Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Феоктистова Е.П. Оценка остаточного усталостного ресурса металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/15SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS319

For citation:

Feoktistova E.P. (2019). Assessment of residual fatigue life of metal beam of reinforced concrete superstructures of road bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS319

УДК 624.21.8

ГРНТИ 73.31.13

Феоктистова Елена Павловна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Старший научный сотрудник, доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: feok_ep@mail.ru

Оценка остаточного усталостного ресурса металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов

Аннотация. В статье предложена методика оценки долговечности металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов. В расчетах остаточного усталостного ресурса используются статистические данные характеристик выносливости стальных конструкций, наиболее полно соответствующих рассматриваемым соединениям по конструкции, материалу, технологии изготовления и силовому воздействию.

При определении усталостного ресурса использована гипотеза линейного суммирования накопления усталостных повреждений. В качестве критической меры повреждения, обеспечивающей заданную надежность, принята единица. Для определения остаточного усталостного ресурса металлических балок используются характеристики выносливости различных групп сварных соединений.

При расчете ресурса автомобильная нагрузка, в том числе перспективная, приводится к расчетной. Коэффициент приведения определяется в зависимости от уровня напряжений, коэффициента асимметрии цикла напряжений и марки стали, исходя из условий равенства меры накопления усталостных повреждений нагрузок. В зависимости от состава движения методика позволяет определить остаточный усталостный ресурс сварных металлических балок. Предельный срок службы и режим эксплуатации прогнозируются на основании расчета конструкции с учетом дефектов и повреждений по фактическим размерам и с учетом дефектов при изготовлении и сооружении, также повреждений при эксплуатации. Также должны быть учтены изменения прочностных и усталостных характеристик.

Предложенная автором методика оценки остаточного усталостного ресурса металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов требует уточнения воздействия нагрузок, прошедших по мосту, современных и перспективных. Долговечность во многом зависит от выполнения работ по содержанию и ремонту пролетных строений.

Ключевые слова: сталежелезобетон; мост; пролетное строение; дефект; повреждение; срок службы; долговечность

Введение

Оценка долговечности пролетных строений представляет сложную задачу, для решения которой требуется установить закономерности изменения нагрузок, усталостных характеристик, накопить надежные статистические данные, изучить особенности работы конструкций [1].

Сталежелезобетонные балочные пролетные строения получили широкое распространение в мостостроении, начиная с конца 50-х годов. Стальные балки объединены с железобетонной плитой, включенной в совместную работу. В автодорожных мостах наиболее распространенные перекрывали пролеты от 40 до 120 м. Конструктивные формы пролетных строений, которые проектировали различные организации, отличаются большим разнообразием [2].

Долговечность сварных металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений во многом зависит не только от изготовления, но и от правильного выполнения работ по ремонту и содержанию сооружений на автодорогах [3–6].

Возникла проблема безопасной эксплуатации сооружений с учетом анализа дефектов и повреждений как в железобетонной части, так и в стальной части. В балках обнаружены коррозия, ослабление заклёпок, высокопрочных болтов, усталостные трещины в сварных швах и околосшовных зонах¹ [7].

Состояние проблемы и постановка задачи

В нормативных документах расчеты по выносливости в основном сводятся к определению максимальных напряжений цикла и сравнением с расчетным сопротивлением с учетом понижающего коэффициента, зависящего от предела выносливости и коэффициента асимметрии цикла. Такой метод не позволяет достаточно полно учитывать многие факторы, связанные с изменением обращающейся нагрузки, характера работы соединений, качества металла при длительной эксплуатации. То есть оценка долговечности имеет приближенный характер и представлена в неявной форме [8; 9].

При оценке долговечности металлических балок сталежелезобетонных мостов, особенно эксплуатируемых в течение десятилетий необходимы более точные данные о ресурсе конкретных сечений и пролетного строения в целом [10; 11]. Более правильной представляется методика, которая состоит в оценке степени усталости материала конструкции на основе теории накопления усталостных повреждений [12–14].

