

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 3 / 2023, Vol. 10, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS323.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS323 (<https://doi.org/10.15862/07SATS323>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

Анализ влияния отказов элементов объединения на эксплуатационную надежность сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов

Козак Н.В., Сырков А.В., Быстров В.А., Ярошутин Д.А.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Козак Николай Викторович, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы влияния отказов элементов объединения, в частности гибких штыревых упоров, на эксплуатационную надежность сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов. Авторами сформулированы возможные критерии отказа пролетного строения как по первой, так и по второй группам предельных состояний, а также разработаны сценарии исключения элементов объединения из работы конструкций, моделирующие отказ отдельных элементов объединения в процессе эксплуатации. Для пяти конечно-элементных моделей сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов проведен численный эксперимент по моделированию исключения элементов объединения из работы конструкции. Результаты расчета по каждому сценарию и по частичным уровням реализации сценария проанализированы с точки зрения возможных отказов конструкции пролетного строения в целом. Результаты численного эксперимента показали, что при исключении отдельной небольшой группы элементов объединения

максимальные напряжения в надпорных сечениях балок увеличиваются на величину до 3 %, а дальнейшее развитие сценария отключения элементов объединения может привести к увеличению напряжений на 20 %. Сделан вывод, что для существующих сталежелезобетонных пролетных строений риск отказа пролетных строений в условиях нормальной эксплуатации по причине исключения из работы элементов объединения не высок, даже при практически маловероятном полном исключении из работы всех элементов объединения. Тем не менее, исключение из работы элементов объединения может быть более критичным в случаях нештатной эксплуатации мостового сооружения или в случаях значительно меньших инженерных запасов конструкции по прочности и жесткости.

Ключевые слова: мост; пролетное строение; сталежелезобетон; элемент объединения; гибкий штыревой упор; надежность; отказ; усталость; выносливость

Influence analysis of the connective elements failures on the road bridges steel reinforced superstructures service reliability

Nikolai V. Kozak, Anton V. Syrkov, Vladimir A. Bystrov, Dmitry A. Yaroshutin

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Nikolai V. Kozak, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Abstract. The paper considers the influence issues of connective elements failures, in particular flexible pin stops, on the road bridges steel reinforced superstructures service reliability. The authors have formulated possible criteria for the superstructure failure both for the first and the second groups of limit states, and also developed scenarios of connective elements exclusion from the structures operation, that are modeling the failure of individual connective elements in the operation process. For five finite element models of road bridges steel reinforced superstructures a numerical experiment on modeling of the connective elements exclusion from the operation of the structure was carried out. The calculation results for each scenario and for the partial scenario realization levels were analyzed in terms of possible superstructures failures as a whole. Numerical experiment results have shown that at the exclusion of a separate small group of connective elements increases the

maximum stresses in the over-supported beams sections by up to 3 %, and further development of the connective elements disconnection scenario can lead to an increase in stresses by 20 %. It is concluded that for existing steel reinforced superstructures the risk of superstructures failure under normal operating conditions due to disconnection of connective elements is low, even in the case of almost unlikely complete disconnection of all connective elements. Nevertheless, the exclusion from operation of connective elements may be more critical in cases of abnormal bridge structure operation or in cases of significantly lower engineering reserves of the structure in terms of strength and stiffness.

Keywords: bridge; superstructure; steel reinforced; connective element; flexible pin stop; reliability; failure; fatigue; endurance

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Надежность является одним из важнейших свойств автодорожных мостов ввиду степени их ответственности и стратегического значения для транспортной системы. Последние исследования мировой статистики отказов показывают, что существует тенденция к росту обрушений эксплуатируемых мостов вследствие их износа, в том числе усталостных дефектов [1–4]. Отличительной особенностью условий работы мостовых конструкций является нестационарный динамический характер их режима нагружения. В подобных режимах эксплуатации, включающих большое количество циклов изменения усилий и напряжений в элементах, значительную роль в формировании отказа играет выносливость элементов конструкций, вопросы определения которой исследованы в значительно меньшей степени, чем вопросы прочности.

В целом для пролетных строений тема связи выносливости элементов конструкций и общей надёжности исследована в достаточной мере; в работах [5–9], а также в учебном пособии¹ были приведены результаты исследований влияния выносливости главных несущих элементов на надежность пролетного строения. Во всех этих работах рассматривалась ситуация, при которой отказ элемента ввиду истощения его выносливости приводил к отказу всей системы по критерию первой группы предельных состояний (I ПГС или ULS — Ultimate Limit State).

В то же время, для конструкций сталежелезобетонных пролетных строений, получивших значительное распространение в настоящее время, одним из наименее исследованных является вопрос выносливости элементов объединения стальных балок и железобетонной плиты. Результаты проведенных авторами натурных экспериментов показали, что элементы объединения сталежелезобетонных пролетных строений мостов в действительности находятся в сложных условиях эксплуатации с большим количеством циклов изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) [10]. В подобных условиях работы вполне вероятным является отказ элементов ввиду накопления ими усталостных повреждений.

Очевидно, что отказ отдельных элементов объединения (не в массовом порядке) не может привести к разрушению пролетного строения. Тем не менее, был отмечен целый ряд случаев отказов пролетных строений по второй группе предельных состояний (II ПГС или SLS — Serviceability

¹ Новожилова Н.И. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов: Учебное пособие с элементами УИРС / Н.И. Новожилова, В.А. Быстров, В.Л. Шайкевич. — Ленинград: Ленинградский инженерно-строительный институт, 1989. — 96 с.

Limit State), выраженный в значительном увеличении провисаний (от собственного веса) и прогибов (от временной нагрузки) конструкций, что делает невозможной нормальную эксплуатацию моста [11–13]. Кроме того, в 2015 в г. Вельск произошло обрушение разрезного сталежелезобетонного пролетного строения моста через реку Вага² (рис. 1); одной из вероятных причин данной аварии было обозначено именно выключение из работы (отказ) элементов объединения.



*Рисунок 1. Обрушившееся пролетное строение моста
через реку Вага (источник: <https://www.drive2.ru/c/2440599/>)³*

*Figure 1. Collapsed bridge superstructure over
the Vaga River (source: <https://www.drive2.ru/c/2440599/>)*

В ходе анализа возможных причин данных отказов было отмечено, что вероятной причиной является значительное снижение жёсткости или полное разрушение элементов объединения, влекущее за собой увеличение погонной податливости связи между плитой и балкой, и, как следствие, общее снижение жесткости сечения [14; 15].

С учетом того, что ремонт элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений сверхтрудозатратен и дорог (необходим демонтаж мостового полотна и плиты пролетного строения), вопрос надежности сталежелезобетонных пролетных строений, как минимум по критерию их жесткости (II ПГС или SLS), является крайне актуальным с точки зрения эксплуатации мостов. В данной работе авторами проведено исследование влияния возможных отказов элементов объединения из-за накопления ими усталостных повреждений на надежность сталежелезобетонных строений в целом.

² В Вельске обрушился автомобильный мост (ФОТО) [Электронный ресурс]. — URL: http://www.severinform.ru/lenta/?full_id=235385 (дата обращения: 13.07.2023).

