

УДК 624.21.09.042.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181

В.М. КАРТОПОЛЬЦЕВ¹, А.В. КАРТОПОЛЬЦЕВ¹, А.А. АЛЕКСЕЕВ²,
¹ООО «ДИАМОС»,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Аннотация. В условиях возрастающего воздействия временной подвижной нагрузки происходит преждевременный износ конструкций пролетных строений мостов, снижается эксплуатационная прочность и долговечность.

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся динамической надежности несущих элементов пролетных строений в рамках обеспечения сохранности качества конструкций в процессе эксплуатации с учетом возможных дефектов и перегрузок. Надежность рассматривается в рамках случайных событий и процессов на основе закономерностей возможного выхода пролетных строений за предел «исправных».

На основе статистических динамических характеристик пролетных строений рассматриваются элементы параметрической и структурной надежности на основе теории вероятности и математической статистики, а также теории случайных чисел.

Теория динамической надежности характеризуется как качество, развернутое во времени. Рассматривая эффект вариации нагрузок, действующих в течение длительного времени, можно прогнозировать возможность изменения ресурсов и отказов в работе сооружения. Аппроксимируя условия динамической надежности на основе кривых распределения Гаусса и Вейбулла, можно представить математические выражения условия неразрушимости конструкции. Рассмотрены положения, определяющие наступление отказов в работе пролетных строений, с учетом возможных вариантов перегрузки по принципу случайных выбросов.

Ключевые слова: пролетное строение, надежность, нагрузки, прогнозирование, отказ, прочность, долговечность

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу прогнозирования динамической надежности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 170–181.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181

V.M. KARTOPOLTSEV¹, A.V. KARTOPOLTSEV¹, A.A. ALEKSEEV²,
¹ООО “DIAMOS”,

²Tomsk State University of Architecture and Building

TOWARDS PREDICTING DYNAMIC RELIABILITY OF BRIDGE SPANS

Abstract. In conditions of increasing impact of temporary live load, a premature wear of bridge superstructures occurs, operational strength and durability decrease. The paper discusses the dynamic reliability of the load-bearing elements of superstructures within the frame of ensuring the structure safety during operation, with regard to defects and overloads. Reliability is considered within the framework of random events and processes based on the possible superstructure exit beyond its serviceability based on the statistical dynamic properties. The par-

ametric and structural reliability is considered. Based on the mathematical statistics and random numbers theories, the dynamic reliability theory is characterized by the quality deployed in time. The effect of load variation for a long time is considered. The possibility is predicted for changing resources and structure failure. The dynamic reliability conditions are approximated based on the Gauss and Weibull distribution curves. Mathematical expressions are given to the structure indestructibility. The superstructure failure is considered with respect to possible overload using the principle of accidental release.

Keywords: superstructure, reliability, load, prediction, failure, strength, durability

For citation: Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A. K voprosu prognozirovaniya dinamicheskoi nadezhnosti proletrykh stroenii mostov [Towards predicting dynamic reliability of bridge spans]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 6. Pp. 170–181.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181

Теория надежности определяет свойства объекта сохранять долговечность и работоспособность до наступления отказа. Для пролетных строений мостов основным критерием надежности является срок службы. Под изменяющимся воздействием подвижной временной нагрузки, климатических и других факторов в несущих элементах пролетного строения появляются и развиваются деструктивные дефекты, изменяющие проектные и нормативные эксплуатационные регламентные нормативы сроков службы сооружения. Каждый отмеченный фактор дефектности рассматривается как случайное событие в рамках вероятностных методов оценки надежности с учетом морального износа конструкций. Исходя из статистических данных метода оценки надежности, на основе учета закономерностей выхода пролетного строения в целом или его элементов из числа «исправных», в зависимости от срока эксплуатации, выявлена зависимость выхода конструкций за предел «исправных» (рис. 1) [1–3].