¹ ОДМ 218.3.014-2011 Методика оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах. – М.: Росавтодор, 2013. – 80 с.

Для металлических балок железнодорожных мостов методика оценки ресурса применяется успешно [1] и дает возможность заранее осуществить мероприятия по повышению ресурса пролетных строений. Такой подход позволил разработать рекомендации по повышению остаточного усталостного ресурса стальных балок железнодорожных сталежелезобетонных пролетных строений, выполненных по проектам Ленгипротранса № 541 и 821.

Метод решения

В автодорожных мостах аналогичная методика может быть применена для оценки усталостного ресурса стальных балок автодорожных мостов. Остаточный усталостный ресурс представляет собой разницу между ресурсом и наработкой к рассматриваемому периоду времени. За отказ принято появление усталостной трещины длиной 3–5 мм. Нарботка определяется числом циклов расчетной нагрузки A14. Число эквивалентных циклов нагружения от других транспортных средств определяется путем приведения, исходя из равенства меры накопления усталостных повреждений от нагрузки A14 и транспортных средств. При расчете усталостного ресурса необходимо учитывать планируемые режимы нагружения моста – интенсивность и состав движения.

При определении усталостного ресурса использована гипотеза линейного суммирования накопления усталостных повреждений. В качестве критической меры повреждения, обеспечивающей заданную надежность, принята единица. В расчетах используются статистические данные характеристик выносливости стальных конструкций, наиболее полно соответствующих рассматриваемым соединениям по конструкции, материалу, технологии изготовления и силовому воздействию.

Вероятностные значения характеристик выносливости соединений принимаются при вероятности $P = 0,98$. Кривые усталости построены для малоуглеродистой и низколегированной стали для 7 групп соединений при низких (менее половины предела текучести) и высоких (от половины до предела текучести) остаточных напряжениях.

Срок службы стальных балок сталежелезобетонных пролетных строений составляет

$$T = \frac{N_p}{N_i}, \quad (1)$$

где: N_p – расчетный усталостный ресурс, выраженный количеством эквивалентных циклов нагружения от нагрузки A14;

N_i – количество эквивалентных циклов нагружения в год.

Расчетный усталостный ресурс N_p при заданной вероятности безотказной работы:

$$N_p = \frac{A - B \ln(k_m \sigma / \sigma_{\rho(p)})}{\ln(k_m \sigma / \sigma_{\rho(p)})}, \quad (2)$$

где: A и B – параметры кривой усталости, соответствующей данной группе соединений, марке стали и коэффициенту асимметрии цикла ρ ;

$\sigma_{\rho(p)}$ – расчетный предел выносливости при заданной вероятности безотказной работы P (вероятность безотказной работы принята $P = 0,98$);

σ – напряжения, действующие перпендикулярно направлению развития трещин, МПа;

k_m – коэффициент, учитывающий особенности накопления усталостных повреждений в зонах с плоским напряженным состоянием, (для зон с одноосным напряженным состоянием равен 1).

При оценке усталостного ресурса значение k_m определяется в зависимости от параметров соответствующей линии влияния, длины линии влияния, коэффициента положения вершины линии влияния и величины параметра β , определяемого по формуле:

$$\beta = \frac{0,01 S_x^{\text{отс}}}{l_p Y \delta (\alpha - \alpha^2)}, \quad (3)$$

где: l_p – расчетный пролет;

$S_x^{\text{отс}}$ – статический момент отсеченной части сечения, см³;

y – расстояние по вертикали до точки определения напряжений;

δ – толщина стенки;

α – коэффициент положения вершины линии влияния моментов.

В качестве силовых воздействий рассмотрены нормальная сила, изгибающие моменты в плоскости и из плоскости балки от постоянной и временной нагрузки.