³ Обрушение моста в Вельске через реку Вага 21 октября 2015 г. Понтонный мост — сообщение налажено [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.drive2.ru/c/2440599/> (дата обращения: 13.07.2023).

Методы

Methods

Критерии безотказности

Reliability criterion

В общем случае элементы объединения балок и плиты сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов располагаются по всей длине пролётного строения, и, таким образом, для дальнейшего анализа важным представляется вопрос определения наиболее уязвимых к отказу деталей из группы идентичных («командных деталей», или КД). На данном этапе исследования будет рассмотрен вопрос определения КД среди элементов объединения, исходя из критерия общей безотказности пролетного строения, а также вопрос оценки рисков отказа пролетного строения в зависимости от рисков отказов гибких штыревых упоров.

Как и для любой другой конструкции, отказ элемента объединения можно рассматривать по различным критериям. В рамках текущего исследования авторами было принято решение рассматривать отказ элемента объединения по критерию усталостного разрушения (в зарубежной литературе выделяется в отдельное предельное состояние Fatigue Limit State, FLS). Разрушение по критерию прочности (I ПГС или ULS) в реальной конструкции в условиях отсутствия серьезных проектных ошибок или строительного брака маловероятен. Отказы по критерию снижения жёсткости (II ПГС или SLS) вследствие накопления микрповреждений (в т. ч. усталостного характера) является перспективным направлением исследований, однако требуют значительно больших объемов лабораторных исследований и поэтому были запланированы на будущие этапы.

Условие отказа элемента объединения по FLS может быть в первом приближении представлено в виде формулы (1):

$$D - D_{lim} \geq 0, \quad (1)$$

где D — накопленное повреждение, вычисляемое по формуле (2), а D_{lim} — повреждение, соответствующее отказу элемента, в общем случае может быть принятое как $D_{lim} = 1$.

$$D = \sum_a \frac{n_{a,i}}{N_{a,i}}, \quad (2)$$

где a — спектр возможных значений характеристики режима нагружения; $n_{a,i}$ — количество полных циклов величины a_i из набора спектра a ; $N_{a,i}$ — абсцисса кривой усталости для ординаты a_i из набора спектра a .

Исследование проводится в рамках гипотезы, что отказ некоторого набора элементов объединения (по критерию FLS) вызовет отказ пролетного строения в целом по чрезмерным прогибам (по критерию II ПГС или SLS) или по условию прочности (критерий I ПГС или ULS). Условия отказа по II ПГС приведены в формуле (3), по I ПГС — в формуле (4).

$$K_{d,LL} = \frac{d_{LL,j}}{l_j} \geq [K_{d,LL}], \quad (3)$$

где $d_{LL,j}$ — максимальный прогиб в j пролете от временной нагрузки; l_j — длина j пролета; $[K_{d,LL}]$ — предельное соотношение; в соответствии с требованиями норм проектирования России может быть принято как $[K_{d,LL}] = 1/400$.

$$\sigma_{tot,j} \geq R_y, \quad (4)$$

где $\sigma_{tot,j}$ — максимальные нормальные напряжения в стальной балке пролетного строения в j пролете от полной нагрузки; R_y — расчетное сопротивление стали.

Численный эксперимент

Numerical experiment

Для моделирования отказов был выбран набор из 5 пролетных строений автодорожных мостов, включающих в себя 4 пролетных строения существующих мостов в России и 1 пролетное строение из пособия к Еврокоду.⁴ Краткие характеристики пролетных строений приведены в таблице 1; красной обводкой на поперечном сечении в таблице обозначены исследуемые в данном исследовании главные балки.

Во всех пролетных строениях для объединения стальных балок и железобетонной плиты использовались гибкие штыревые упоры: из стали 09Г2С $d = 22$ мм $h = 180$ мм для объектов 1–4; из стали S235J2G3 $d = 22$ мм $h = 200$ мм для объекта 5.

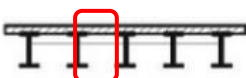
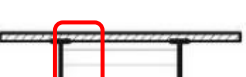
Для анализа пролетных строений были разработаны конечно-элементные (КЭ) модели в расчетном комплексе SOFiSTiK, причем использовался плитно-стержневой метод построения, связь между плитой и балками моделировалась с использованием упругих связей жёсткостью 270 000 кН/м для моделей 1–4 и 290 000 кН/м для модели 5.

⁴ Bridge design to Eurocodes: worked examples. — LU: Publications Office, 2012. — 438 p.

Таблица 1 / Table 1

Краткие характеристики пролетных строений набора мостов

Brief superstructure characteristics of bridge set

№ SS	Статическая схема моста Bridge static scheme	Поперечное сечение Cross section	Нормы и материал Standards and material
SS1	32,6 + 3x33 + 32,6		СП ⁵ / SP 15XCHД / 15XCHД B40 / B40
SS2	20 + 32 + 24 + 20		
SS3	44,4 + 45 + 29 + 29,9		
SS4	53,5 + 72 + 53,5		
SS5	60 + 80 + 60		EN ^{6, 7, 8} S355 C45/45

Составлена авторами / Compiled by the authors

Расчетные модели были проанализированы на воздействие подвижной нагрузки A14 из СП 35.13330.2011. Визуализации моделей приведены на рисунке 2.

На рисунке 3 приведены характерные огибающие эпюры максимальных положительных и отрицательных сдвигающих усилий на элементы объединения (ЭО).

На рисунке отдельно выделены зоны, в которых наиболее вероятны отказы элементов объединения: серым цветом — зоны максимальных сдвигающих усилий; красным цветом — зоны с наиболее неблагоприятным знакопеременным режимом работы ($\rho = T_{\min} / T_{\max} < 0$).

⁵ СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями N 1, 2) / СПб: Кодекс, 2001. — 1 электрон. носитель. — 2011.

⁶ EN 1990 (2002) (English): Eurocode — Basis of structural design.

⁷ EN 1993-2 (2006) (English): Eurocode 3: Design of steel structures — Part 2: Steel bridges.

⁸ EN 1994-2 (2005) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures — Part 2: General rules and rules for bridges.

