

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://t-s.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/06SATS419.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS419 (<http://dx.doi.org/10.15862/06SATS419>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Быстров В.А., Козак Н.В., Ярошутин Д.А. Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/06SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/06SATS419

**For citation:**

Bystrov V.A., Kozak N.V., Yaroshutin D.A. (2019). Problems of real dynamically loading mode and structure fatigue mode determination in composite steel-concrete city and road bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/06SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/06SATS419

УДК 624.21/.8

ГРНТИ 67.11.41

**Быстров Владимир Аполинарьевич**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия  
Профессор кафедры «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»  
Профессор, кандидат технических наук, академик МАТ  
E-mail: [bystrov.admt@gmail.com](mailto:bystrov.admt@gmail.com)

**Козак Николай Викторович**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия  
Аспирант кафедры «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»  
E-mail: [kozak.spbgasu@gmail.com](mailto:kozak.spbgasu@gmail.com)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7707-4388>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1018546](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546)  
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

**Ярошутин Дмитрий Андреевич**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия  
Старший преподаватель кафедры «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»  
E-mail: [yaroshutin@gmail.com](mailto:yaroshutin@gmail.com)

**Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов**

**Аннотация.** Авторами статьи представлены результаты анализа экспериментально-теоретических исследований и динамических испытаний эксплуатируемых конструкций сталежелезобетонных пролётных строений мостов Санкт-Петербурга, Ленинградской области и Северо-западного региона РФ. В статье освещены некоторые результаты многолетней практики экспериментально-теоретических исследований и динамических испытаний конструкций пролётных строений эксплуатируемых городских и автодорожных сталежелезобетонных мостов, которые показывают, что фактические динамические воздействия от современных потоков обращающегося транспорта на их несущие элементы претерпевают качественные изменения, возрастают по величине и имеют нестационарный

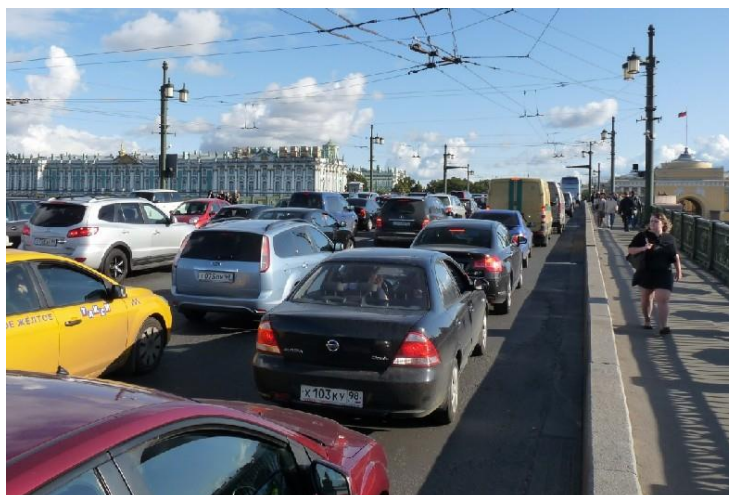
вероятностный характер, оказывающий влияние на сроки службы мостов. Проанализированы теоретические основы применяемого в настоящее время при проектировании сталежелезобетонных пролётных строений городских и автодорожных мостов коэффициента понижения расчётных сопротивлений  $\gamma_w$ , реальные исходные и энергетические спектры вынужденных колебаний наиболее нагруженных элементов. Представлен анализ особенностей спектров режима реальной нестационарной фактической нагруженности различных конструктивных элементов городских и автодорожных мостов, при которых происходит накопление усталостных повреждений в наиболее нагруженных элементах. В статье даны рекомендации о необходимости учёта при проектировании и эксплуатации сталежелезобетонных мостов основных параметров, в наибольшей степени влияющих на фактическую динамическую нагруженность, усталостный ресурс и долговечность конструкций мостов, а именно: цикличность нагружения, способствующая росту усталостных повреждений наиболее нагруженных элементов; нестационарный, вероятностный характер фактического режима нагруженности конструкций под все возрастающими потоками обращающейся нагрузки; значительно большая, чем базовая, фактическая нагруженность элементов; качественные изменения характера динамических воздействий (ударные, резонансные, импульсные процессы нагруженности элементов нагруженности), а также агрессивность воздушной среды.

