

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.271 / 69.059.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-3-169-183

*С.А. БОКАРЕВ, С.С. ПРИБЫТКОВ, С.В. ЕФИМОВ,
Сибирский государственный университет путей сообщения*

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

На сегодняшний день отсутствует единая подтвержденная опытом эксплуатации и утвержденная на федеральном уровне методика оценки остаточного ресурса железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. В статье сделан обзор отечественных и зарубежных нормативных документов по определению долговечности железобетонных мостовых конструкций. Приведены данные о неисправностях эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, влияющих на их грузоподъемность и долговечность. За прошедшие 30 лет отечественными и зарубежными учеными проведены обширные исследования по вопросу определения остаточного ресурса и предложены различные методики. Выполнен анализ недостатков и преимуществ данных методик. На основе изучения опыта эксплуатации и существующих подходов была предложена методика оценки остаточного срока службы конструкций, которая учитывает наличие неисправностей, историю эксплуатации, климатический фактор и позволяет определить вероятность изменения состояния сооружения по нескольким сценариям. Процесс изменения состояния является случайным. Для прогнозирования состояния и расчета показателей надежности сооружений и их элементов используется модель, основанная на полумарковском процессе. Источники данных для моделей надежности – результаты наблюдений за состоянием сооружений либо математические модели возникновения и развития неисправностей. Представлен пример определения остаточного ресурса железобетонного пролетного строения при возникновении и развитии коррозии рабочей арматуры. Данная методика соответствует современному подходу, а также отечественным нормативным документам и реализует принятую на сети железных дорог Российской Федерации концепцию эксплуатации и содержания искусственных сооружений.

Ключевые слова: железобетонные пролетные строения; железнодорожные мосты; долговечность; остаточный ресурс; грузоподъемность.

Для цитирования: Бокарев С.А., Прибытков С.С., Ефимов С.В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 3. С. 169–183.

S.A. BOKAREV, S.S. PRIBYTKOV, S.V. EFIMOV,
Siberian State Transport University

RESIDUAL LIFE OF REINFORCED CONCRETE SUPERSTRUCTURES OF RAILWAY BRIDGES

To date, there is no single methodology confirmed by the operational experience and approved at the federal level of estimating the residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges. The paper provides an overview of Russian and foreign regulatory documents to determine the durability of reinforced concrete bridge construction. The paper presents data on malfunctions of reinforced concrete superstructures which affect their capacity and durability. Over the past 30 years, Russian and foreign scientists have conducted extensive research into the residual life and proposed various methods. Shortcomings and advantages of these methods are analyzed. Based on the study of the operational experience and existing approaches, a methodology is proposed for estimating the residual life of construction, which considers malfunctions, operating history, climatic factor, and allows determining the probability of changing the technical state of the construction by several scenarios. The process of changing conditions is random. For predicting conditions and calculating indicators of the structural reliability of and its elements, a model based on the semi-Markov process is used. Data sources for reliability models are obtained from observations of the technical state of construction or mathematical models of the malfunction development. The residual life of reinforced concrete superstructures is determined in the event of the reinforcement corrosion. This methodology corresponds to the modern approach, as well as the Russian regulatory documents and implements the concept of operation and maintenance of artificial construction accepted by the Russian railway network.

Keyword: reinforced concrete superstructure; railway bridge; durability; residual resource; carrying capacity.

For citation: Bokarev S.A., Pribytkov S.S., Efimov S.V. Ostatochnyi resurs zhelezobetonnykh proletnykh stroenii zheleznodorozhnykh mostov [Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 3. Pp. 169–183. (rus)

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируют более 43 тыс. железобетонных пролетных строений [2]. Это плитные или ребристые конструкции, с числом ребер от двух до четырех, которые запроектированы под разные нагрузки. Срок службы 4,6 % пролетных строений, выполненных под нагрузку 1907 г., составляет 100 и более лет, под нагрузку 1925 г. (данные пролетные строения составляют 2,6 % от общего количества эксплуатируемых железобетонных пролетных строений) – от 80 до 90 лет. Большинство пролетных строений, рассчитанных под нагрузку Н7 (6,1 %) и Н8 (29,3 %) эксплуатируют порядка 70–85 лет. Срок эксплуатации пролетных строений, запроектированных под нагрузку С14 (54,1 %), как правило, не превышает 50 лет.

В период эксплуатации на железобетонные пролетные строения кроме постоянных и временных нагрузок воздействуют факторы внешней среды, которые оказывают в основном отрицательное влияние на железобетон, снижая его потребительские свойства. Техническое состояние основных несущих конструкций пролетных строений обусловлено преимущественно сроком их службы, конструктивными особенностями и условиями эксплуатации. В табл. 1

представлено относительное количество на сети ОАО «РЖД» пролетных строений с неисправностями, которые оказывают влияние на долговечность и грузоподъемность (согласно базе данных АСУ ИССО).