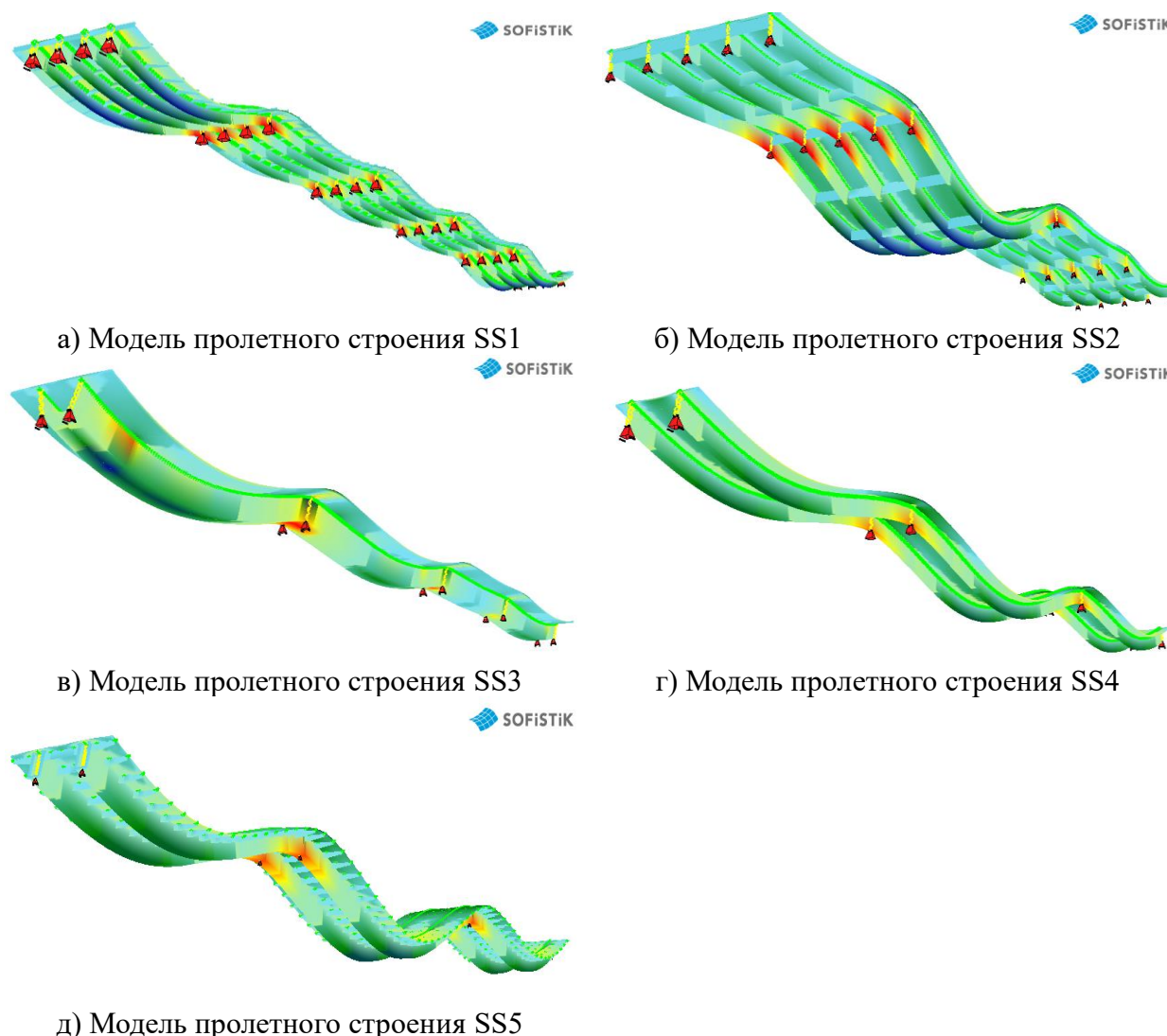


Рисунок 2. Визуализация расчетных моделей (разработан авторами)

Figure 2. Renderers of the calculation models (developed by the authors)

Очевидно, что отказ одного элемента объединения вряд ли серьезно повлияет на жесткость пролетного строения, поэтому для моделирования отказов использовались группы элементов.

Были рассмотрены 3 основных сценария возникновения отказа пролетного строения: из-за отказов элементов объединения над опорами (наибольшие напряжения), из-за отказов элементов объединения в пролетах (работа в условиях асимметричного цикла с $\rho < 0$) и комбинация выше обозначенных сценариев.

В таблице 2 приведены выделенные группы и критерии их выделения, в таблице 3 — основные возможные сценарии и соответствующие расчетные комбинации исключения групп элементов объединения из работы пролетного строения.

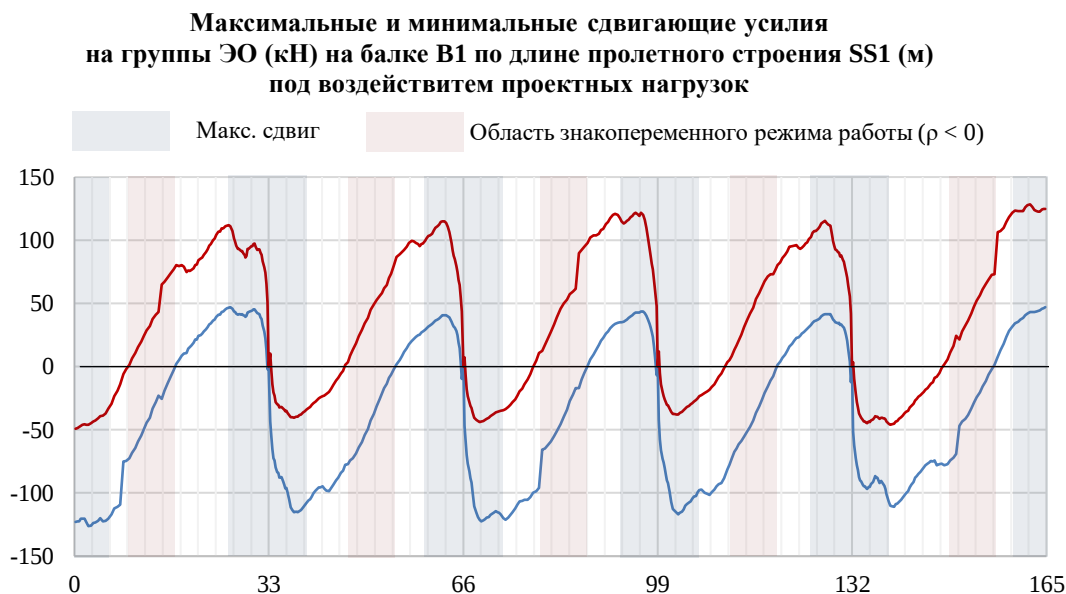


Рисунок 3. Пример огибающей эпюры сдвигающих усилий (кН)
на группы элементов объединения (пролетное строение SS1) (разработан авторами)

Figure 3. Example of shear forces envelop epure (кN)
on connective elements groups (span SS1) (developed by the authors)

Таблица 2 / Table 2

Группы элементов объединения (GS) и границы их включения
Groups of connective elements (GS) and their inclusion boundaries

№ GS	Зона Area	Границы включения Inclusion boundaries
GC 1-1	Концевая опора / Abutment	[0...10] % L_1
GC 1-2	Концевая опора / Abutment	(10...20] % L_1
GC 1-3	Концевая опора / Abutment	(20...30] % L_1
GC 2-1	Промежуточная опора / Pier	[-5...5] % L_2
GC 2-2	Промежуточная опора / Pier	[-15...-5)U(5...15] % L_2
GC 2-3	Промежуточная опора / Pier	[-30...-15)U(15...30] % L_2
GS 3-1	½ центрального пролета / ½ of center span	[45...55] % L_2
	40 % крайнего пролета / 40 % of the end span	[35...45] % L_1
GS 3-2	½ центрального пролета / ½ of center span	[35...45)U(55...65] % L_2
	40 % крайнего пролета / 40 % of the end span	[30...35)U(45...55] % L_1
GS 3-3	½ центрального пролета / ½ of center span	(30...35)U(65...70] % L_2
	40 % крайнего пролета / 40 % of the end span	(55...70) % L_1

Составлена авторами / Compiled by the authors

По результатам расчетов для анализа выводились огибающие эпюры по максимальным прогибам и напряжениям.