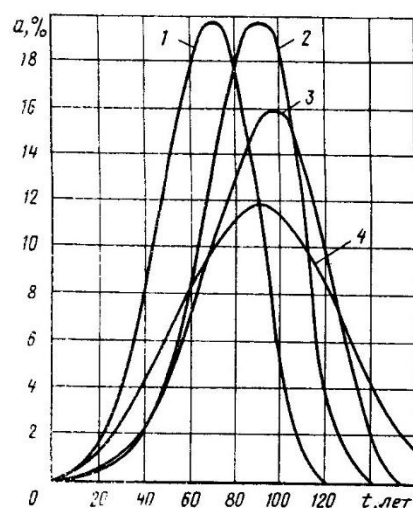


Рис. 1. Изменения частоты выхода из эксплуатации a в зависимости от срока службы t : 1, 2 – металлические пролетные строения до 25 и более; 3 – железобетонные пролетные строения; 4 – опоры мостов

Таким образом, выходом пролетных строений мостов из эксплуатации под воздействием подвижных временных нагрузок можно установить зависимости интенсивности выхода за предел «исправных» с определением срока службы, а также изменения ресурсов мостовых сооружений.

На основе статистических динамических характеристик пролетных строений от воздействия внешних факторов, особенностей колебательного процесса и амплитудно-частотных характеристик можно оценить структурную и параметрическую надежность в условиях случайных процессов, какими являются гармонические колебания, обеспечивающие устойчивые значения амплитудно-частотных характеристик пролетных строений. В связи с этим под динамической надежностью понимается свойство конструкции пролетного строения моста сохранять во времени в установленных пределах значения всех динамических параметров, характеризующих способность отвечать функциональным требованиям при воздействии временной подвижной нагрузки, обеспечивающих долговечность и безопасность эксплуатации.

Проблема надежности транспортных сооружений относится к числу основных направлений в мостостроении для обеспечения высокой эффективности работы и гарантированных сроков службы и безопасности [4]. Академик А.И. Берг неоднократно подчеркивал огромное значение проблемы надежности для мостов в целом, выделял специфические черты их эксплуатации, а также отмечал отсутствие фундаментальных исследований в этом направлении.

В настоящее время исследования надежности, особенно при динамическом нагружении, носят противоречивый характер и не в полной мере отвечают современным требованиям. Общеизвестно, что теория надежности транспортных сооружений не может быть представлена в отрыве от теории вероятностей и математической статистики, теории случайных чисел. Таким образом, надежность – это качество, развёрнутое во времени. В конечном итоге надежность пролетных строений мостов определяется математической вероятностью того, что мост будет функционировать заданным образом.

Задачу исследования надежности конструкций мостов в условиях динамического нагружения целесообразно рассматривать в двух плоскостях – статистической надежности и функциональности. Общим фактором в решении задачи является эффект вариации перегрузок, действующих и распространяющихся на пролетное строение в течение длительного срока эксплуатации.

Узловой проблемой теории надежности является прогнозирование ресурсов и отказов пролетных строений в условиях возрастающей активности действия временных подвижных нагрузок.

Динамическая надежность есть вероятность того, что мостовое сооружение выполняет свои функции безотказности, долговечности, сохраняемости заданных динамических показателей в соответствии с предъявляемыми требованиями в течение нормативного интервала времени [5–7] и связана с нахождением вероятности средних значений и распределением вероятности.

Возрастающее воздействие временной подвижной нагрузки обуславливает высокий уровень неопределенности эксплуатационных ситуаций и возможность отказов. Как правило, причиной ранних отказов пролетных строений мостов по динамическим параметрам являются недостатки и ошибки проектиро-

вания без учета возрастающего воздействия временных подвижных нагрузок и изменения динамических характеристик в процессе реальной эксплуатации.

В теории надежности отказ трактуется как утрата качества при определенном динамическом предельном состоянии конструкции пролетного строения моста. Трактовка отказа как случайного процесса положена в основу надежности, сформулированную в свое время профессором В.В. Болотиным. За меру надежности любой системы принимается вероятность случайного события, состоящего в том, что в течение всего установленного срока эксплуатации не произойдет ни одного отказа [8, 9]. Данное обстоятельство является подтверждением того, что динамическая работа пролетного строения моста рассматривается как случайный процесс, а проявление при этом предельного состояния следует рассматривать как случайный выброс из области допустимых состояний. Таким образом, динамическая надежность пролетного строения как система необходима для описания качества несущих элементов, которая соответствует предельному состоянию и предельным параметрам.

