенном армировании из спирали диаметром 380 мм (в осях) из арматуры класса А400 при расстоянии между осями соседних анкеров 400 мм удовлетворяет требованиям [2] в части допускаемого отклонения спирали и анкера.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Расчетная методика, ранее верифицированная по результатам испытаний, может при-

меняться при назначении допусков на установку косвенного армирования.

2. По результатам расчетов для зоны передачи нагрузки на бетон анкера с ОС-55 СПН ООО «СТС» определено допустимое отклонение соосности спирали косвенного армирования с анкером. Рассчитанное допустимое отклонение принято в проекте.

3. Для анкера с ОС-19, наиболее часто встречающегося в мостовых сооружениях, выполнена проверка величины допустимого отклонения, регламентируемого нормативными документами.

4. После проведения дополнительных исследований, подтвержденных математическим моделированием и натурными испытаниями, необходимо разработать предложения по внесению изменений в своды правил по проектированию и контролю качества при монтаже в части отклонений в анкерной зоне бетона с учетом количества канатов в пучке, закрепляемом анкером.

Список источников

1. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* : [с Изменениями № 1, 2, 3]. Москва : Стандартинформ, 2019. 340 с.
2. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 / Министерство регионального развития Российской Федерации. Москва, 2012. 123 с.
3. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции : актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 / Минрегион России. Москва, 2012. 95 с.
4. ACI 117-22. Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials. Farmington Hills : American Concrete Institute, 2022. 42 p.
5. PTI/ASBI M50.3-12. Guide specifications for grouted Post-Tensioning. Phoenix : Post-Tensioning Institute, 2012. 56 p.
6. EN 13670:2009. Execution of concrete structures. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2009. 78 p. (European Standard).
7. EAD-160004-00-0301. Post-tensioning kits for prestressing of structures. EU : publishes by EOTA, 2016. 102 p.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : [с Изменениями № 1, 2]. Москва : ФГБУ «РСТ», 2022. 140 с.
9. СТО 95 12006–2017. Объекты использования атомной энергии. Система предварительного напряжения защитной оболочки реакторного отделения атомной электрической станции. Общие требования. Москва : ГК «Росатом», 2017. 23 с.
10. Прочность узла анкеровки пучков напрягаемой арматуры при предварительном напряжении на бетон / В. Р. Камалтдинов, М. С. Марченко, В. С. Горячkin [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71), спецвыпуск. С. 35–44. DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_35.
11. ГОСТ 7293–85. Отливки из высокопрочного чугуна. Технические условия : введ. 01.01.1986. Москва : Изд-во стандартов, 1985. 12 с.

References

1. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts Actualised edition of SNiP 2.05.03-84* [with Revisements No. 1, 2, 3]. Moscow: Standartinform; 2019. 340 p. (In Russ.).
2. SP 46.13330.2012. Bridges and culverts. Actualised edition of SNiP 3.06.04-91. Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow; 2012. 123 p. (In Russ.).
3. SP 70.13330.2011. Load-Bearing and Enclosing Structures. Actualised edition of SNiP 3.03.01-87. Minregion of Russia. Moscow; 2012. 95 p. (In Russ.).
4. ACI 117-22. Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials. Farmington Hills: American Concrete Institute; 2022. 42 p.
5. PTI/ASBI M50.3-12. Guide specifications for grouted Post-Tensioning. Phoenix: Post-Tensioning Institute; 2012. 56 p.
6. EN 13670:2009. Execution of concrete structures. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2009. 78 p. (European Standard).
7. EAD-160004-00-0301. Post-tensioning kits for prestressing of structures. EU: publishes by EOTA; 2016. 102 p.
8. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions [with Revisements No. 1, 2]. Moscow: Russian Standardization Institute; 2022. 140 p. (In Russ.).
9. STO 95 12006–2017. Objects of use of atomic energy. Post-tensioning system for reactor containment building of a nuclear power plant. General requirements. M.: Rosatom State Corporation, 2017. 23 p. (In Russ.).
10. Kamaltdinov V. R., Marchenko M. S., Goryachkin V. S. [et al.]. The strength of the anchorage zone of tensioned reinforcement bundles at prestressing on concrete. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):35–44. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_35.
11. GOST 7293–85 Ductile Iron for Castings. Technical Specifications. Enforced 01.01.1986. Moscow: Standards Publishing House; 1985. 12 p. (In Russ.).