**Ключевые слова:** сталежелезобетон; динамика; колебания; напряжения; повреждения; дефекты; спектры; ресурс; долговечность

## Введение

В условиях ускоренной интенсификации производства рост экономики страны зависит от темпов развития и решения сложных проблем дорожно-транспортного комплекса, в числе которых методы определения режимов фактической нагруженности и остаточного ресурса долговечности наиболее сложных дорогостоящих мостовых сооружений.

Проблема повышения нормативных сроков службы, ресурса долговечности мостов, беспрепятственного и безаварийного пропуска по ним тяжёлых подвижных временных нагрузок при современной тенденции возрастания их интенсивности, веса и скоростей движения, внедрения в конструкции пролётных строений (ПС) инновационных высокопрочных материалов становится всё более актуальной задачей (рис. 1) [1–6].



**Рисунок 1.** Поток обращающегося городского транспорта по Дворцовому мосту через реку Неву 90–110 тысяч единиц в сутки (спецтранспорт – 16,9 %, автобусы и троллейбусы – 7,1 % и легковой транспорт – 76,0 %)

Результаты многолетней практики технической диагностики, проводимых исследований и динамических испытаний городских и автодорожных мостов показывают, что динамические воздействия от потоков современного обращающегося транспорта на конструктивные элементы мостов претерпевают качественные изменения, характеризуются уменьшением продолжительности, возрастанием величины, интенсивности и носят случайный нестационарный вероятностный характер [1–3].

Проблемы режимов фактической динамической нагруженности металлических (МТ) и сталежелезобетонных (СТЖБ) пролётных строений (ПС) железнодорожных мостов успешно решаются на протяжении многих десятилетий [1; 4].

Для автодорожных и городских мостов такой прогресс пока не достигнут, а динамическое воздействие при их проектировании отечественными нормами учитывается приближённо посредством эмпирических формул и, как правило, заниженных величин теоретического динамического коэффициента  $(1 + \mu^T)$ ; где  $\mu^T$  – так называемая динамическая «добавка» к коэффициенту, принимаемая в соответствии с действующими откорректированными нормами в зависимости от длины загрузки участков линий влияния проектируемых элементов конструкции ПС. Как показывает практика испытаний эксплуатируемых СТЖБ мостов на величину  $(1 + \mu^T)$  существенно влияют следующие основные факторы: соотношение масс и собственных частот колебаний временной и постоянной нагрузок; величины пролётов и материалы конструкций; условия проезда (высота и периодичность неровностей полотна проезжей части, качество деформационных швов, величина продольных уклонов) и скорости движения транспорта, которые при определении фактической динамической нагруженности и долговечности конструкций СТЖБ ПС необходимо учитывать [1; 2; 7; 8]

## 2. Методы

Расчёт элементов ПС на усталостную прочность, выносливость по действующим нормам производится с учётом использования методики расчёта конструкций железнодорожных мостов без учёта фактической нестационарности процесса нагруженности городских и автодорожных мостов с применением не имеющей экспериментального обоснования корректировкой формулы (1) для определения коэффициента  $\gamma_w$  понижения расчётных сопротивлений элементов конструкций по выносливости [1; 3; 7; 8].

$$\gamma_w = \zeta \cdot \nu [(\alpha \cdot \beta \pm \delta) - (\alpha \cdot \beta \mp \delta) \cdot \rho]^{-1} \leq 1 \quad (1)$$

где  $\zeta$  – коэффициент равный 1,0 для железнодорожных и пешеходных и 0,7 для автодорожных и городских мостов;

$\nu$  – коэффициент, принимаемый для конкретных сталей по действующим нормам

$$\alpha = R \cdot k' / (2\sigma_{-1} - \xi'), \delta = R \cdot k' / (2\delta_B) \quad (2)$$

$\alpha, \delta$  – эмпирические константы, характеризующие материал элементов конструкций;  
 $R$  – расчетное сопротивление материала;  $\sigma_{-1}$  – его предел выносливости при симметричном цикле нагруженности ( $\rho = -1$ );

$\xi'$  – коэффициент режима, определяемый отношением пределов выносливости элемента или соединения в условиях эксплуатации сооружения и при стационарном режиме лабораторных испытаний;

$K'$  – величина рассеяния данных усталостных испытаний;

$\sigma_B$  – предел прочности основного металла;

$\beta$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений;

$\rho$  – коэффициент асимметрии цикла переменных напряжений определяется из соотношений величин напряжений ( $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ).