Таблица 1

Неисправности пролетных строений на сети ОАО «РЖД»

Наименование неисправности	Относительное количество пролетных строений с неисправностью, %
Выщелачивание цементного камня	30,4
Толщина балласта больше допустимой	18,7
Эксцентриситет пути более 5 см	17,9
Морозное разрушение бетона	9,8
Отслоение защитного слоя арматуры	4,8
Продольный борт наращен более чем на 20 см	4,5
Трещины вдоль стержней рабочей арматуры	2,6
Коррозия арматуры	1,3

Из таблицы видно, что наибольшее количество неисправностей вызвано воздействием воды, попеременным замораживанием и оттаиванием бетона – (выщелачивание и морозное разрушение) и отклонением в содержании балластной призмы (толщина слоя балласта и эксцентриситет пути больше допустимых по нормативным документам значений).

Определение остаточного ресурса является обязательной регламентной процедурой в системе эксплуатации мостов. На сегодняшний день в мировой практике эта проблема полностью не решена, и существуют различные подходы и способы определения нормативного и остаточного сроков службы железобетонных пролетных строений.

Срок службы мостов в большинстве зарубежных нормативных документов на проектирование железобетонных конструкций (в том числе мостов), а именно в EN 1992-1-1: Eurocode 2: «Design of concrete structures», ES ISO 2394:2012 (Эфиопия), DIN 1045-1-2008 (Германия) устанавливаются равным 100 лет. Нормы Великобритании BS:5400 по проектированию мостовых конструкций устанавливают проектный срок службы 120 лет. Указанные нормативные документы регламентируют сроки службы мостов при выполнении всех требований того или иного документа и в зависимости от конструктивных характеристик моста (толщина защитного слоя, класс бетона, армирование). Однако в них отсутствуют аппарат оценки долговечности и модели прогнозирования, позволяющие определять и нормировать срок службы железобетонных мостов.

В отечественных нормах Технические условия проектирования капитального восстановления и строительства новых мостов и труб под железную дорогу нормальной колеи (ТУМП-47), СН 200-62 «Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб», СН 365-67 «Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железно-

дорожных, автодорожных и городских мостов и труб», СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы», СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», по которым построено большинство эксплуатируемых отечественных мостов, отсутствуют рекомендации по оценке долговечности мостов и регламентированию их сроков службы. В ГОСТ Р 54257–2010 «Надежность строительных конструкций и оснований» приведены примерные сроки службы сооружений разных классов, установленные в зависимости от назначения и последствий от их разрушения. В Инструкции по оценке технического состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах РФ [4] приводится оценка остаточного срока службы пролетного строения в зависимости от общего балла по долговечности, который определяют с учетом неисправностей. Также указан нормативный срок службы железобетонного пролетного строения, равный 70 годам.

Согласно нормам Украины (ДБН В.2.3-22: 2009), оценка технического состояния пролетных строений осуществляется путем идентификации их эксплуатационного состояния. Учитывается, что в течение всего срока службы мост в целом или его конструктивный элемент последовательно пребывают в одном из пяти эксплуатационных состояний. Каждому эксплуатационному состоянию соответствуют определенный уровень износа элемента и регламентируемые эксплуатационные или ремонтные мероприятия. Остаточный ресурс моста прогнозируют согласно определению времени перехода элементов моста из одного эксплуатационного состояния в другое.

В Рекомендациях по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам, разработанных ЦНИИПромзданий, общая оценка поврежденности здания и сооружения производится по формуле

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$ – максимальная величина повреждений элементов конструкций; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ – коэффициенты значимости элементов конструкций.

Коэффициенты значимости конструкций устанавливаются на основании экспертных оценок, учитывающих социально-экономические последствия разрушения отдельных видов конструкций, характера разрушения (разрушение с предварительным оповещением посредством развития пластических деформаций или мгновенное хрупкое разрушение). Относительная оценка надежности сооружения производится по формуле

$$y = 1 - \varepsilon.$$

Величину повреждения строительных конструкций через t лет ее эксплуатации определяют по формуле

$$\varepsilon = 1 - e^{\lambda t},$$

где $\lambda = \frac{-\ln y}{t_\phi}$ – постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения несущей способности в момент обследования; y – относительная надежность, определяемая по категории технического состояния конструкции в зависимости от повреждений; t_ϕ – срок эксплуатации в годах на момент обследования.

Срок эксплуатации конструкции до капитального ремонта: $t = \frac{0,16}{\lambda}$.

Срок эксплуатации конструкции до аварийного состояния: $t_0 = \frac{0,22}{\lambda}$.