Информация об авторах

B. R. Камалтдинов – ведущий специалист отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС».

M. С. Марченко – технический директор ООО «СТС».

B. С. Горячkin – руководитель отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС».

B. В. Бойко – специалист отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС».

Information about the authors

V. R. Kamaltdinov – Lead engineer of the Engineering Calculations and Research Department STS Ltd.

M. S. Marchenko – Chief technical officer STS Ltd.

V. S. Goryachkin – Head of the Engineering Calculations and Research Department STS Ltd.

V. V. Boiko – Engineer of the Engineering Calculations and Research Department STS Ltd.

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 12.06.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 21.05.2025; approved after reviewing 12.06.2025; accepted for publication 29.09.2025.

Научная статья

УДК 624.21

doi:10.52170/1815-9265_2025_76_110

О проблемах во внедрении технологии цифровых двойников ИССО на сети железных дорог

**Денис Викторович Еськов¹, Иван Владимирович Чаплин^{2✉}, Сергей Владимирович Бочкарев³,
Стефан Васильевич Ефимов⁴, Наталья Сергеевна Легкодимова⁵,
Александр Николаевич Бирюков⁶**

^{1, 5} Центральная дирекция инфраструктуры – филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия

^{2, 4} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

³ «Синтез АТ», Санкт-Петербург, Россия

⁶ Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Санкт-Петербург, Россия

¹ eskovdv@bk.ru

² chaplin@sgups.stu.ru✉

³ bochkareffsv@yandex.ru

⁴ efimovsv@sgups.stu.ru

⁵ legkodimovans@center.rzd.ru

⁶ aleks_bir@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты разработки подхода к внедрению технологии цифровых двойников искусственных сооружений (ИССО) на сети железных дорог ОАО «РЖД». Сформулирован термин цифрового двойника ИССО. На основе выполненного анализа существующих разработок выделены проблемы во внедрении данной технологии. Отмечены недостатки применения систем мониторинга и интернета вещей. Предложен специализированный конструктор – алгоритм по созданию цифровых информационных моделей на основе имеющихся сведений в автоматизированных системах инфраструктуры путевого хозяйства ОАО «РЖД». Такой алгоритм для создания мостового сооружения использует несколько основных элементов: мостовое полотно, пролетное строение, опорные части и опоры. Моделирование самих элементов предусмотрено в максимально автоматизированном режиме: данные интегрируются из имеющихся источников (автоматизированных систем, а также банка данных) в виде каталога типовых конструкций мостовых сооружений. Сформированы категории данных для заполнения сведений в атрибуатах информационной модели: нормативные, проектные и диагностические. Изложен алгоритм интеграции и анализа данных систем мониторинга, а также их сравнение с нормативными сведениями. Полученные результаты могут стать основой для создания новой системы управления состоянием ИССО на сети железных дорог страны.

Ключевые слова: цифровой двойник, мониторинг, мостовые сооружения, мост, искусственное сооружение, железнодорожная инфраструктура

Для цитирования: О проблемах во внедрении технологии цифровых двойников ИССО на сети железных дорог / Д. В. Еськов, И. В. Чаплин, С. В. Бочкарев, С. В. Ефимов, Н. С. Легкодимова, А. Н. Бирюков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76). С. 110–115. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_110.

Original article

About the problems in the implementation of digital twin technology of the man-made facilities on the railway network

**Denis V. Eskov¹, Ivan V. Chaplin^{2✉}, Sergey V. Bochkarev³, Stefan V. Efimov⁴,
Natalia S. Legkodimova⁵, Alexander N. Biryukov⁶**

^{1, 5} Central Directorate of Infrastructure – Branch of Russian Railways, Moscow, Russia

^{2, 4} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

³ Sintez AT, Saint Petersburg, Russia

⁶ Military Institute (Engineering and Technical) of Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, Saint Petersburg, Russia

¹ eskovdv@bk.ru

² chaplin@sgups.stu.ru✉

³ bochkareffsv@yandex.ru

⁴ efimovsv@sgups.stu.ru

⁵ legkodimovans@center.rzd.ru

⁶ aleks_bir@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the digital twin technology approach development for artificial structures (hereinafter referred to as DSS) on the Russian Railways railway network. The term of the ISSO digital twin is formulated. Based on the analysis of existing developments, the problems in the implementation of the ISSO digital twin technology are highlighted. The disadvantages of using monitoring systems and the Internet of Things are noted. A specialized constructor algorithm is proposed for creating digital information models based on available information in automated systems of the railway infrastructure of Russian Railways. This algorithm uses several basic elements to create a bridge structure: a bridge bed, a superstructure, supporting parts and supports. The modeling of the elements themselves is provided in the most automated mode: data is integrated from available sources – automated systems, as well as a database in the form of a typical bridge structure catalogue. Data categories have been formed to fill in the information in the attributes of the information model: normative, design and diagnostic. An algorithm for the integration and analysis of monitoring system data is described, as well as their comparison with regulatory information. The obtained results can become the basis for creating a new system for managing the condition of artificial structures on the country's railway network.