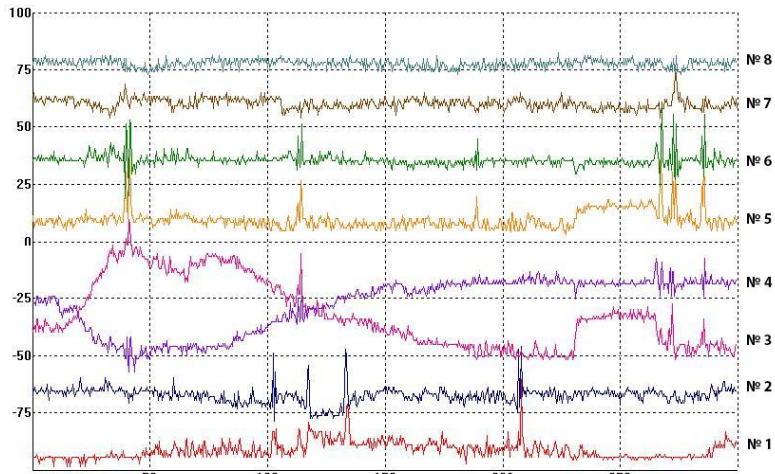
Из равенств (2) видно, что коэффициент  $\alpha$  прямопропорционален отношению расчётного сопротивления стали к её пределу выносливости. Обе эти характеристики так же, как и коэффициент  $K'$ , не зависят от вида подвижной нагрузки. Следовательно, 30 % уменьшения значения  $\alpha$  для автодорожных и городских мостов связано с увеличением коэффициента режима нагруженности  $\xi'$  (2). Увеличение  $\xi'$  для автодорожных и городских мостов ( $\xi' = 1,40 \cdot 1,30 = 1,82$ ) теоретического и экспериментального подтверждения не получило. Для СТЖБ и цельнометаллических мостов  $\xi'$  принимают одинаковыми, хотя преимущества работы СТЖБ конструкций ПС на динамические нагрузки очевидны ввиду их большей постоянной нагрузки и пространственной жёсткости [1; 3; 7].

### 3. Результаты

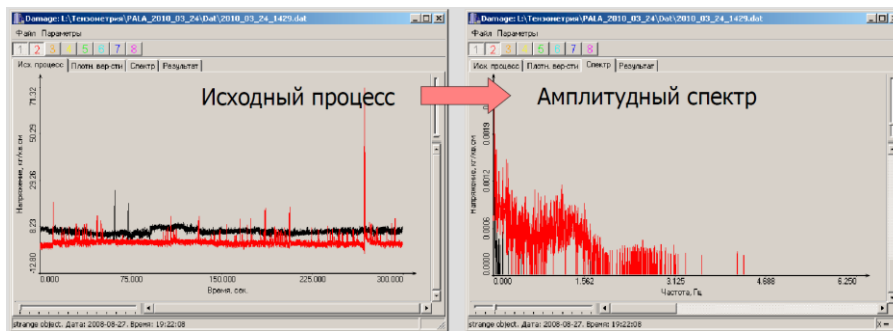
Важные особенности и параметры режимов фактической динамической нагруженности в системе «ПС-обращающаяся нагрузка» установлены на основе статистической обработки и анализа результатов, полученных при динамических испытаниях и экспериментально-теоретических исследованиях эксплуатируемых конструкций СТЖБ ПС городских и автодорожных мостов через реку Неву (Литейный, Благовещенский, Троицкий, Дворцовый), путепроводов на Кронштадской улице, станции Шушары, даче Долгорукова, реки Волхов, Молога, Ветлуга, Ловать, Сясь и др., а также республики Коми РФ (через реки Колву, Вычегду, Мезень, Вымь, Сысолу и др.), которые позволили сделать вывод о том, что физический износ и снижение ресурса долговечности по усталости элементов конструкций СТЖБ ПС в современных условиях реальной нагруженности и условий их содержания происходит быстрее установленных сроков [1–4; 8–10].