В своих работах В.П. Чирков [10, 11] утверждает, что нормативный срок службы может быть установлен различными путями: на основе минимума общих затрат на строительство и текущих расходов при эксплуатации сооружения, на основе экспертной оценки и опыта эксплуатации. В.П. Чирков вывел вероятностные формулы для прогнозирования срока службы по следующим признакам:

– выносливость бетона

$$T = \frac{N_1}{n_1} \left(\frac{1 + \gamma V_b}{\eta} \right)^m,$$

где $N_1 = 2 \cdot 10^6$, n_1 – число циклов нагружения в единицу времени; γ – характеристика безопасности при $P = 0,99$ соответствует $\gamma = 2,33$; V_b – коэффициент вариации временной нагрузки; η – коэффициент, учитывающий уровень нагружения и статистические свойства нагрузок; $m = 20$ – характеристика кривой выносливости;

– выносливость арматуры

$$T = \frac{N_1}{n_1} \left(\frac{1 + \gamma V_s}{\eta_s} \right)^m,$$

где V_s – коэффициент вариации прочности арматуры; η_s – коэффициент, учитывающий уровень нагружения и статистические свойства нагрузок; m – характеристика кривой выносливости арматуры.

Дальнейшие исследования позволили несколько усовершенствовать методику. Р.К. Мамажановым предложена методика определения остаточного срока железобетонных пролетных строений по признаку выносливости бетона [8], в которой для описания процесса развития трещинообразования в бетоне сжатой зоны пролетных строений мостов использован основной параметр механики разрушения – коэффициент интенсивности напряжений K_I . Математическая модель остаточного ресурса имеет вид

$$T = \frac{N_{cr} - \Delta t \sum \beta_3 n_{oi}}{\sum \beta_3 n_i} \delta_g \delta_k m_b;$$

$$\delta_g = \left[1 - \frac{1}{2\alpha_k} \left(\frac{1}{\alpha_k} - 1 \right) \omega_g^2 \right]^{-1};$$

$$\delta_k = 1 - \left[\frac{K_{in}}{K_{ic}} (1 - \omega_k) \gamma_k \right]^{\frac{2}{\alpha_k}},$$

где N_{cr} – предельное количество циклов многократно повторенного приложения нагрузок до разрушения; Δt – время от начала эксплуатации до момента диагностирования, в годах; n_{oi} – количество поездов i -го типа в год, прошедших за период эксплуатации; n_i – количество поездов i -го типа в год после диагностирования; β_3 – эквивалентное количество циклов; K_{in} – коэффициент интенсивности напряжений в момент диагностики, зависящий от предыстории нагружения; K_{ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый испытанием бетона; ω_k , ω_g – коэффициенты вариации нагрузки и критического коэффициента интенсивности напряжений соответственно; m_b – функция, учитывающая изменение свойств материала во времени.

Основным достоинством этой методики является учет статистического разброса нагрузок, перспективы их изменения, истории нагружения. Однако использование этой модели в практических расчетах сложно и требует наличия данных о структуре поездопотока, пропущенного по мосту в период эксплуатации. Невозможно учитывать работу бетона в сжатой зоне при высоких уровнях нагружения в сочетании с воздействием окружающей среды.

Общим недостатком двух вышеуказанных методик является отсутствие прямого вероятностного расчета остаточного срока службы, статистический разброс учитывается, как и в используемых нормативных документах, с помощью различных коэффициентов.

Л.И. Иосилевский [5, 6] утверждает, что необходимо определение в любой момент времени важнейших показателей напряженного состояния, от которых зависит надежность сооружений в целом. Для железобетонных пролетных строений к таким показателям относятся прочность бетона, глубина карбонизации защитного слоя, раскрытие трещин, степень и характер коррозии арматуры, упругие и остаточные прогибы, деформации бетона и арматуры. Остаточный срок службы пролетного строения характеризуется периодом эксплуатации до достижения пороговых значений.

Графическая интерпретация изменения несущей способности R и воздействия нагрузки S на протяжении срока службы представлена на рис. 1.

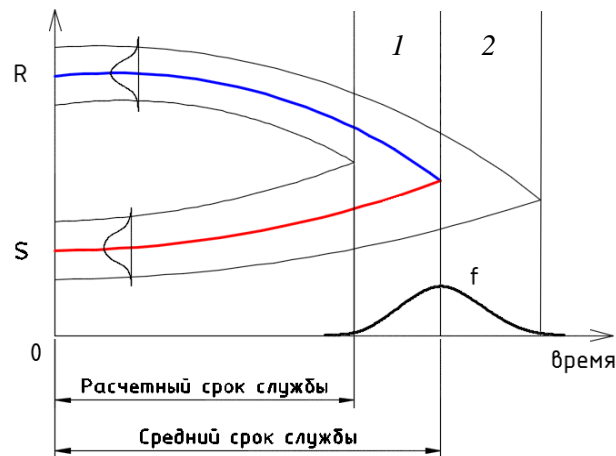


Рис. 1. Изменение несущей способности R и воздействия S и плотность f распределения срока службы:

R — изменение несущей способности; S — изменение временных нагрузок; f — плотность распределения срока службы; 1 — зона повышенного риска; 2 — зона разрушения

Л.И. Иосилевский и И.В. Федулов разработали модель изменения ресурса прочности сооружения ψ (безразмерная величина) во времени в зависимости от критических коэффициентов интенсивности напряжений:

$$\psi = \frac{K_{1c,n} - K_{1c,cr}}{K_{1c,0} - K_{1c,cr}}$$

где $K_{1c,n}$, $K_{1c,cr}$, $K_{1c,0}$ – соответственно критические коэффициенты интенсивности напряжений, определенные при выполнении технической диагностики, перед разрушением и в начале эксплуатации.