Keywords: digital twin, monitoring, bridge structures, bridge, artificial structure, railway infrastructure

For citation: Eskov D. V., Chaplin I. V., Bochkarev S. V., Efimov S. V., Legkodimova N. S., Biryukov A. N. About the problems in the implementation of digital twin technology of the man-made facilities on the railway network. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(76):110–115. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_110.

Введение

Масштабность, технологическая сложность и интенсивность использования железнодорожной инфраструктуры хозяйства пути и сооружений требуют своевременного и качественного содержания для поддержания ее бесперебойной и безопасной работы. Вместе с тем в настоящее время существует тенденция к сокращению численности эксплуатационного персонала при проведении работ по содержанию в условиях территориальной рассредоточенности мостов. Такая ситуация приводит к риску несвоевременного проведения профилактических работ, а значит, и к увеличению количества неисправностей, которые могут повлиять на безопасность эксплуатации сооружений.

Создание единого информационного пространства в системе диагностирования и мониторинга физических активов ОАО «РЖД» является одним из ключевых направлений стратегии цифровой трансформации и инициатив ОАО «РЖД», помогает сохранить уровень надежности сооружений. Для автоматизации операций контроля технического состояния объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» (в том числе искусственных сооружений) внедряются, например, системы интернета вещей (IoT) и автоматизированного мониторинга [1–12]. При помощи данных систем главным образом осуществляют сбор, обработку, передачу, хранение и отображение диагностической информации, а также выявляют предпосылки и вероятные причины появления некоторых неисправностей.

При этом такие системы обладают рядом недостатков, которые не позволяют достичь существенного повышения надежности эксплуатации мостов:

– отсутствие достаточного объема диагностической информации для определения достоверного технического состояния искусственных сооружений (ИССО);

– отсутствие автоматической оценки изменения несущей способности и остаточного ресурса конструкций мостов на основе фиксируемых данных;

– узкий спектр алгоритмов выявления возможных причин неисправностей;

– отсутствие применения методов предиктивной аналитики.

Помимо вышеотмеченных недостатков, при внедрении новых технических решений в инфраструктуру ОАО «РЖД» возникает проблема появления разных коллизий из-за ведения разработки без учета существующих и параллельно создаваемых элементов программного обеспечения в одной и той же части хозяйства ОАО «РЖД».

Данные проблемы можно решить с помощью технологии цифрового двойника, интегрирующей существующие и разрабатываемые решения на этапе ее создания, что обеспечит отсутствие разнотечений и несоответствий в текущих разработках хозяйства инфраструктуры.

Технология цифрового двойника – интегрированная система, состоящая из реального сооружения, его виртуальных (цифровой, информационной и расчетной) моделей и элементов связи между ними. Взаимодействие между реальным и виртуальными элементами осуществляется за счет систем автоматизированного и периодического мониторинга, интернета вещей, диспетчерской связи, надзорных мероприятий и др. Данные с реального объекта должны поступать в цифровую информацион-

ную модель для автоматизированного прогнозирования изменения его технического состояния, планирования проведения надзорных и ремонтных мероприятий с предложением сценариев, позволяющих добиться повышения уровня надежности сооружений, исходя из экономической целесообразности.

Опыт внедрения технологии цифрового двойника в инфраструктуру хозяйства пути и сооружений свидетельствует о том, что на этапе ее создания применяется системный подход, за счет чего выявляются и устраняются аномалии в процессах технического обслуживания. Также достигаются различные функциональные цели, такие как управление в режиме реального времени, аналитические в автономном режиме, надзорные в виде проверки работоспособности элементов, предиктивное обслуживание, синхронизированный мониторинг/оповещение, анализ больших данных с применением технологий искусственного интеллекта и т. д.

Вместе с тем отметим, что сегодня путевая инфраструктура ОАО «РЖД» преобразуется в цифровой вид. Однако появляется ряд проблем, связанных с конечной полезной эффективностью реализованных цифровых двойников. Такие двойники на текущий момент по большей части отражают цифровую тень – неполноценно реализованную технологию цифрового двойника, в которой отсутствует какой-то из элементов. Поэтому проблематика внедрения цифровых двойников в путевую инфраструктуру является актуальной.