На рис. 2–6 приведены примеры реальных спектров вынужденных колебаний напряжений  $\sigma_i(t)$ , частотные и амплитудные составляющие в наиболее нагруженных элементах (командных деталях – КД) ПС мостов, записанные от воздействия обращающихся и испытательных нагрузок.

Нестационарность сложного случайного процесса нагруженности элементов (КД) 2-х стационарных неразрезных ПС – 2х(38,63+47,12) восьмибалочного городского Дворцового моста через реку Неву во времени ( $t$ ) по величинам амплитуд напряжений  $\sigma_i(t)$ , частот вынужденных колебаний ( $\omega_i$ ) и их отношений, средних вероятных значений  $m_i$  и дисперсий  $D_\sigma$  характеризует широкополосный полигармонический и квазистатический, как минимум, двухчастотный процесс фактической нагруженности КД моста (рис. 2, 3). При подобных режимах нагруженности долговечность КД определяется в основном параметрами второй формы колебаний при пульсирующем и знакопеременном режимах с коэффициентами ( $\rho$ ) с учётом собственной массы ПС близких к  $\rho = -0,40 \dots -0,50$ . При подобных высокочастотных колебаниях в металле элементов происходит накопление повреждений, что необходимо учитывать при проектировании и определении долговечности конструкции [2; 3; 11; 12].



**Рисунок 2.** Реальные спектры вынужденных колебаний напряжений  $\sigma(t)$  в элементах стационарного ПС Дворцового моста через реку Неву в продольных и поперечных балках – ЭТД № 1–8 при прохождении по нему реальной эксплуатационной нагрузки



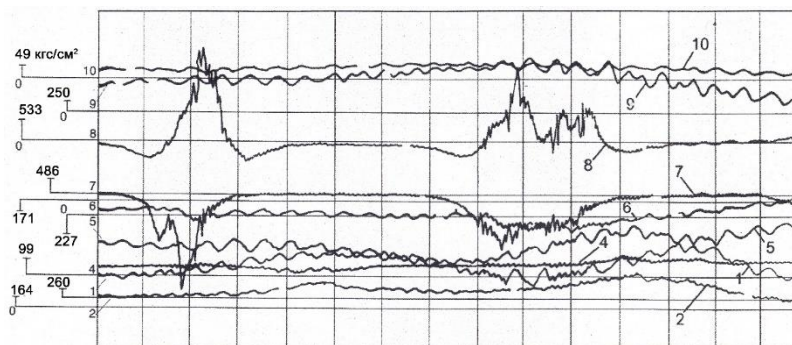
**Рисунок 3** Фрагменты исследуемого процесса нагруженности элемента Дворцового моста: а) исходный спектр; б) амплитудный – энергетический спектр плотности распределения дисперсий напряжений ( $D_\sigma$ ) по частоте ( $\omega_i$ )

Разрезное 2-х балочное с прогоном СТЖБ ПС пролетом  $L = 63,0$  м автодорожного моста через реку Мологу было подвергнуто детальным динамическим испытаниям от воздействия потока временной обращающейся, а также испытательной нагрузки (рис. 5). Анализ графиков колебаний напряжений показал, что вынужденные колебания фактических напряжений в элементах (КД) исследуемых сечений разрезного СТЖБ ПС характеризуются сложными нестационарными процессами. В нижних и верхних поясах главных балок в  $\frac{1}{2} L$  возникают в основном бигармонические колебания.