Напряжения равны

$$\sigma = \sigma_{\text{пост}} + \frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y}, \quad (4)$$

где: $\sigma_{\text{пост}}$ – напряжения от постоянной нагрузки;

N – нормальная сила;

A_n – площадь сечения нетто;

M_x и M_y – изгибающие моменты в плоскости и из плоскости балок;

W_x и W_y – моменты сопротивления.

Следует отметить, что принята гипотеза о том, что накопление усталостных повреждений происходит только при напряжениях, больших предела выносливости $\sigma_{r(p)}$. При напряжениях, превышающих значение $\sigma = \sigma_{r(p)} \exp(A/B)$, ресурс по данной методике определять нельзя.

Коэффициент асимметрии цикла r равен отношению минимальных напряжений цикла к максимальным.

Расчетный предел выносливости $\sigma_{r(p)}$ определяется при вероятности $P = 0,98$ в зависимости от марки стали, группы соединений и коэффициента асимметрии цикла.

Кривые усталости, полученные по результатам лабораторных испытаний в институте электросварки им. Е.О. Патона, при 50 % вероятности имеют вид:

$$\sigma = \sigma_{\rho(50\%)} \exp \frac{A}{B+N} \quad (5)$$

Расчетный предел выносливости определяется при вероятности $P = 0,98$ по таблицам пределов выносливости $\sigma_{\rho(50\%)}$, исходя из соотношения:

$$\sigma_{\rho(p)} = \sigma_{\rho(50\%)} \left(1 - \frac{z_p}{\sigma_{-1}} S_{-1} \right) \quad (6)$$

где: $\sigma_{\rho(50\%)}$ – предел выносливости с 50-процентной вероятностью для расчетного значения коэффициента асимметрии цикла;

σ_{-1} – предел выносливости с 50-процентной вероятностью для симметричного цикла;

Z_p – квантиль нормального распределения при заданной вероятности (при $P = 0,98$ $Z_p = 2,053$);

S_{-1} – среднее квадратическое отклонение предела выносливости для симметричного цикла, нормативные значения среднего квадратического отклонения предела выносливости сварных соединений, полученные по результатам лабораторных испытаний в институте электросварки им. Е.О. Патона по группам сварных соединений, приведены в табл.

Таблица 1

Значения коэффициента S_{-1} [14]

Группа элементов	1	2	3	4	5	6	7
S_{-1}	35	28	12(20)	10(15)	8(12)	6(9)	4(7)

Примечание: значения S_{-1} даны для соединений с высокими остаточными напряжениями, а в скобках с низкими

По каждой группе предоставлены параметры кривой усталости A и B и расчетный предел выносливости при заданной вероятности $\sigma_{\rho(p)}$ при коэффициенте асимметрии цикла – ρ для малоуглеродистой и низколегированной стали;

При расчете на усталость проектируемых стальных балок сталежелезобетонных пролетных строений расчетный ресурс N_p должен превышать наработку N_a с учетом этапов смены автомобильной нагрузки:

$$N_p > N_a \quad (7)$$

Мера накопления усталостных повреждений, определяемая на основании гипотезы линейного суммирования накопления повреждений:

$$V = \frac{N \ln(k_m \sigma / \sigma_{\rho(p)})}{A - B \ln(k_m \sigma / \sigma_{\rho(p)})} \quad (8)$$

где: N – число циклов нагружения, остальные обозначения приведены в формуле (2).

При напряжениях, не превышающих предел выносливости $\sigma_{\rho(p)}$, накопление усталостных повреждений не происходит.

Результаты, анализ результатов и их обсуждение

По соотношениям (1) и (2) можно определить ресурс балочных пролетных строений не только по расчетным нагрузкам, но и учесть накопление повреждений от автомобилей, прошедших по мосту за период эксплуатации (историю нагружения) и остаточный усталостный ресурс.