Цель работы – предложение подхода к повышению уровня надежности эксплуатации ИССО на базе внедрения технологии цифровых двойников. В статье представлено предложение по применению технологии цифрового двойника ИССО на сети железных дорог ОАО «РЖД».

В рамках развития технологии цифрового двойника инфраструктуры ОАО «РЖД» в 2024 г. был проработан вопрос формирования цифрового двойника ИССО на примере существующего моста. С этой целью необходимо объединение существующих в структуре диагностических баз данных в единое информационное пространство, что позволит улучшить межуровневое взаимодействие, синхронизировать работу производственных подразделений, осуществляющих диагностирование и мониторинг физических активов, обеспечить достоверный учет фактического наличия и состояния диагностических комплексов и инструментов (техниче-

ских и программных средств) и повысить уровень предиктивной аналитики.

Из-за большого количества ИССО на сети железных дорог ОАО «РЖД» (более 80 тыс. шт.) и отсутствия их цифровых информационных моделей реализация технологии цифрового двойника в краткосрочной перспективе недостижима. Поэтому был предложен подход к созданию цифровых информационных моделей мостов (ЦИМ) на основе специализированного конструктора. Концепция конструктора моста заключается в формировании ЦИМ на основе автоматически созданных элементов. Для мостового сооружения такими элементами выбраны мостовое полотно, пролетные строения, опоры и опорные части. Создание данных частей модели осуществляется в максимально автоматизированном режиме на основе существующих эксплуатационных данных производственных систем хозяйства пути и сооружений, а также библиотеки моделей элементов моста. Модели отдельных конструкций моста создаются на базе каталога типовых проектов. Пользователь в конструкторе выбирает необходимые модели элементов моста и запускает формирование его цифровой модели. Для отображения созданной информационной модели моста в формате IFC предложено программное обеспечение с основными функциями в виде зуммирования, вращения вокруг осей, поэлементного выделения и просмотра атрибутов элементов моста. Пример отображения реализованной в конструкторе модели моста показан на рис. 1.

Наполнение данными атрибутов созданных элементов модели осуществляется по следующим категориям: нормативные, проектные и эксплуатационные. Нормативные сведения формируются исходя из анализа действующих требований существующих документов (ГОСТ, СП, инструкции и т. п.) на этапе разработки технологии цифрового двойника и актуализируются при появлении новых норм. С этой информацией должны в автоматизированном режиме сравниваться данные других категорий, с выдачей предупреждений системы в случае выявления несоответствий.

Эксплуатационные данные интегрируются из существующих автоматизированных систем железнодорожной инфраструктуры хозяйства пути и сооружений (ЕК АСУИ ИССО, систем мониторинга, интернета вещей, ПК ГИП, АСУ ПА и др.), а также дополняются пользователем

при создании цифрового двойника сооружения. Заполнение недостающих сведений должно осуществляться профильными специализированными работниками. При этом система содержания ИССО на железных дорогах нарушаться не должна. Поэтому целесообразно процесс создания цифровых двойников отнести к работам по обследованию сооружений мостостанциями и специализированными организациями. Отметим, что разрабатываемая

система должна не только производить автоматизированные проверки на соответствие нормативным требованиям, но и идентифицировать коллизии внутри данных, интегрируемых в систему цифровых двойников, а также осуществлять оперативный перерасчет несущей способности, прогнозирование и предиктивную аналитику. Пример представления автоматической проверки информации приведен на рис. 2.