Математическая модель критического коэффициента интенсивности напряжений представлена в следующем виде:

$$K_{1c,n} = 0,955K_{1c,0} \cdot e^{-\alpha(T-T_0)^2n^2},$$

где $K_{1c,0}$ – значение критического коэффициента интенсивности напряжений в начале эксплуатации; α – показатель кривой выносливости бетона; T – срок эксплуатации на момент оценки ресурса (в годах); T_0 – срок приработки конструкции; n – количество циклов в год;

$$K_{1c,0} = m_2 \cdot R_b,$$

где R_b – прочность бетона при сжатии (проектная), МПа; m_2 – коэффициент, находится в пределах 0,03–0,04 с обеспеченностью 0,95.

Предлагаемая модель применима только при достаточной научной информации об изменяющихся во времени прочностных возможностях материалов на момент технической диагностики и в конце эксплуатации, когда имеется информация о состоянии сооружения, динамике снижения ресурса, полученная по результатам проводимых обследований эксплуатирующими организациями.

Методика определения остаточного срока службы мостовых конструкций В.И. Шестерикова и А.И. Васильева [3] основана на экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации конструкции. Срок службы элемента конструкции определяется отношением стоимости его ремонта с дальнейшей эксплуатацией к варианту полной замены элемента. Авторы утверждают, что физический износ конструкции представляет собой потерю несущей способности и может быть описан формулой

$$U(t) = e^{\lambda(t-T)} - 1,$$

где $U(t)$ – износ в долях несущей способности на момент времени t ; λ – показатель интенсивности износа (по данным автора находится в пределах 0,008–0,012); T – срок «приработки» (в годах), т. е. начальный период эксплуатации, когда износа еще не происходит; t – текущий момент времени от начала эксплуатации (в годах).

Срок, соответствующий критическому износу $t_{кр}$, определяется формулой

$$t_{кр} = \frac{\ln(U_{кр}+1)}{\lambda} + T,$$

где $U_{кр}$ – критический износ, при котором прекращается эксплуатация.

Остаточный срок службы определяется следующим образом:

$$\Delta T = t_{кр} - t.$$

Величины λ и T зависят от типа конструкций, места расположения моста (климатический район) и уровня эксплуатации. Данная методика определения остаточного срока службы применима только для уже обчисленных начальных условий (типов конструкций, климатических условий и пр., для которых имеются соответствующие значения λ и T). Но для других сочетаний исходных параметров расчет сроков службы невозможен вплоть до накопления статистической информации. Величина износа, составляющая основу ме-

тодики, является интегральным показателем надежности, объединяющая в себе оценку по безопасности, долговечности, грузоподъемности и ремонтно-пригодности. В железнодорожной практике принято использование именно различных показателей для определения технического состояния сооружения.

Методика А.И. Васильева и В.И. Шестерикова нашла отражение в документе «Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов» [12].

И.З. Актуганов [1] в своих работах утверждает, что железобетонные мосты редко перестают удовлетворять эксплуатационным требованиям из-за увеличения со временем подвижной нагрузки, поскольку, во-первых, это увеличение оказывается относительно небольшим в силу их массивности и, во-вторых, бетон, удовлетворяющий условиям эксплуатации, со временем увеличивает свою прочность для низких классов вдвое, а высоких – на 30–50 %, что, как правило, компенсирует возрастание нагрузки. Гораздо большее влияние на надежность железобетонных мостов в эксплуатационной стадии оказывают климатические воздействия.

Все факторы, оказывающие влияние на долговечность железобетонных пролетных строений, разделены на две группы. Факторы первой группы оказывают непосредственное влияние на физико-механические свойства материалов конструкции, изменяя их во времени. К этой группе относятся: многократное действие нагрузки, приводящее к уменьшению прочностных свойств бетона и арматуры, многократное действие знакопеременных температур; влажность среды. К этой же группе относятся агрессивное действие среды, карбонизация бетона. Факторы второй группы влияют на долговечность конструкции путем создания такого напряженного или деформированного состояния, которое может привести к отказу конструкции. Ко второй группе факторов относятся постоянные и временные нагрузки, температурные и влажностные воздействия, приводящие к возникновению напряжений σ_T и σ_W . Условие долговечности при этом

$$\sigma_T + \sigma_W \leq R(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}).$$

Таким образом, автор попытался охватить все разнообразие климатических факторов, негативно влияющих на эксплуатационные характеристики бетона и арматуры, но эти исследования не были завершены и не нашли отражения в нормативных документах.