Обозначенные выше 5 моделей пролетных строений были проанализированы на воздействие подвижных нагрузок А14 (СП 35.13330.2011) с учетом исключения групп элементов по 16 расчетным комбинациям.

Таблица 3 / Table 3

Сценарии и расчетные комбинации исключения групп элементов объединения
Scenarios and calculation combinations for the exclusion of connective elements groups

Название Name	Сценарий и подсценарий Scenario and sub-scenario		Описание сценария Scenario description	Уровень Level	Исключаемые группы элементов объединения Exclusion groups of connective elements
Level 1	О		Исправное In working order	1	-
A1 2	А	A1	Отключение над концевыми опорами Disconnection above abutment	2	GS 1-1
A1 3				3	GS 1-1, 1-2
A1 4				4	GS 1-1, 1-2, 1-3
A2 2		A2	Отключение над промежуточными опорами Disconnection above pier	2	GS 2-1
A2 3				3	GS 2-1, 2-2
A2 4				4	GS 2-1, 2-2, 2-3
A3 2		A3	Отключение над всеми опорами Disconnection above all superstructure	2	GS 1-1, 2-1
A3 3				3	GS 1-1, 2-1, 1-2, 2-2
A3 4				4	GS 1-1, 2-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3
B 2		В	Отключение в пролетах Disconnection in spans	2	GS 3-1
B 3				3	GS 3-1, 3-2
B 4				4	GS 3-1, 3-2, 3-3
C 2	С		Отключение над опорами и в пролетах Disconnection above the superstructure and in the spans	2	GS 1-1, 2-1, 3-1
C 3				3	GS 1-1, 2-1, 3-1, 1-2, 2-2, 3-2
C 4				4	Все / All

Составлена авторами / Compiled by the authors

Кроме того, для анализа также были построены эпюры дополнительных вертикальных перемещений (провисаний) от собственного веса конструкций.

Результаты

Results

Характерные результаты для одного из пролетных строений (SS1)

Characteristic results for one of the superstructure (SS1)

На рисунках 4, 5 приведены характерные огибающие эпюры максимальных и минимальных перемещений и напряжений для балки В1 пролетного строения SS1 при крайних уровнях сценариев; на рисунке 6 — диаграммы изменения напряжений в зависимости от уровня развития сценария (подсценарии А1 и А2 на графиках и диаграммах не приведены как не определяющие). Красными штрихпунктирными линиями на рисунках 5, 6, 8–10 приведены предельные значения в соответствии с условиями (3), (4).

На рисунке 7 приведена эпюра дополнительных вертикальных перемещений (провисаний) от собственного веса конструкций в зависимости от сценария (приведены результаты для последних уровней).

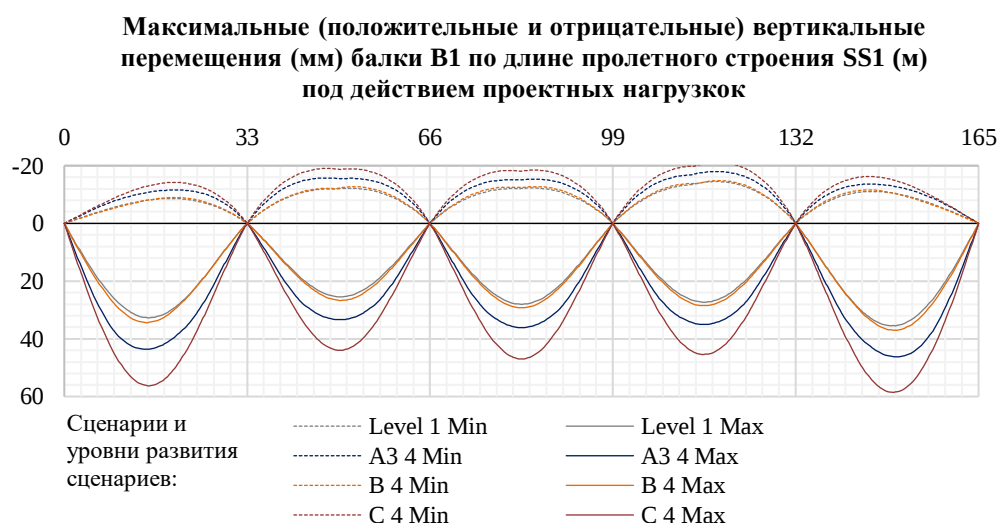


Рисунок 4. Огибающие эпюры максимальных прогибов от временной нагрузки для B1 SS1 при крайних уровнях различных сценариев (разработаны авторами)

Figure 4. Envelop epure of maximum deflections from temporary loading for B1 SS1 at extreme levels of different scenarios (developed by the authors)

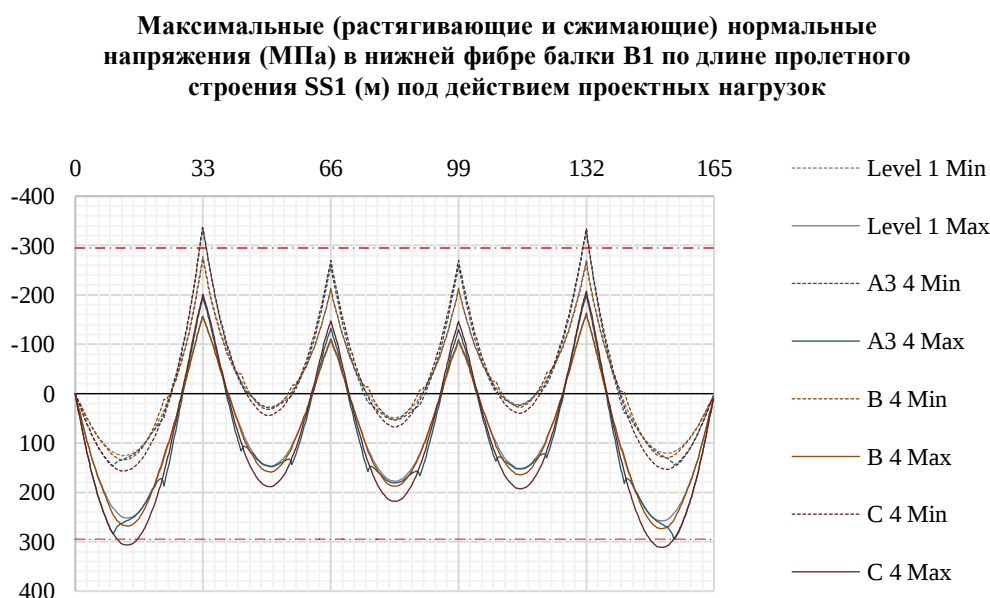


Рисунок 5. Огибающие эпюры нормальных напряжений от временной нагрузки для B1 SS1 при крайних уровнях различных сценариев (разработан авторами)

Figure 5. Envelop epure of normal stresses from temporary loading for B1 SS1 at extreme levels of different scenarios (developed by the authors)