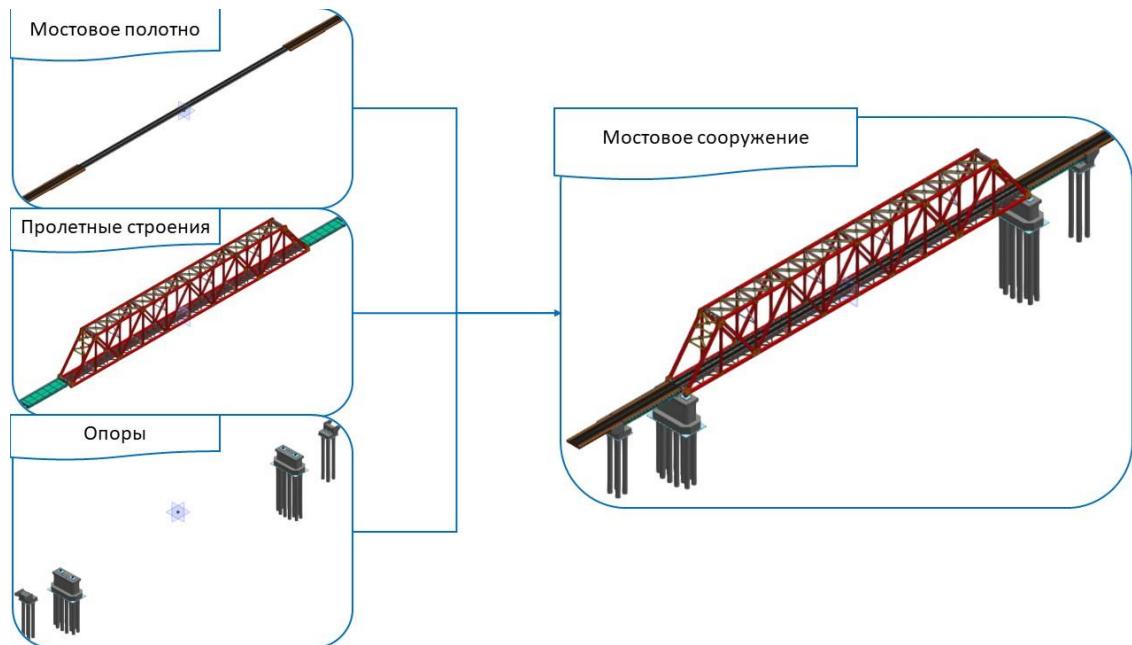


Рис. 1. Цифровая информационная модель моста

Ввод

№ п/п	Параметр	Значение
1	Номер пролетного строения	1
2	Номер пролета	1
3	Род балласта	щебень
4	Толщина балласта под шпалой, м	0,35
5	Стык рельсов по наугольнику	нет

Автоматическая проверка контролируемых параметров

Контролируемые параметры	Норматив		
	значение	min	max
Диапазон допуска	-	0,25	0,6
Вариант правильного ответа	-	да	нет

№ п/п	Датчики	№ датчика	Показатель	Место установки	Ед. изм.	Тек. знач.	Границные значения						Кол-во срабатывания за период эксплуатации		
							Нормативное (расчетное)		Критическое		Предаварийное			Аварийное	
							min	max	min	max	min	max			
1	Акселерометры	A-1	Период собств. попер. гор. колебаний	Опора	сек.	0,75	< 0,9							0	
2		A-2				0,75	< 0,9								
3	Инклинометры	T-1	Угол наклона	угловые сек.		500	(-700) — (700)							0	
4		T-2				400	(-700) — (700)								

Рассчитываются предварительно

Рис. 2. Пример представления автоматической проверки информации

Заключение

Развитие и повсеместное внедрение в систему хозяйства ИССО ОАО «РЖД» технологии цифровых двойников позволит решить многие задачи. За счет автоматизации процессов будут достигнуты оптимизация трудозатрат и положительный экономический эффект. Элемент системы в виде оперативной связи между циф-

ровым и реальным объектом повысит надежность эксплуатации искусственных сооружений, с его помощью возможна фиксация дефектов на более ранних сроках для последующего устранения при небольших степени и объеме их развития. Внедрение технологии цифрового двойника позволит повысить эффективность эксплуатации мостовых сооружений.

Список источников

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон Российской Федерации от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ : (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу 02.07.2013) // Российская газета. 2009. 31 дек.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* : введ. 20.05.2011. Москва : ЦПП, 2011. 341 с.
3. СП 274.1325800.2016. Мосты. Мониторинг технического состояния. Москва : ЦНИИС, 2016. 52 с.
4. Управление жизненным циклом аппаратуры ЖАТ в рамках цифрового двойника / П. С. Сиделев, Д. В. Зуев, С. В. Бочкарев, А. А. Федоров // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 12. С. 2–4.
5. Преимущества технологии цифрового двойника инфраструктуры / С. С. Юханов, Д. В. Зуев, С. В. Бочкарев, А. А. Федоров // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 4. С. 25–27.
6. Зуев Д. В., Бочкарев С. В. Цифровой двойник инфраструктуры ОАО «РЖД» // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 11. С. 11–14.
7. 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. 2025. Т. 22, № 3. С. 831–838.
8. Яшнов А. Н. Сквозная система мониторинга технического состояния мостов // Новые технологии в мостостроении. 2022. С. 114–119.
9. Safranova M. A. Digital Twin of bridge structures // Молодая наука. 2024. С. 244–248. EDN DMWJZU.
10. Ефимов С. В., Кокоева Е. С., Чаплин И. В. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России на примере разработки проекта реконструкции путепровода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27, № 2. С. 226–237.
11. Features of monitoring the stress-strain state of structures during the construction of bridge crossings / I. Zasukhin, A. Ivanov, P. Kuzmenkov [et al.] // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. 2022. Vol. 2. P. 72–81.
12. Chaplin I., Yashnov A. Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 05011.