Исследователями из Технического университета г. Риги (Латвия) [14, 15] предложен метод оценки технического состояния сооружения, оценивающий развитие процесса коррозии в 10 ступеней и позволяющий систематически идентифицировать влияние различных факторов окружающей среды и конструкции на долговечность железобетонного моста. По результатам обследования мостов установлено, что 64,8 % наблюдаемых участков поверхности моста не имеют признаков повреждения арматуры, коррозионные повреждения конструктивной арматуры имеют место на 14 % площади поверхности, рабочей арматуры – 4 % площади поверхности. Данный метод применим для определения времени инициации коррозии от воздействия хлоридов или процесса карбонизации. Необходимо систематизировать информацию об этапах развития коррозии, которая может быть получена при осмотрах мостов.

Предлагаемая в данной работе методика определения остаточного срока службы основана на следующих предпосылках:

1. Сохраняется подход, реализованный в Инструкции по оценке состояния (сохраняется балльная оценка, в том числе по параметрам надежности – безопасность, грузоподъемность, долговечность, ремонтпригодность).

2. Полное соответствие ГОСТ 32192–2013 «Надёжность в железнодорожной технике. Основные понятия, термины и определения».

3. Реализуется концепция методологии УРРАН (Управление ресурсами, рисками и надежностью на всех этапах жизненного цикла).

В первую очередь следует уточнить, что именно мы понимаем под остаточным ресурсом объекта. В ГОСТ 32192–2013 написано, что остаточный ресурс – это наработка, исчисляемая от значения наработки в текущий момент времени до перехода в предельное состояние. В этом же стандарте сказано, что предельное состояние – это такое состояние, в котором «дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна на основании оценки рисков». Эта формулировка в той своей части, что определяется словом «недопустима», может быть истолкована аналогично отказу – ведь отказавшее сооружение эксплуатировать нельзя. В Техническом регламенте о безопасности зданий и сооружений № 384-ФЗ о предельном состоянии сказано так: «состояние... за пределами которого дальнейшая эксплуатация... опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния... невозможно или нецелесообразно». Хотя и эта формулировка вызывает вопросы из-за слова «затруднена» – что имеется в виду, неясно. Определение предельного состояния приведено также в другом техническом регламенте – «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011): «состояние объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, при котором их дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна или восстановление их работоспособности невозможно или нецелесообразно». Из этих определений следует, что предельным может быть и просто неработоспособное состояние (дальнейшая эксплуатация недопустима) и состояние, восстановление из которого невозможно или нецелесообразно. В нашем исследовании мы сосредоточимся на оценке величины наработки до перехода в неработоспособное состояние. Возможность и целесообразность восстановления – это вопросы, которые пока остались за рамками.

Пролетные строения представляют собой сложные системы, состоящие из множества элементов. У каждого элемента свое назначение и конструкция, каждый подвержен, как правило, воздействию нескольких факторов и может иметь множество различных дефектов. Для оценки состояния каждого элемента нужно измерить, вычислить, оценить несколько показателей. Для технических систем существует подход, заключающийся в использовании показателей надежности (безотказности, долговечности, грузоподъемности, ремонтпригодности), характеризующих способность сооружения выполнять требуемые функции.

При эксплуатации в результате повреждений, вызываемых различными природно-климатическими и техногенными воздействиями, у пролетных строений появляются дефекты. Их состояние ухудшается вплоть до возникно-

вения отказа. Таким образом, множество возможных состояний (рис. 2) как элемента, так и сооружения в целом включает:

1. Исправное (индекс 0) – неисправностей нет, работоспособное, без ограничений скорости, полный остаточный ресурс.

2. Неисправные работоспособные – полностью работоспособные состояния, характеризуемые наличием неисправностей с различной степенью развития и сниженным из-за них остаточным ресурсом:

– хорошее (индекс 1) – неисправности с наименьшей степенью развития;

– удовлетворительное (индекс 2) – неисправности со «средней» степенью развития;

– неудовлетворительное (индекс 3) – серьезные неисправности;

– предотказное (индекс 4) – работоспособное состояние с неисправностями предельно возможной степени развития, остаточный ресурс практически исчерпан;

– при вводе ограничений скорости для обращающейся нагрузки или запрете пропуск отдельных видов подвижного состава объект переводится в частично работоспособное состояние (индекс 4.1).

3. Неисправное неработоспособное (индекс 5) – существенные неисправности (вплоть до разрушения несущих конструкций), полная неспособность выполнять свои функции, остаточный ресурс исчерпан, движение запрещено.



Рис. 2. Иерархия множества возможных состояний конструкций

Ухудшение состояния происходит из-за возникновения повреждений и роста дефектов. Процесс изменения состояния является случайным. Вероятность отказа – события, приводящего к нежелательным последствиям, определяется расчетом по моделям надежности. Для прогнозирования состояния и расчета показателей надежности сооружений и их элементов используется модель, основанная на полумарковском процессе. По моделям надежности определяются вероятности каждого из возможных состояний в любые заданные моменты времени.