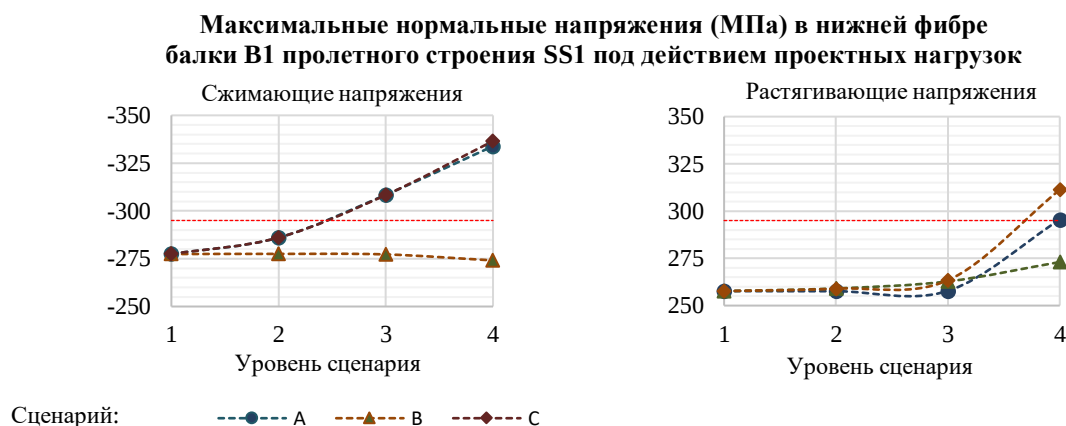


Рисунок 6. Диаграммы изменения нормальных напряжений в нижней фибре балки B1 SS1 в зависимости от уровня развития сценария (разработаны авторами)

Figure 6. Variation diagrams of normal stresses in the bottom fiber of the B1 SS1 beam depending on the scenario level development (developed by the authors)

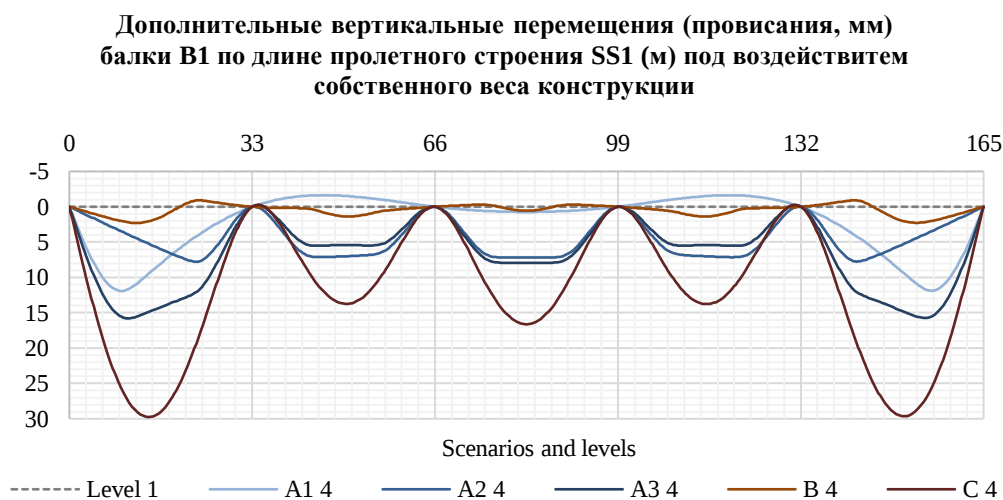


Рисунок 7. Эпюра дополнительных вертикальных перемещений (провисаний) для B1 SS1 для различных сценариев (разработана авторами)

Figure 7. Additional vertical displacements epure (dip) for B1 SS1 for different scenarios (developed by the authors)

Сводные результаты для 5 пролетных строений

Summary results for 5 superstructure

На рисунке 8 приведена сводная гистограмма для все 5 пролётных строений, показывающая, как изменяется величина коэффициента $K_{d,LL}$ (см. формулу 3) в зависимости от сценария отключения упоров из работы (приведены результаты для последнего уровня).

На рисунках 9 и 10 приведены сводные гистограммы для всех пролетных строений, отображающие изменения максимальных напряжений в нижней фибре главных балок пролетных строений в зависимости от сценария и уровня отключения упоров из работы (подсценарии A1 и A2 на графиках и диаграммах не приведены как не определяющие).

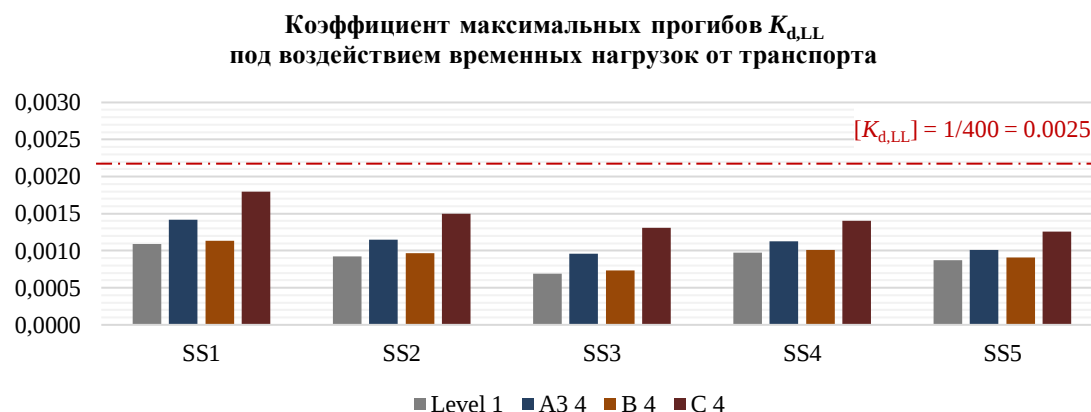


Рисунок 8. Гистограмма изменения коэффициента $K_{d,LL}$ для максимальных прогибов балок пролетных строений SS1-SS5 в зависимости от сценария (разработана авторами)

Figure 8. Histogram of variation of $K_{d,LL}$ coefficient for maximum deflections of SS1-SS5 superstructures depending on the scenario (developed by the authors)

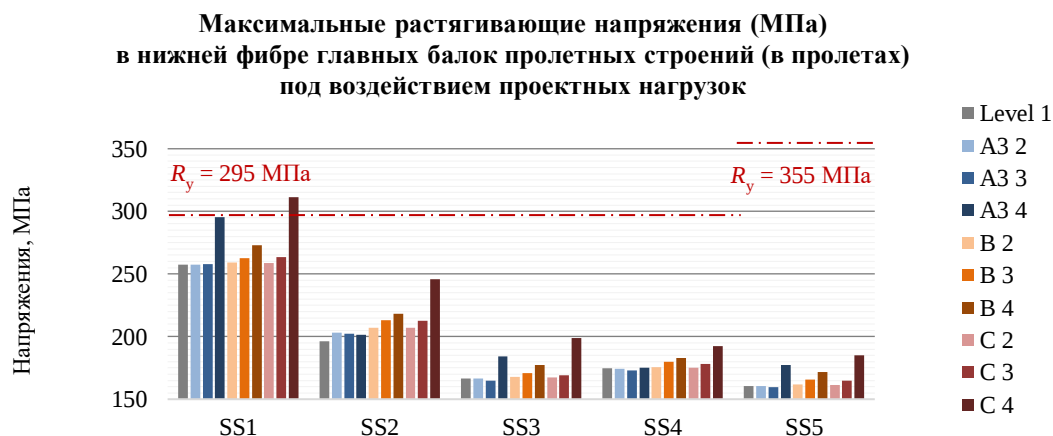


Рисунок 9. Гистограмма изменения максимальных сжимающих напряжений в зависимости от сценария и уровня (разработана авторами)

Figure 9. Histogram of variation of maximum compression stresses depending on the scenario and level (developed by the authors)

На рисунке 11 приведена сводная гистограмма дополнительных вертикальных перемещений (провисаний) для последних уровней различных сценариев.