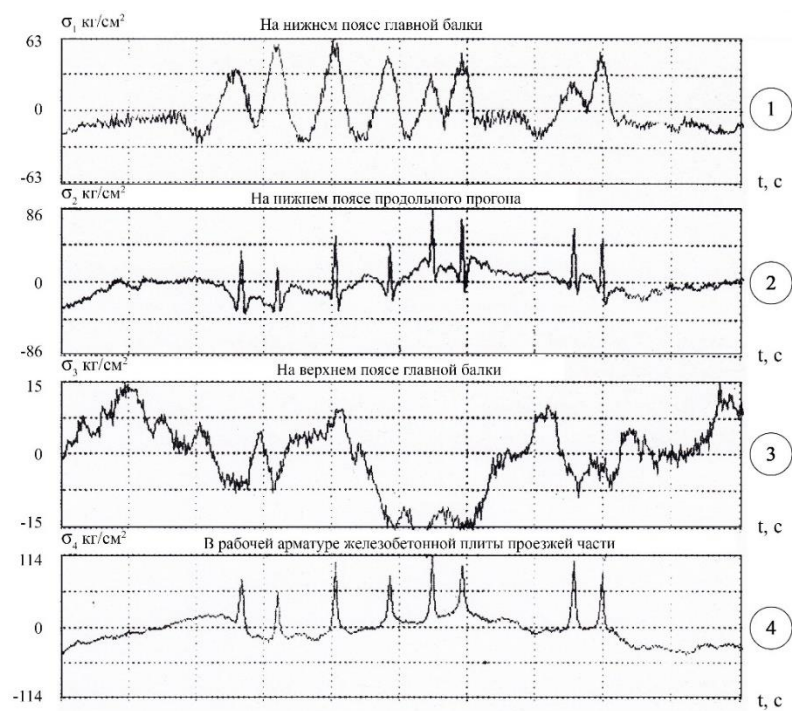


**Рисунок 4.** Динамические испытания процесса нагруженности ПС моста через реку Истра (проезд 6 груженных автомобилей)

Режимы нагруженности продольного прогона (8) и рабочей арматуры железобетонной плиты (7) ПС характеризуются сложными полигармоническими, близкими к резонансным (ударным) колебаниям, особенно в момент прохождения колёс автомобилей непосредственно над исследуемыми элементами, в которых возникают резкие колебания напряжений – биения ( $\sigma_7, \sigma_8$ ). Максимальные амплитудные напряжения  $\sigma_{i,max}(t)$ , возникающие в нижних поясах главных балок, продольном прогоне и в рабочей арматуре железобетонной плиты, достигали 260, 533 и 486,0 кг/см<sup>2</sup> соответственно, которые превышают напряжения, полученные при статических испытаниях ПС той же временной нагрузкой на 50, 60 и 70,0 %, соответственно, следовательно, нормативные значения  $(1 + \mu^T)$  при проектировании СТЖБ ПС принимаются заниженными [7; 13–15].



**Рисунок 5.** Спектры вынужденных колебаний напряжений в элементах автодорожного СТЖБ ПС через реку Мологу при прохождении по нему потоков образующейся нагрузки, в том числе двух КамАЗов (один с прицепом) со скоростью 30 км/ч; ЭТД № 1, 2 и 4 – на нижнем, верхнем поясах главной балки и арматуре железобетонной плиты; № 5, 6 и 9, 10 – на нижних и верхних поясах главных балок; № 7, 8 – на рабочей арматуре железобетонной плиты и нижнем поясе продольного прогона



**Рисунок 6.** Спектры колебаний напряжений  $\sigma_i(t)$  характеризующие фактические режимы нагруженности КД неразрезного 2-х балочного с прогоном СТЖБ ПС (5х63,0 м) моста через реку Колву-IV на автодороге Усинск-Харьяга Республики Коми РФ

Особенности спектров нестационарного фактического режима нагруженности КД элементов автодорожного с продольным прогоном СТЖБ ПС характеризующий бигармонический (1), полигармонический (близкий к ударному – 2), стохастический (3) и бигармонический близкий к резонансному (4) показаны на рис. 6. При подобных режимах особенно в КД элементов 2 и 4 рис. 6 с большими напряжениями, происходит накопление повреждений, что необходимо учитывать при проектировании и определении ресурса моста.

#### 4. Обсуждение

Таким образом, существующие подходы определения фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности СТЖБ ПС эксплуатируемых мостов рассчитанных по методу предельных состояний не позволяют обоснованно оценивать влияние степени их износа, состояния материалов, имеющих дефектов и повреждений на остаточный ресурс конструкций ПС, поскольку не учитывается:

- цикличность нагружения, способствующая росту усталостных повреждений КД;
- нестационарность, вероятностный характер фактического режима нагруженности конструкций ПС под обращающимися нагрузками (рис. 2–6);
- значительно большая, чем базовая ( $2 \times 10^6$  циклов) фактическая нагруженность КД, достигающая 150...250 млн и более циклов;
- качественные изменения характера динамических воздействий на элементы ПС моста (возникновение ударных, резонансных, импульсных процессов нагруженности);
- тенденции снижения массы конструкций СТЖБ ПС и применение материалов повышенной прочности;
- агрессивность воздушной и водной среды.