Источниками данных для построения модели надежности могут быть результаты наблюдений за состоянием элементов ИССО (под наблюдениями

понимаются осмотры, обследования, испытания и итоги расчетов грузоподъемности), математические модели возникновения и развития неисправностей, а также экспертные оценки. Предпочтение должно отдаваться статистике, поскольку оценки, основанные на фактах, лучше экспертных предположений и теоретических выводов. В отсутствие достаточного количества наблюдений за конкретным объектом нужно обобщать наблюдения за всеми похожими на него объектами, а если и этих данных недостаточно – обращаться к математическим моделям и в последнюю очередь – к экспертным оценкам.

В табл. 2 представлены неисправности железобетонного пролетного строения, характеризующие его состояние.

Таблица 2

Возможные признаки состояния железобетонного пролетного строения

Состояние пролетного строения	Признаки состояния
Исправное (S_0)	Неисправности отсутствуют
Хорошее (S_1)	Выщелачивание цементного камня
Удовлетворительное (S_2)	Сколы бетона Морозное разрушение бетона Отсутствует или недостаточный защитный слой бетона
Неудовлетворительное (S_3)	Трещины, не изменяющие раскрытие под нагрузкой, и другие неисправности с различной степенью развития
Предотказное (S_4) или частично работоспособное ($S_{4.1}$)	По результатам расчета грузоподъемности с учетом неисправностей (например: значительные толщина балласта под шпалой или эксцентриситет пути, низкая прочность бетона, коррозия или разрывы арматуры) для пропуска нагрузки необходим ввод ограничения её скорости или массы
Неработоспособное (S_5)	Недостаточная грузоподъемность для пропуска обрабатываемой нагрузки с учетом ограничения скорости

Путем расчета можно установить: вероятность отказа в течение заданного времени, среднее время до отказа, гамма-процентный срок службы (время до достижения предельного состояния с заданной вероятностью).

1. Время перехода из состояния S_0 в S_1 .

Случайное время, проведенное железобетонным пролетным строением в состоянии S_0 перед переходом в S_1 , подчиняется закону распределения Вейбулла – Гнеденко с двумя параметрами [7, 9, 13]. График функции на основе статистической обработки данных наблюдения по Западно-Сибирской дороге представлен на рис. 3. Функция плотности вероятности этого распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} = \frac{2,85}{11,88} \left(\frac{t}{11,88}\right)^{1,85} e^{-\left(\frac{t}{11,88}\right)^{2,85}},$$

где β – параметр формы; η – параметр масштаба («характерный» срок службы).

Целесообразно построение плотности распределения пребывания в одном состоянии перед переходом в другое для различных дорог или регионов либо использование климатического коэффициента k_c для них.

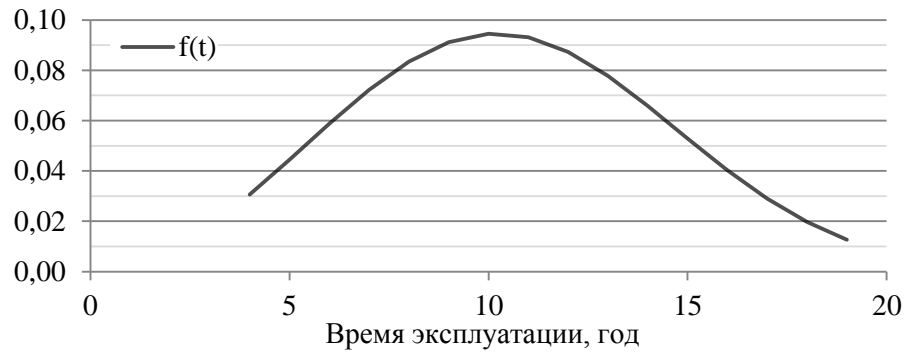


Рис. 3. Плотность распределения вероятности пребывания в S_0 перед переходом в S_1

2. Время перехода из состояния S_0 в S_4 может быть определено:

- по результатам обследования (значительные отступления от требований содержания мостового полотна, наличие трещин, низкая прочность бетона в сжатой зоне, разрывы и коррозия арматуры);
- расчетом (по модели развития процессов деградации).

Рассмотрим детально определение остаточного срока службы на примере развития коррозии арматуры.

Время от начала эксплуатации до перехода в состояние S_4 определяется следующим образом [10, 11]:

$$T_{0-4} = k_c(T_1 + T_4),$$

где T_1 – продолжительность периода инициации коррозии; k_c – климатический коэффициент; T_4 – время развития коррозии до потери площади сечения арматуры, снижающего несущую способность пролетного строения до уровня обращающихся нагрузок (например, 10 % от общей площади):

$$M_{\text{пред}} = M_{\text{нагр}},$$

где $M_{\text{пред}} = f\{A_s(t)\}$; $M_{\text{нагр}} = f\{v(1 + \mu)\}$.