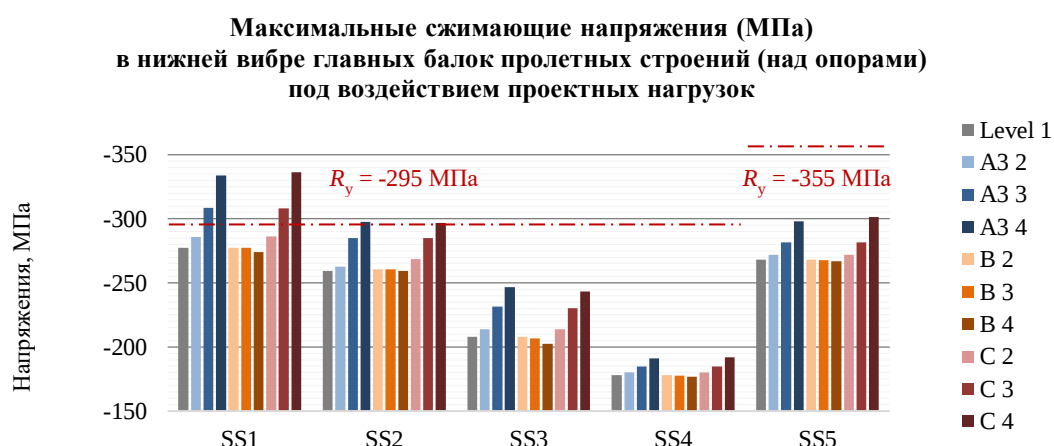


Рисунок 10. Гистограмма изменения максимальных растягивающих напряжений в зависимости от сценария и уровня (разработана авторами)

Figure 10. Histogram of maximum tensile stress variation depending on the scenario and level (developed by the authors)

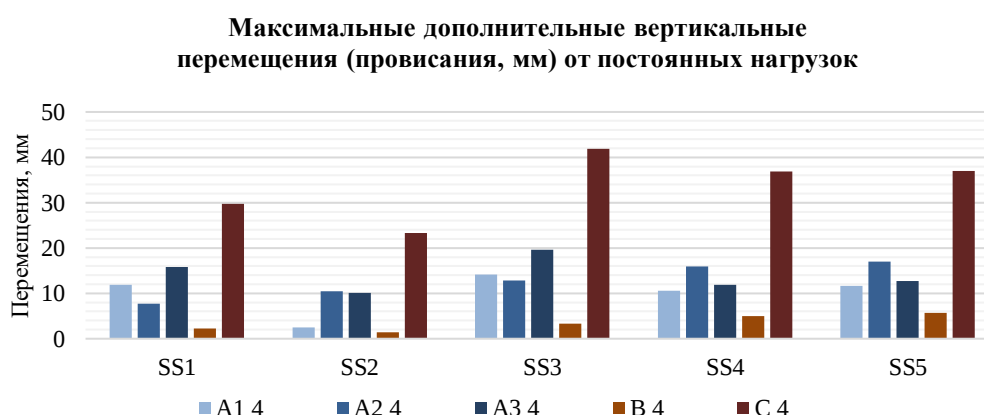


Рисунок 11. Гистограмма дополнительных вертикальных перемещений (провисаний) в зависимости от сценария и уровня (разработана авторами)

Figure 11. Histogram of additional vertical displacements (dip) depending on the scenario and level (developed by the authors)

Обсуждение

Discussion

1. В целом отмечено, что из рассмотренных наиболее «опасными» являются сценарии А3 и С, последние уровни, реализации которых приводят к резкому увеличению контролируемых параметров (рис. 8–11).

2. Для всех рассмотренных конструкций и всех сценариев исключения элементов объединения из работы отказа по II ГПС (формула 3) отмечено не было (рис. 8). Однако, необходимо отметить в целом значительное увеличение прогибов конструкций. Полное отключение упоров над опорами (сценарий А3) приводит к увеличению

прогибов на 16...38 %, а полное отключение упоров по всей длине конструкции (сценарий С) приводит к увеличению прогибов на 65...89 %.

3. Для некоторых рассмотренных конструкций (SS1 и SS2) и сценариев исключения элементов объединения из работы (А3: 3,4 и С: 3,4) был отмечен отказ по I ГПС (формула 4, рисунки 9–11). В относительных величинах увеличение напряжений в конструкции не было значительным (до 20 % при отключении упоров над опорами по сценарию А3; до 25 % при полном исключении упоров из работы по сценарию С), однако в ряде случаев расчетные напряжения оказались близки или превысили предельные. Для SS1 расчетные напряжения на последнем уровне развития сценария А3 над промежуточной опорой достигли 334 МПа при исходных 277 МПа.

4. Анализ динамики изменения растягивающих (в пролете) и сжимающих (над опорой) напряжений в нижней фибре главной балки показал, что большей чувствительностью к исключению из работы надопорных упоров (сценарий А3) характеризуется надопорное сечение (рис. 12); исключение из работы упоров в середине пролетов (сценарий В) оказывает влияние на увеличение растягивающих напряжений в середине пролетов, в то время как сжимающие напряжения в нижних фибрах над опорой практически не изменяются или даже немного уменьшаются.

5. Исключение из работы элементов объединения также оказывает влияние на провисание конструкций под воздействием собственного веса.

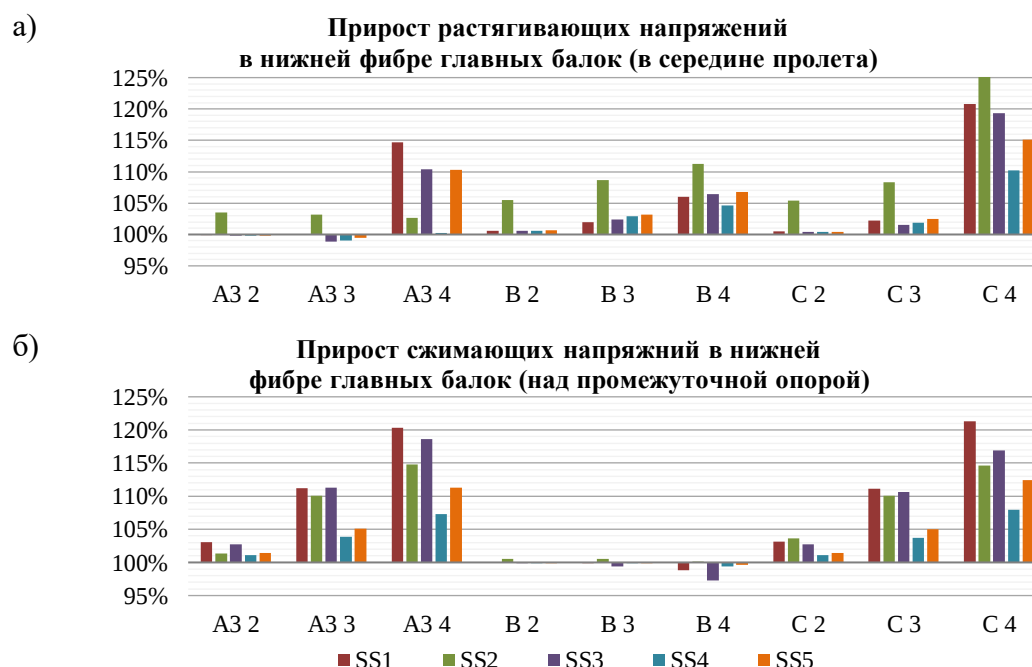


Рисунок 12. Прирост максимальных величин растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений в зависимости от уровня и сценария (разработано авторами)