Таким образом, проведенный анализ позволяет учитывать влияние на размеры ресурса, долговечность конструкций ПС параметры действующего реального режима нагружения, а не виртуальных нагрузок, перспективы роста фактической нагруженности, изменения свойств материалов и конструктивной формы сравниваемых типов ПС, соединений и компоновки сооружения в целом.

Выполненный анализ позволяет также учесть в качестве исходной предпосылки сложности обоснования режима фактической динамической нагруженности конструкций СТЖБ ПС с учётом вышеуказанных факторов, эргодические свойства рассматриваемого реального процесса нагруженности городских и автодорожных мостов, когда каждая реализация случайного процесса достаточной продолжительности может служить материалом для его достоверного описания. Необходима также разработка методики количественного определения ресурса долговечности элементов эксплуатируемых мостов на базе реальных режимов нагруженности эксплуатируемых мостовых сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров В.А. Совершенствование конструкций и расчёта элементов сталежелезобетонных мостов. Л.: Издательство ЛГУ, 1987. 185 с.
2. Научно-технический отчёт «Оценка остаточного ресурса конструкций стационарных пролётных строений Дворцового моста через реку Неву в Санкт-Петербурге». СПб, 2010, С. 112.

3. Novozhilova N., Bystrov V. / Reliability Prediction for Steel Concrete Composite Bridges // Iabse symposium brussels. – 1990. – P. 383–388.
4. Осипов В.О. Долговечность металлических пролётных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов. М.: Транспорт, 1982, 288 с.
5. Быстров В.А., Ярошутин Г.А. «Качество и инновационность проектирования – пути управления безопасностью городских надземных и подземных транспортных сооружений // Вестник гражданских инженеров» СПбГАСУ 2016. № 25 (59), С. 168–172.
6. Bystrov V., Kozak N., Issues and concepts of road transport structures development and provision of traffic and pedestrian safety Transportation Research Procedia 36 (2018) – P. 103–107.
7. Otto, C., Elsmeyer, K. & Lohaus, L., 2018. Temperature Effects on the Fatigue Resistance of High-Strength-Concrete and High-Strength-Grout. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, pp. 1401–1409.
8. Schilling C.G. Impact factors for fatigue design // J. Struct. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1982. Vol. 108, № 9. P. 2034–2044.
9. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417.
10. Tong, L. et al., 2012. Experimental Investigation on Fatigue Behavior of Steel Reinforced Concrete Composite Beam-to-Girder Joints. December 2012, Vol 12, No 4, pp. 461–472.
11. Быстров В.А. Методика определения ресурса конструкций сталежелезобетонных и металлических мостов с их фактической динамической нагруженности и дефектности, «Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры» // Сборник материалов НПК. – СПб. 2019, С. 84–89.
12. YongSheng, S. & YouLiang, D., 2013. Fatigue monitoring and analysis of orthotropic steel deck considering traffic volume and ambient temperature. Science China Technological Sciences Vol.56, pp. 1758–1766.
13. Саламахин П.М. Проблемы совершенствование норм и технологии проектирования автодорожных мостовых сооружений. Вестник мостостроения № 1 / Журнал фонда «Амост» – М., 2010.
14. Wei, X., Xiao, L. & Pei, S., 2017. Experiment Study on Fatigue Performance of Perforated Shear Connectors. International Journal of Steel Structures 17(3), pp. 957–967.
15. Козак Н.В. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм проектирования в области расчетов элементов на выносливость // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): материалы научно-практической конференции – СПб., 2019 – С. 92–96.