Основное условие динамической надежности аппроксимируется выражением

$$R = r - Pq \geq 0, \quad (1)$$

где r – предел прочности конструкции пролетного строения, кг/см²; Pq – предельная динамическая нагрузка, кг/см².

Параметры r и Pq подчиняются гауссовскому распределению и определяются в соответствии с показателями $y(x)$ для нагрузки и прочности сооружения на основе кривых распределения (рис. 2) [10].

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}.$$

Тогда условие целостности конструкции пролетного строения моста будет иметь вид:

$$K \cdot S_{\text{расч}} \leq K \cdot S_{\text{норм}}, \quad (2)$$

где $K \cdot S_{\text{расч}}$ соответствует Pq ; $K \cdot S_{\text{норм}}$ соответствует r .

Обозначим вероятность динамического разрушения конструкции пролетного строения – V , ω_1 – значение прочности конструкции, ω_2 – предельное значение динамической нагрузки. Тогда условие необеспеченности динамической надежности имеет вид:

$$\omega_1 \cdot \omega_2 < V. \quad (3)$$

Обозначим $r/Pq = U$ и, учитывая, что $R = r - Pq$, условие неразрушимости конструкции от динамического воздействия нагрузки запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} V &= \int_0^1 Pq \cdot du = \int_0^1 Pq(\chi); \\ V &= 1 - \omega_1 \cdot \omega_2. \end{aligned} \right| \quad (4)$$

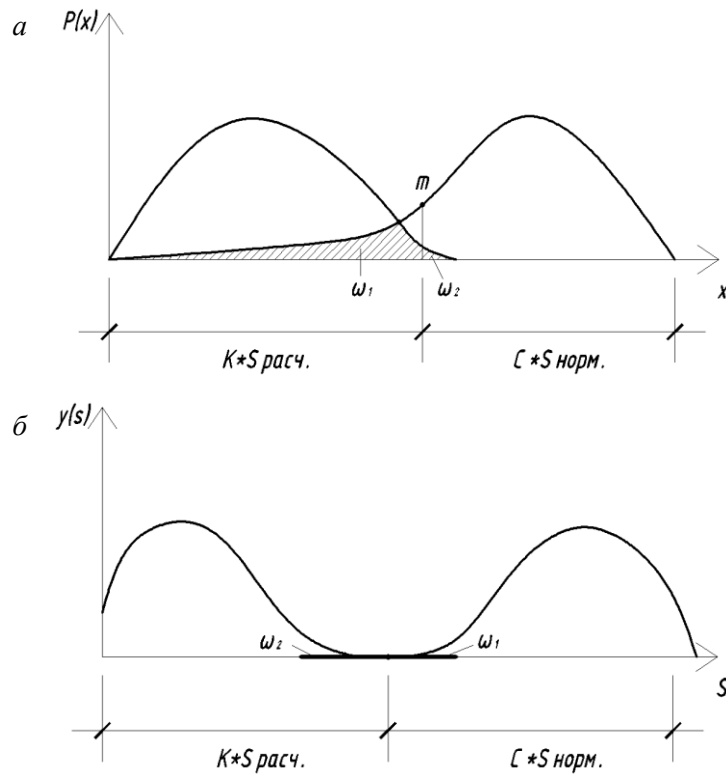


Рис. 2. Кривые распределения Гаусса:

a – плотность распределения силового фактора S ; b – среднеквадратичные отношения соответственно силы и прочности

На основании кривых графика (рис. 2) и выражений (2), (4) Н.С. Стрелецкий [11] предложил коэффициент безопасности неразрушимости конструкций в виде

$$\gamma = \frac{\alpha_{\text{расч}} \alpha_{\text{норм}}}{\sqrt{\sigma_{\text{расч}}^2 + \sigma_{\text{норм}}^2}} > 1, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{расч}}$ – центр кривой $K \cdot S_{\text{расч}}$; $\alpha_{\text{норм}}$ – центр кривой $C \cdot S_{\text{норм}}$; $\sigma_{\text{расч}}$, $\sigma_{\text{норм}}$ – соответствующие стандарты кривой распределения.