В состоянии S_4 пропуск нагрузки возможен при введении ограничений по скорости или массе при соблюдении условия

$$M_{\text{пред}} > M_{\text{нагр}}.$$

Продолжительность периода инициации коррозии T_1 также подчиняется закону распределения Вейбулла – Гнеденко с двумя параметрами. График функции на основе статистической обработки данных наблюдения всей сети федеральных автодорог РФ представлен на рис. 4. Функция плотности вероятности этого распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} = \frac{2,04}{31,31} \left(\frac{t}{31,31}\right)^{1,04} e^{-\left(\frac{t}{31,31}\right)^{2,04}}.$$

Площадь арматуры, подверженной коррозии в любой момент времени, определяется следующим образом [12]:

$$A_s = A_{s,0} \left(1 - \frac{2}{d} C_3 t^m\right),$$

где d – диаметр рабочей арматуры, мм; C_3 – скорость коррозии арматуры, в интервале 0,08–0,3 мм/год; m – показатель степени коррозии, в интервале 0,3–0,5; t – время от начала коррозии до текущего или прогнозируемого; $A_{s,0}$ – площадь арматуры, не подверженная коррозии.

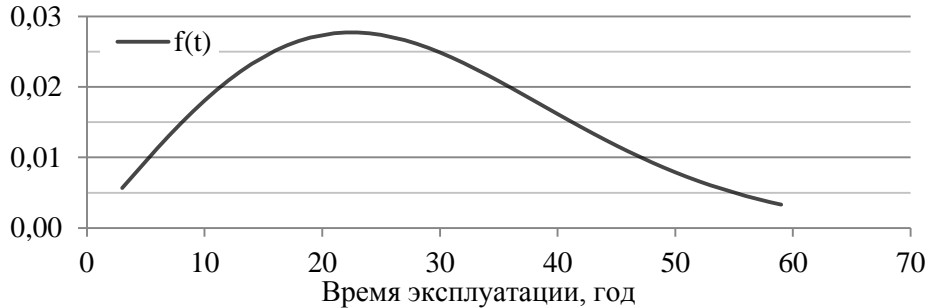


Рис. 4. Плотность распределения вероятности периода инициации коррозии T_1

Условие потери 10 % площади арматуры:

$$\frac{2}{d} C_3 T_4^m \geq 0,1.$$

Таким образом, время от начала развития коррозии до потери 10 % площади арматуры определяется следующим способом:

$$T_4 = \left(\frac{0,05d}{C_3} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

3. Время перехода из состояния S_0 в S_5 может быть определено:

$$T_{0-5} = T_1 + T_5,$$

где T_5 – продолжительность развития коррозии до потери такой площади арматуры, при которой предельное усилие в элементе станет равным усилию от поездной нагрузки без учета динамического коэффициента $1 + \mu = 1,0$.

В состоянии S_5 пропуск нагрузки невозможен.

В заключение отметим, что железобетонные пролетные строения на сети железных дорог эксплуатируются в самых различных по сочетанию климатических зонах и в разной степени подвержены воздействию негативных факторов внешней среды, что особенно необходимо учитывать при определении остаточного срока службы железобетонных пролетных строений.

Предложенная методика позволяет учесть расположение сооружения (климатическим коэффициентом или статистическим распределением, характерным для соответствующей климатической зоны), наличие имеющихся неисправностей и определить вероятность изменения состояния сооружения по нескольким сценариям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Актуганов И.З.* Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетона строительных конструкций. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2005. 76 с.

2. *Бокарев С.А., Ефимов С.В.* О нормировании высоты продольного борта железобетонных пролетных строений с ездой на балласте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2. С. 10–19.
3. *Васильев А.И.* Оценка технического состояния мостовых сооружений. М.: КНОРУС, 2017. 256 с.
4. *Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации* / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». М., 2006. 120 с.
5. *Иосилевский Л.И.* Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. М.: Науч.-изд. центр «Инженер», 1999. 295 с.
6. *Иосилевский Л.И., Федулов И.В.* Прогнозирование сроков службы железобетонных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 1997. № 8. С. 11–14.
7. *Левин Б.Р.* Справочник по надежности. Т. 1 / под ред. Б.Р. Левина. М.: Мир, 1969. 339 с.
8. *Мамажанов Р.К.* Основы теории прогнозирования ресурса железобетонных мостов для Средней Азии: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.11; ЦНИИС. М., 1989. 41 с.
9. *Орлов А.И.* Математика случая. Вероятность и статистика – основные факты. М.: МЗ-Пресс, 2004. 110 с.
10. *Чирков В.П.* Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций. М.: Маршрут, 2006. 620 с.
11. *Чирков В.П., Клюкин В.И., Федоров В.С., Швидко Я.И.* Основы теории проектирования строительных конструкций. Железобетонные конструкции / под ред. В.П. Чиркова. М., 1999. 376 с.
12. *Шестериков В.И.* Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. М.: Росавтодор, 2002. 140 с.
13. *Muraleedharan G., Soares C.G.* Characteristic and Moment Generating Functions of Generalised Pareto (GP3) and Weibull Distributions // Journal of Scientific Research and Reports. 2014. Т. 3 (14). P. 1861–1874.
14. *Kristaps Gode.* Predicting the Service Life of Concrete Bridges Based on Quantitative Research. Construction Science 2014/15: Riga Technical University, 2014.
15. *Rostam S.* Service life design of concrete structures – a challenge to designers as well to owners // Asian Journal of Civil Engineering, Tehran: Building and Housing Research Center. 2005. V. 6.