Исходя из равенства меры накопления усталостных повреждений, определяется коэффициент приведения автомобильной нагрузки к нагрузке A14 в зависимости от уровня напряжений, коэффициента асимметрии цикла и марки стали:

$$k = \frac{V}{V_{A14}}, \quad (9)$$

где V_{A14} – мера накопления усталостных повреждений от автомобильной нагрузки A14;
 V – мера накопления от автомобильной нагрузки.

Чтобы получить эквивалентное количество нагружений от всей предполагаемой автомобильной нагрузки, необходимо соответственно умножить количество циклов нагрузки от A14 на коэффициент приведения для каждой нагрузки. Количество циклов эталонной нагрузки A14 будет равно сумме:

$$N_{A14} = \sum k_i N_{iABT}. \quad (10)$$

Необходимо учитывать ежегодный прирост интенсивности движения. При отсутствии таких данных принимают ежегодный прирост числа транспортных средств: 4 % – на мостах федеральной дорожной сети; 3 % – на мостах основных участков федеральной дорожной сети; 1,5 % – на мостах местной сети.

Состав транспортного потока для определения числа эквивалентных циклов нагружения при приведении транспортных средств к нагрузке A14 принимают по данным пунктов учета.

Предельный срок службы, работоспособность, режим эксплуатации прогнозируются на основании расчета конструкций по фактическим размерам и с учетом дефектов при изготовлении и сооружении и повреждений при эксплуатации. Также должны быть учтены изменения прочностных и усталостных характеристик.

При обследовании моста должны быть получены все необходимые данные для определения их работоспособности и условий эксплуатации. Во время обследования необходимо выявить все дефекты и повреждения пролетного строения, их характер, размеры, расположение, а также оценить физическое состояние пролетного строения, а в случае необходимости вырезать образцы металла для установления их химического состава и прочностных свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость при различной температуре). Необходимо тщательно осмотреть все стыки и крепления, установить конструктивные недостатки и дефекты заводского изготовления, монтажа, усиления или ремонта, выявить повреждения, появившиеся за период эксплуатации.

Особенно важно выявить дефекты и повреждения, снижающие грузоподъемность и долговечность пролетного строения и в первую очередь: коррозию металла, трещины в металле, искривления, ослабление натяжения высокопрочных болтов, дефекты сварных швов. При этом нужно установить причины возникновения дефектов и повреждений.

При определении степени коррозии металла особое внимание следует обратить на пояса балок, места креплений фасонки связей. Поверхность элементов при определении степени коррозии должна быть очищена от грязи, краски, продуктов коррозии, после этого проводится

измерение фактической толщины сечения элемента балки. В элементах с местными коррозионными повреждениями определяется глубина язвенных повреждений.

В прочностных расчетах учитываются действительные геометрические характеристики с учетом ослабления коррозией. При оценке усталостной долговечности конструкции в зависимости от степени коррозии эффективный коэффициент концентрации напряжений принимается по сечению с учетом глубины коррозионных повреждений (от $\beta = 1,0$ при глубине коррозионных повреждений менее 0,4 мм до $\beta = 2,2$ при глубине более 1,2 мм).

При обследовании должны быть зафиксированы все трещины в металле независимо от величины их раскрытия. Также фиксируют искривления, пробоины в металле. В пролетных строениях с соединениями на высокопрочных болтах необходимо выборочно проверить достаточность их натяжения.

При осмотре сварных швов особенно важно обследовать зоны в местах изменения сечений, например при обрывах или изменениях толщины и ширины поясных листов в балках, в местах примыкания фасонки, накладок, ребер, диафрагм, у концов швов, участки изменения формы швов.

В случае выявления при обследовании пролетных строений опасных дефектов (трещины, очаги сильной коррозии большое количество ослабленных высокопрочных болтов в прикреплении и др.) принимаются необходимые меры по обеспечению безопасности движения нагрузки.