**Bystrov Vladimir Apolinaryevich**

Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: bystrov.admt@gmail.com

**Kozak Nikolai Viktorovich**

Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

**Yaroshutin Dmitry Andreevich**

Saint Petersburg state university of architecture and civil engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: yaroshutin@gmail.com

## **Problems of real dynamically loading mode and structure fatigue mode determination in composite steel-concrete city and road bridges**

**Abstract.** The article presents results of the analysis of experimental-theoretical researches and dynamic tests of the composite steel-concrete superstructures of bridges in St. Petersburg, the Leningrad Region and the North-Western region of the Russian Federation. The authors analyzed the theoretical foundations of the coefficient of reduction of the calculated resistances  $\gamma_w$ , the real spectra of the forced vibrations of the most loaded elements, and made recommendations on the need to take into account the parameters that affect the actual dynamic loading and durability of bridge structures.

**Keywords:** steel-concrete; dynamics; fluctuations; stresses; fatigue; defects; spectra; damage; durability

### **REFERENCES**

1. Bystrov V.A. (1987). Sovershenstvovanie konstruktsiy i raschyota ehlementov stalezhelezobetonnykh mostov. [*Improving the design and calculation of steel-reinforced concrete bridge elements.*] Leningrad: Publishing House Leningrad State University, p. 185.
2. (2010). Nauchno-tekhnicheskiy otchyot «Otsenka ostatochnogo resursa konstruktsiy statsionarnykh prolyotnykh stroeniy Dvortsovogo mosta cherez reku Nevu v Sankt-Peterburge». [*Scientific and Technical Report “Estimation of the Residual Resource of Structures of Stationary Span Structures of the Palace Bridge over the Neva River in St. Petersburg”.*] Saint Petersburg, p. 112.
3. Novozhilova N., Bystrov V. (1990). Reliability Prediction for Steel Concrete Composite Bridges. *Iabse symposiym brussels*, pp. 383–388 (in Russian).
4. Osipov V.O. (1982). Dolgovechnost' metallicheskiykh prolyotnykh stroeniy ehkspluatiruemykh zheleznodorozhnykh mostov. [*Durability of metal spans of operated railway bridges.*] Moscow: Transport, p. 288.
5. Bystrov V.A., Yaroshutin G.A. (2016). Quality and innovative design – ways to manage the safety of urban above-ground and underground transport structures. *Bulletin of Civil Engineers*, 25(59), pp. 168–172 (in Russian).
6. Bystrov V., Kozak N. (2018). Issues and concepts of road transport structures development and provision of traffic and pedestrian safety Transportation Research Procedia, 36, pp. 103–107.

7. Otto C., Elsmeyer K., Lohaus L. (2018). Temperature Effects on the Fatigue Resistance of High-Strength-Concrete and High-Strength-Grout. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, pp. 1401–1409.
8. Schilling C.G. (1982). Impact factors for fatigue design. *J. Struct. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 3(108), pp. 2034–2044.
9. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/13TS417.
10. Tong L. and etc. (2012). Experimental Investigation on Fatigue Behavior of Steel Reinforced Concrete Composite Beam-to-Girder Joints, 4(12), pp. 461–472.
11. Bystrov V.A. (2019). Metodika opredeleniya resursa konstruksiy stalezhelezobetonnykh i metallicheskih mostov s ikh fakticheskoy dinamicheskoy nagruzhennosti i defektnosti, «Innovatsii i dolgovechnost' ob"ektov transportnoy infrastruktury». [*Methodology for determining the resource of steel-reinforced concrete and metal bridge structures with their actual dynamic loading and defectiveness, "Innovation and durability of transport infrastructure facilities"*.] Saint Petersburg, pp. 84–89.
12. YongSheng S., YouLiang D. (2013). Fatigue monitoring and analysis of orthotropic steel deck considering traffic volume and ambient temperature. *Science China Technological Sciences*, 56, pp. 1758–1766.
13. Salamakhin P.M. (2010). Problems improving standards and design technology for road bridge structures. *Bridge Construction Bulletin No. 1. A most Foundation Magazine*. (in Russian).
14. Wei X., Xiao L., Pei S. (2017). Experiment Study on Fatigue Performance of Perforated Shear Connectors. *International Journal of Steel Structures*, 17(3), pp. 957–967.
15. Kozak N.V. (2019). Sravnitel'nyy analiz otechestvennykh i zarubezhnykh norm proektirovaniya v oblasti raschetov ehlementov na vynoslivost'. [*Comparative analysis of domestic and foreign design standards in the field of endurance element calculations*.] Saint Petersburg, pp. 92–96.