References

1. Federal Law of the Russian Federation No. 384-FZ dated December 30.12.2009 Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures (with amendments and additions that entered into force on 02.07.2013). *Rossiyskaya Gazeta*. 31.12.2009. (In Russ.).
2. SP 35.13330.2011 Bridges and Pipes. Updated version of SNiP 2.05.03-84*. Introduction. 20.05.2011. Moscow: TSPP; 2011. 341 p. (In Russ.).
3. SP 274.1325800.2016 Bridges. Monitoring of the technical condition. Moscow: Central Scientific Research Institute of Construction; 2016. 52 p. (In Russ.).
4. Sidelev P. S., Zuev D. V., Bochkarev S. V., Fedorov A. A. Management of the life cycle of ZHAT equipment in the framework of a digital twin. *Automation, Communications, Informatics*. 2021;(12):2–4. (In Russ.).
5. Yukhanov S. S., Zuev D. V., Bochkarev S. V., Fedorov A. A. Advantages of digital twin technology of infrastructure. *Automation, Communications, Informatics*. 2021;(4):25–27. (In Russ.).
6. Zuev D. V., Bochkarev S. V. The digital twin of the infrastructure of Russian Railways. *Automation, Communications, Informatics*. 2020;(11):11–14. (In Russ.).
7. Chaplin I. V., Patornyak A. V., Efimov S. V. Improving the system of operation of artificial structures through the use of digital doubles on the example of a railway bridge. *Proceedings of Petersburg Transport University* 2025;22(3):831–838. (In Russ.).

8. Yashnov A. N. End-to-end monitoring system for the technical condition of bridges. *New Technologies in Bridge Construction*. 2022. P. 114–119. (In Russ.).
9. Safronova M. A. Digital twin of bridge structures. *Molodaya Nauka*. 2024. P. 244–248.
10. Efimov S. V., Kokoeva E. S., Chaplin I. V. Problems of introducing information modeling technologies in Russia using the example of the development of an overpass reconstruction project. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2025;27(2):226–237. (In Russ.).
11. Zasukhin I., Ivanov A., Kuzmenkov P. [et al.]. Features of monitoring the stress-strain state of structures during the construction of bridge crossings. *The International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. Vol. 2. 2022. P. 72–81.
12. Chaplin I., Yashnov A. Features of determining the tension forces of the elements of a cable-stayed bridge. *MATEC Web Conference*. 2018. P. 05011.

Информация об авторах

- Д. В. Еськов* – заместитель начальника управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».
- И. В. Чаплин* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.
- С. В. Бочкарев* – кандидат технических наук, технический директор ООО «Синтез-АТ».
- С. В. Ефимов* – кандидат технических наук, доцент, директор Сибирского научно-исследовательского института мостов, доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- Н. С. Легкодимова* – начальник отдела качества и внедрения новых технологий в путевом хозяйстве Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».
- А. Н. Бирюков* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии, организации и экономики строительства Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

Information about the authors

- D. V. Eskov* – Deputy Head of the Track and Structures Department of the Central Directorate of Infrastructure – Branch of Russian Railways.
- I. V. Chaplin* – Candidate of Engineering, Senior Researcher at the Siberian Research Institute of the Siberian Transport University.
- S. V. Bochkarev* – Candidate of Engineering, Technical Director of Sintez-AT.
- S. V. Efimov* – Candidate of Engineering, Associate Professor, Director of the Siberian Research Institute, Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University.
- N. S. Legkodimova* – Head of the Quality and Introduction of New Technologies in the Railway Sector Department of the Central Directorate of Infrastructure – Branch of Russian Railways.
- A. N. Biryukov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology, Organization, and Economics of Construction at the Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Logistic Support named after General of the Army A. V. Khrulev.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

The article was submitted 10.11.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 18.11.2025.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (границы Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 27.11.2025. Дата выхода в свет 28.11.2025

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,5 уч.-изд. л., 14,75 усл.-печ. л. Заказ № 4050

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2025. № 4 (76), спецвыпуск. 1-117