Для эксплуатируемых мостов остаточный усталостный ресурс, выраженный в эквивалентных циклах нагрузки A_{14} равен:

$$N_{po} = N_p - N_{эспл}, \quad (11)$$

где: N_p – расчетный усталостный ресурс, выраженный в циклах эталонной расчетной нагрузки;

$N_{эспл}$ – использованная за рассматриваемый период эксплуатации наработка, выраженная в циклах эталонной расчетной нагрузки.

Заключение

1. В результате исследования разработана методика оценки долговечности металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов с использованием гипотезы линейного суммирования накопления усталостных повреждений и характеристик выносливости для различных групп сварных соединений.

2. Для эксплуатируемых пролетных строений при приведении циклов можно использовать зависимость (9) между числом циклов расчетной нагрузки и ранее проехавшей по мостам нагрузки. Данный подход основан на использовании эквивалентных циклов, исходя из соотношения мер накопления усталостных повреждений.

3. Предложенная методика оценки остаточного усталостного ресурса металлических балок сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов требует уточнения воздействия нагрузок, прошедших по мосту, современных и перспективных. Долговечность во многом зависит от выполнения работ по содержанию и ремонту пролетных строений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов В.О. Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых мостов. – М.: Транспорт, 1983. – 287 с.
2. Стрелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные пролётные строения мостов. – М.: Транспорт, 1981. – 360 с.
3. Бокарев С.А., Цветков Д.Н. Экспресс-оценка технического состояния эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам // Известия Транссиба № 1, 2010. – С. 90–97.
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений // Транспортные сооружения, Том 1, №2 (2014) <https://t-s.today/01TS214.html>. – 37 с.
5. Егорушкин Ю.М., Добровичская И.В. Учет конструктивно-технологических факторов в расчетах сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов – М.: «Транспортное строительство», №6, 2008. – С. 11–12.
6. Васильев А.И. Оценка технического состояния мостовых сооружений. – 2-е изд., – М.: КНОРУС, 2019. – 256 с.
7. Боровиков А.Г., Картопольцев В.М. Оценка грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Томск: Вестник ТГАСУ № 4, 2013. – С. 273–279.
8. Свод правил СП 159.1325800.2014 Сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов. Правила расчета. – М.: 2014. – 40 с.
9. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings BS EN 1994-2:2005. – 93 p.
10. Корнеев М.М. Сталежелезобетонные мосты / Теоретическое и практическое пособие по проектированию. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – 399 с.
11. Hobbacher A. Chairman of IIW Joint Working Group XIII–XV. Rekomendations for Fatigue design of welded Joints and components, revision of XIII-1539-96 / XV-845-96 / Dec. 2008. – 143 p.
12. Новожилова Н.И. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов / Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. – Л.: ЛИСИ, 1989. – 96 с.
13. Быстров В.А. Методика оценки фактической динамической нагруженности и ресурса конструкций эксплуатируемых СТ СТЖБ мостов // Наука и инновации в современном строительстве. – Сб. матер. МНПК, СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2007. – С. 254–258.
14. Кручинкин А.В., Платонов А.С., Решетников В.Г., Решетников И.В., Корнев С.Н., Кручинкин А.А. Сталежелезобетонные мосты: проблемы и перспективы развития // Вестник машиностроения №1, 2010. – С. 24–30.

Feoktistova Elena Pavlovna

Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russia
E-mail: feok_ep@mail.ru

Assessment of residual fatigue life of metal beam of reinforced concrete superstructures of road bridges

Abstract. The article proposes a method of evaluation of residual fatigue life of metal beam of reinforced concrete superstructures of road bridges. In the calculations of residual fatigue life were implemented statistical data of endurance characteristics of steel structures that mostly fully corresponds to the given junctions by design, material, production technology and force impact.

Fatigue life is determined based on the hypothesis of linear addition of fatigue damage accumulation. The critical damage amount providing the target reliability considered equal to one.