Figure 12. Incremental maximum tensile (a) and compressive (b) stresses depending on the level and scenario (developed by the authors)

В сценариях исключения из работы упоров над опорами (A1, A2, A3) величины дополнительного провисания для рассмотренных конструкций составляют до 20 мм, а в случае исключения всех упоров (сценарий C) — до 42 мм. На рисунке 13 приведена гистограмма изменения коэффициента $K_{d,DL}$, отображающего соотношение провисания к расчетной длине пролета максимального провисания (аналогично $K_{d,LL}$, формула 3).

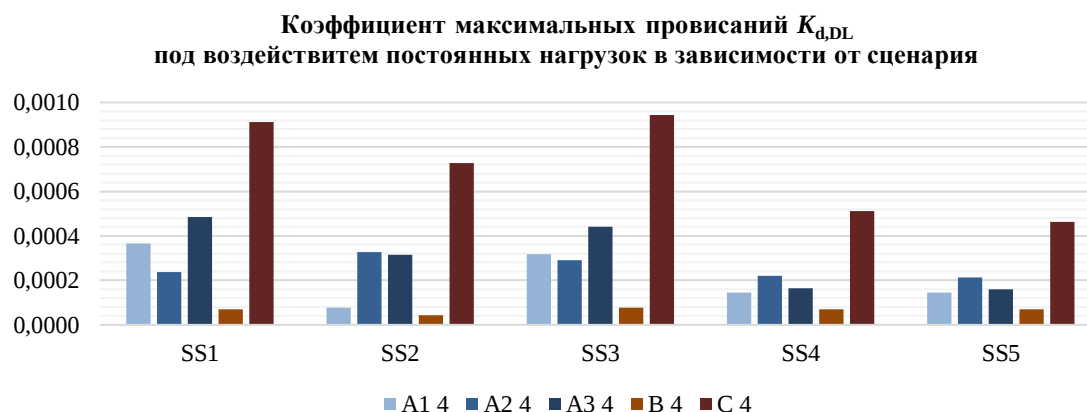


Рисунок 13. Гистограмма изменения коэффициента $K_{d,DL}$ для провисаний балок пролетных строений SS1-SS5 в зависимости от сценария (разработано авторами)

Figure 13. Histogram of variation of $K_{d,DL}$ coefficient for dipping of SS1-SS5 superstructures depending on the scenario (developed by the authors)

6. По результатам сравнительного анализа результатов моделирования исключения из работы упоров по сценариям A1 и A2 (упоры над крайними опорами и над промежуточными соответственно) можно сделать вывод, что определяющий (наиболее «опасный») сценарий из данных двух зависит от конструктивных особенностей пролетного строения. Моделирование сценария A3 в большинстве случаев обеспечивает величины контролируемых параметров чуть выше величин, получаемых при определяющем сценарии из A1 и A2, однако в частных случаях наблюдается эффект «разгрузки» и уменьшение величины контролируемого параметра. Сценарий B по результатам сравнительного анализа в целом представляется наименее опасным с точки зрения общей эксплуатационной надежности конструкции.

Заключение

Conclusion

Проведенный анализ показал, что для существующих сталежелезобетонных пролётных строений (на базе набора в 5 объектов) риск отказа пролетных строений в условиях нормальной эксплуатации по причине исключения из работы элементов объединения невысок, даже при практически невероятном полном исключении из работы всех элементов

объединения. Тем не менее, исключение из работы элементов объединения может быть более критичным в случаях наличия проектных ошибок, строительного брака, нештатной эксплуатации мостового сооружения или в случаях значительно меньших инженерных запасов конструкции по прочности и жесткости. Как показал численный эксперимент, даже при исключении отдельной небольшой группы упоров над опорами приводит к увеличению максимальных напряжений в надопорных сечениях балок на 3 %, а дальнейшее развитие сценария может привести к увеличению напряжений на 20 %. Таким образом, по результатам исследования подтверждается важность изучения вопроса влияния состояния элементов объединения на общую эксплуатационную надежность сталежелезобетонных пролетных строений.

В дальнейшем предполагается развивать данное исследование в направлении количественного анализа возможных рисков отказов пролетных строений по данным сценариям, а также в направлении уточнения модели исключения элементов объединения из работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Syrkov, A.** Enhancing of Bridge Management Given Failures Data / A. Syrkov. — DOI <https://doi.org/10.2749/wroclaw.2020.1173> // Synergy of Culture and Civil Engineering — History and Challenges, Wrocław, Poland, 7–9 October 2020 / Цюрих: IABSE, 2020. — С. 1173–1180. — URL: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/enhancing-of-bridge-management-given-failures-data>. (дата обращения: 01.06.2023).
2. **Syrkov, A.** Bridge failures analysis as a risk mitigating tool / A. Syrkov, N. P. Høj. — DOI <https://doi.org/10.2749/guimaraes.2019.0304> // Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management, Guimarães, Portugal, 27–29 March 2019 / Цюрих: IABSE, 2019. — С. 304–310. — URL: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/bridge-failures-analysis-as-a-risk-mitigating-tool>. (дата обращения: 01.06.2023).
3. **Akesson, B.** Understanding Bridge Collapses / B. Akesson. — Лондон: Taylor & Francis, 2008. — 266 с.
4. **C. Crawford K.** Perspective Chapter: Bridge Deterioration and Failures / K. Crawford C. — DOI <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109927> // Failure Analysis — Structural Health Monitoring of Structure and Infrastructure Components / IntechOpen, 2023. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85946>. (дата обращения: 01.06.2023).
5. **Zhang, G.** Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review / G. Zhang, Y. Liu, J. Liu, S. Lan, J. Yang. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003> // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). — 2022. — Т 9. — № 3. — С. 388–406. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209575642200040X>. (дата обращения: 01.06.2023).
6. **Rózsás Á.** On the reliability of steel-concrete composite bridges — Investigation of post-elastic ultimate limit states / Á. Rózsás, N. Kovács, B. Badari // 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel. 2014, September 10–12, 2014, Naples, Italy / Неаполь: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2014. — URL: https://www.researchgate.net/publication/296147997_On_the_reliability_of_steel-concrete_composite_bridges_-_Investigation_of_post-elastic_ultimate_limit_states. (дата обращения: 01.06.2023).