REFERENCES

1. *Aktuganov I.Z.* Metodika otsenki vliyaniya klimaticheskikh temperaturno-vlazhnostnykh vozdeystvii na ekspluatatsionnyu nadezhnost' i dolgovechnost' betona stroitel'nykh konstruktssii [Climatic conditions effect on structural concrete durability]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2005. 76 p. (rus)
2. *Bokarev S.A., Efimov S.V.* O normirovaniy vysoty prodol'nogo borta zhelezobetonnykh proletrykh stroeniy s ezdoi na ballaste [Height normalizing of lengthwise side of reinforced concrete superstructures under moving load]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016. No. 2. Pp. 10–19. (rus)
3. *Vasil'ev A.I.* Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh sooruzheniy [Technical conditions of bridge structures]. Moscow: KNORUS, 2017. 256 p. (rus)
4. *Instruktsiya po otsenke sostoyaniya i soderzhaniya iskusstvennykh sooruzheniy na zheleznykh dorogakh Rossiiskoi Federatsii* [Estimation and maintenance of artificial railroad constructions in the Russian Federation]. Moscow: Departament puti i sooruzheniy OAO 'RZhD'. 2006. 120 p. (rus)
5. *Iosilevskii L.I.* Prakticheskie metody upravleniya nadezhnost'yu zhele-zobetonnykh mostov [Practical methods of reliability managing of steel bridges]. Moscow: 'Inzhener' Publ., 1999. 295 p. (rus)
6. *Iosilevskii L.I., Fedulov I.V.* Prognozirovaniye srokov sluzhby zhele-zobetonnykh proletrykh stroeniy [Lifetime prediction of steel superstructures]. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 1997. No. 8. Pp. 11–14. (rus)
7. *Levin B.R. (Ed.)*. Spravochnik po nadezhnosti. Moscow: Mir, V. 1. 1969. 339 p. (rus)

8. *Mamazhanov R.K.* Osnovy teorii prognozirovaniya resursa zhelezobetonnykh mostov dlya Srednei Azii: avtoref. dis. ... d-ra. tekhn. nauk [Fundamentals of theory of predicting steel bridge service life in Central Asia. DSc Abstract]. Moscow: TsNIIS Publ., 1989. 41 p. (rus)
9. *Orlov A.I.* Matematika sluchaya. Veroyatnost' i statistika – osnovnye fakty [variation mathematics. Probability and statistics – main facts]. Moscow: MZ-Press, 2004. 110 p. (rus).
10. *Chirkov V.P.* Prikladnye metody teorii nadezhnosti v raschetakh stroi-tel'nykh konstruksii [Applied methods of reliability theory in structural analysis]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 620 p. (rus)
11. *Chirkov V.P., Klyukin V.I., Fedorov V.S., Shvidko Ya.I.* Osnovy teorii proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii. Zhelezobetonnye konstruksii [Design theory of reinforced concrete structures]. V.P. Chirkov, Ed. Moscow, 1999. 376 p. (rus)
12. *Shesterikov V.I.* Metodika raschetnogo prognozirovaniya sroka sluzhby zhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov [Estimated prediction of steel bridge service life]. Moscow: Rosavtodor Publ., 2002. 140 p. (rus)
13. *Muraleedharan G., Soares C.G.* Characteristic and moment generating functions of generalised pareto (GP3) and weibull distributions. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2014. V. 3. No. 14. Pp. 1861–1874.
14. *Kristaps Gode.* Predicting the service life of concrete bridges based on quantitative research. *Construction Science*. 2014 DOI: 10.2478/cons-2014-0002.
15. *Rostam S.* Service life design of concrete structures – a challenge to designers as well to owners. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2005. V. 6.

Сведения об авторах

Бокарев Сергей Александрович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, BokarevSA@stu.ru

Прибытков Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, pss@stu.ru

Ефимов Стефан Васильевич, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, esv@sgups.net

Authors Details

Sergey A. Bokarev, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, D. Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, BokarevSA@stu.ru

Sergey S. Pribytkov, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, D. Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, pss@stu.ru

Stefan V. Efimov, Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, D. Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, esv@sgups.net