Residual fatigue life of metal beams is calculated based on endurance characteristics of different groups of welded joints. For the life period assessment the motor transport load including prospective is reduced to the estimated. The reduction factor is defined based on the stress level, asymmetry factor of stress cycle and steel grade according to the conditions of equality of fatigue damage accumulation. The method allows determining of the remaining fatigue life of welded metal beams according to the transport load. Service limit and usage mode are predicted based on the structural calculations taking into account defects and damages using actual size and considering manufacturing, constructing and operational defects. Moreover, changes of strength and fatigue characteristics should be taken into account.

The method of evaluation of residual fatigue life of metal beam of reinforced concrete superstructures of road bridges proposed by the author requires clarification of the current and future load impact. The fatigue life mostly depends on the performance of superstructures maintenance and repair works.

Keywords: composite reinforced concrete; bridge; superstructure; defect; damage; service life; fatigue life

REFERENCES

1. Osipov V.O. (1983). *Dolgovechnost' metallicheskih proletrykh stroeniy ehkspluatiruemykh mostov. [Durability of metal spans of operated bridges.]* Moscow: Transport, p. 287.
2. Streletskiy N.N. (1981). *Stalezhelezobetonnye prolyotnye stroeniya mostov. [Steel-reinforced concrete bridge spans.]* Moscow: Transport, p. 360.
3. Bokarev S.A., Tsvetkov D.N. (2010). Rapid assessment of the technical condition of operating steel-reinforced concrete spans of railway bridges by dynamic parameters. *Bulletin of the Trans-Siberian Railway*, 1, pp. 90–97 (in Russian).
4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. (2014). Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(1). Available at: <https://t-s.today/01TS214.html> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS214.

5. Egorushkin Yu.M., Dobrochinskaya I.V. (2008). Consideration of structural and technological factors in the calculations of steel-reinforced concrete spans of road bridges. *Transport construction*, 6, pp. 11–12 (in Russian).
6. Vasil'ev A.I. (2019). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh sooruzheniy. [*Assessment of the technical condition of bridge structures.*] Moscow: Knorus, p. 256.
7. Borovikov A.G., Kartopol'tsev V.M. (2013). Capacity assessment of steel-reinforced concrete spans of road bridges. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 4, pp. 273–279.
8. (2014). Svod pravil SP 159.1325800.2014 Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniya avtodorozhnykh mostov. Pravila rascheta. [*Code of rules SP 159.1325800.2014 Steel-reinforced concrete spans of road bridges. Calculation Rules.*] Moscow, p. 40.
9. (2005). *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings BS EN 1994-2*, p. 93.
10. Korneev M.M. (2015). Stalezhelezobetonnye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu. [*Steel-reinforced concrete bridges. Theoretical and practical design manual.*] Saint Petersburg: Petersburg State University of Railway Engineering, p. 399.
11. Hobbacher A. (2008). *Chairman of IIW Joint Working Group XIII–XV. Rekomendations for Fatigue design of welded Joints and components, revision of XIII-1539-96 / XV-845-96*, p. 143.
12. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaykevich V.L. (1989). Prognozirovaniye nadezhnosti konstruktsiy stal'nykh i stalezhelezobetonnykh mostov. [*Prediction of the reliability of steel and steel-concrete bridge designs.*] Leningrad: Leningrad Civil Engineering Institute, p. 96.
13. Bystrov V.A. (2007). Metodika otsenki fakticheskoy dinamicheskoy nagruzhennosti i resursa konstruktsiy ehkspluatiruemykh ST STZHB mostov. Nauka i innovatsii v sovremennom stroitel'stve. [*Methodology for assessing the actual dynamic loading and resource of structures operated by ST STZHB bridges. Science and innovation in modern construction.*] Saint Petersburg: Publishing House Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 254–258.
14. Kruchinkin A.V., Platonov A.S., Reshetnikov V.G., Reshetnikov I.V., Kornev S.N., Kruchinkin A.A. (2010). Steel-reinforced concrete bridges: problems and development prospects. *Bulletin of mechanical engineering*, 1, pp. 24–30 (in Russian).