7. **Cheung, M.S.** Probabilistic fatigue and fracture analyses of steel bridges / M.S. Cheung, W.C. Li. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00067-X) // Structural Safety. — 2003. — Т 25. — № 3. — С. 245–262. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016747300200067X>. (дата обращения: 01.06.2023).
8. **Быстров, В.А.** Эксплуатационная надежность конструкций сталежелезобетонных мостов / В.А. Быстров, А.В. Сырков // Транспортное строительство № 8: материалы симпозиума АИПК 11-14 сентября 1991 г. / Л.: 1991. — С. 26–29.
9. **Nowak, A.S.** Reliability of Structures / A.S. Nowak, K.R. Collins. — The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000. — 338 с.
10. **Козак, Н.В.** Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролётного строения существующего автодорожного моста / Н.В. Козак. — DOI <https://doi.org/10.15862/07SATS122> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 1. — С. 07SATS122. — URL: <https://t-s.today/07SATS122.html>. — EDN CLALTW. (дата обращения: 22.06.2023).
11. **Al-Deen, S.** Long-Term Experiments of Composite Steel-Concrete Beams / S. Al-Deen, G. Ranzi, Z. Vrcelj. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.353> // Procedia Engineering. — 2011. — Т 14. — С. 2807–2814. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811014305>. (дата обращения: 22.06.2023).
12. **Ghasemi, S.H.** Reliability Analysis for Serviceability Limit State of Bridges Concerning Deflection Criteria / S.H. Ghasemi, A.S. Nowak. — DOI <https://doi.org/10.2749/101686616X14555428758722> // Structural Engineering International. — 2016. — Т 26. — № 2. — С. 168–175. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686616X14555428758722>. (дата обращения: 22.06.2023).
13. **Быстров, В.А.** Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов / В.А. Быстров, Н.В. Козак, Д.А. Ярошутин. — DOI <https://doi.org/10.15862/06SATS419> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 4. — С. 06SATS419. — URL: <https://t-s.today/06SATS419.html>. — EDN GBIJSS. (дата обращения: 22.06.2023).
14. **Alsharari, F.** Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders / F. Alsharari, A. E. — D. El-Sisi, M. Mutnbak, H. Salim, A. El-Zohairy. — DOI <https://doi.org/10.3390/buildings12050596> // Buildings. — 2022. — Т 12. — № 5. — С. 596. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/596>. (дата обращения: 22.06.2023).
15. **Eom, J.S.** Reliability Analysis Model for Deflection Limit State of Deteriorated Steel Girder Bridges / J. S. Eom. — DOI <https://doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.2.047> // Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. — 2014. — Т 18. — № 2. — С. 47–53. — URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201411560022768.page>. (дата обращения: 22.06.2023).

Сведения об авторах:

Козак Николай Викторович — старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Сырков Антон Владимирович — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: syrkov-anton@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3178-6805>

Быстров Владимир Аполинарьевич — кандидат технических наук, профессор, профессор-консультант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bystrov.admt@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9629-2903>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=815032

Ярошутин Дмитрий Андреевич — ассистент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yaroshutin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1630-9531>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=815030

Статья получена: 26.07.2023. Принята к публикации: 03.11.2023. Опубликовано онлайн: 17.11.2023.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2023 году

REFERENCES

1. Syrkov A. Enhancing of Bridge Management Given Failures Data. In: *Synergy of Culture and Civil Engineering — History and Challenges, Wroclaw, Poland, 7–9 October 2020*. Zurich: IABSE; 2020. p. 1173–1180. Available at: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/enhancing-of-bridge-management-given-failures-data> (accessed 01st June 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/wroclaw.2020.1173>.
2. Syrkov A., Høj N.P. Bridge failures analysis as a risk mitigating tool. In: *Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management, Guimarães, Portugal, 27–29 March 2019*. Zurich: IABSE; 2019. p. 304–310. Available at: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/bridge-failures-analysis-as-a-risk-mitigating-tool> (accessed 01st June 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/guimaraes.2019.0304>.
3. Akesson B. Understanding Bridge Collapses. London: Taylor & Francis; 2008. (In Eng.).
4. Crawford K. Perspective Chapter: Bridge Deterioration and Failures. In: *Failure Analysis — Structural Health Monitoring of Structure and Infrastructure Components*. IntechOpen; 2023. p. 266. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/85946> (accessed 01st June 2023). (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109927>.
5. Zhang G., Liu Y., Liu J., Lan S., Yang J. Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022; 9(3): 388–406. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003>.
6. Rózsás Á., Kovács N., Badari B. On the reliability of steel-concrete composite bridges — Investigation of post-elastic ultimate limit states. In: Conference: 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2014. Naples, Italy: ECCS European Convention for Constructional Steelwork; 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/296147997_On_the_reliability_of_steel-concrete_composite_bridges_-_Investigation_of_post-elastic_ultimate_limit_states (accessed 01st June 2023). (In Eng.).
7. Cheung M.S., Li W.C. Probabilistic fatigue and fracture analyses of steel bridges. *Structural Safety*. 2003; 25(3): 245–262. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00067-X).
8. Bystrov V.A., Syrkov A.V. Eksploatacionnaya nadezhnost' konstruksiy stalezhelezobetonnykh mostov [Operational reliability of steel-reinforced concrete bridge structures]. In: *Transportnoye stroitel'stvo № 8: materialy simpoziuma AIPK 11–14 sentyabrya 1991 g.* [Transport construction No. 8: materials of the AIPC symposium September 11–14, 1991]. Leningrad: 1991. p. 26–29.
9. Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. The McGraw-Hill Companies, Inc; 2000. (In Eng.).
10. Kozak N.V. Operating regime investigational study of steel-reinforced concrete superstructure flexible pin stops of the existing road bridge. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(1): 07SATS122. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/07SATS122>.
11. Al-Deen S., Ranzi G., Vrcelj Z. Long-Term Experiments of Composite Steel-Concrete Beams. *Procedia Engineering*. 2011; 14: 2807–2814. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.353>.

12. Ghasemi S.H., Nowak A.S. Reliability Analysis for Serviceability Limit State of Bridges Concerning Deflection Criteria. *Structural Engineering International*. 2016; 26(2): 168–175. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/101686616X14555428758722>.
13. Bystrov V.A., Kozak N.V., Yaroshutin D.A. Problems of real dynamically loading mode and structure fatigue mode determination in composite steel-concrete city and road bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(4): 06SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS419>.
14. Alsharari F., El-Sisi A.E.-D., Mutnbak M., Salim H., El-Zohairy A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders. *Buildings*. 2022; 12(5): 596. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12050596>.
15. Eom J.S. Reliability Analysis Model for Deflection Limit State of Deteriorated Steel Girder Bridges. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2014; 18(2): 47–53. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1112/jksmi.2014.18.2.047>.

Information about the authors:

Nikolai V. Kozak — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Anton V. Syrkov — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: syrkov-anton@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3178-6805>

Vladimir A. Bystrov — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: bystrov.admt@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9629-2903>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=815032

Dmitry A. Yaroshutin — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: yaroshutin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1630-9531>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=815030

Submitted: 26th July 2023. Revised: 3rd November 2023. Published online: 17th November 2023.

The article is published based on the results of the academic research work conducted within the scope of the grants contest for the academic research work performance by scientific and pedagogical workers of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering» in 2023