Так для пролетных строений металлических мостов из стали 15ХСНД

$$\alpha_{\text{расч}} = 0,25, \quad \alpha_{\text{норм}} = 0,083, \quad \sigma_{\text{расч}}^2 = 0,04, \quad \alpha_{\text{норм}} = 0,09, \quad \beta = \frac{m_{\text{тр-та}}}{m_{\text{пр. стр}}} \approx 0,5.$$

Согласно формуле (5) $\gamma = 4,2$, условие неразрушимости конструкции выполняется.

Таким образом, динамическую надежность конструкций пролетных строений с математической точки зрения можно трактовать как вероятность нахождения трактующих динамических характеристик системы в некоторой допустимой области кривых (см. рис. 1) [12].

Представляя изменения воздействия временных подвижных нагрузок как изменяемый случайный характер безотказности работы конструкций моста функция времени (t) будет характеризоваться расчетным показателем и его предельным значением $R(t)$.

Возможное наступления отказов работы конструкций в течение или по истечении расчетного периода можно прогнозировать с вероятностью

$$\Pi_t(t) = R(t) - R_{cp}(t), \quad (6)$$

где t – срок эксплуатации пролетного строения моста; $R_{cp}(t)$ – средняя величина расчетных значений прочности материала.

В свою очередь, рассматривая $R_{cp}(t)$ и нагрузку Pg случайными величинами, среднее ожидаемое число отказов и вероятность отказов связаны неравенством

$$P_i(t) \leq H_i(t) \leq P_i(t)(1 - P_i(t)), \quad (7)$$

где $H_i(t)$ – среднее ожидаемое число возможных отказов в расчётный период t , $t = \frac{P}{1-P}$. Например: при $P = 0,1; 0,3; 0,6; 0,8$ вероятности отказов в течение $t = 10$ лет и число возможных отказов равно:

$$P_{10} = 1 - (1 - P_1)^{10} = 1 - 0,409 = 0,591.$$

При $t = 20$ лет $P_1 = 0,3 P_{20} = 0,751$.

Среднеожидаемое число возможных отказов будет:

$$H = P_i \cdot m = 0,159, \quad 0,59 < H_i < 0,75. \quad (8)$$

Если $\gamma = \frac{\alpha_{срасч} - \alpha_{снорм}}{\sqrt{\sigma_{срасч}^2 + \sigma_{снорм}^2}} = \frac{R(t)}{R_{cp}(t)}$, то нормативное значение коэффициента

безопасности неразрушимости конструкции пролетного строения моста является коэффициентом динамической прочности. Тогда показатель $H_i(t)$ можно представить как среднее ожидаемое число превышений случайных величин, адекватных функции средней величины предела прочности материала элементов конструкции в зависимости от рассматриваемого уравнения безопасности динамического напряженно-деформированного состояния сечения несущих балок. По понятным причинам динамическая безопасность пролетных строений будет определяться совокупностью критериев надежности (безопасности), участвующих в работе несущих элементов конструкций, их соединений, а также предельных значений динамических характеристик [13, 14].

Рассматривая нагрузку системы «пролетное строение + автомобиль» в виде эквивалентной нагрузки системы расчета вероятности безотказной работы пролетного строения по прочности, основанную на определении коэффициента вариации безотказной работы V_σ

$$V_{\sigma} = \frac{\sigma_{Rcp}(t)K_i}{\sigma_{\max}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{Rcp}(t)$ – среднестатистическое значение предела прочности материала; $\sigma_{\max}$ – среднее значение максимального напряжения; при упругой работе материала конструкции $\sigma_{\max} = R$, при упругопластической работе $\sigma_{\max} = \sigma_m$; K_i – среднее значения коэффициента долговечности, равное

$$K_i = \sqrt[m]{\frac{M_{\max}}{M_{\min}}} \geq 1, \quad (10)$$

где m – показатель степени кривой « σ – ε » [15].

Тогда в качестве признака безотказности работы конструкции пролетного строения при динамическом нагружении служит выражение (7), где $P_i(t)$, согласно уравнению Вейбулла, в виде

$$P_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (11)$$

где $b = m$; $a = t^{1/m}$; t – нормативное значение срока службы пролетного строения.

При $t_0 < t$ выражение (11) принимает вид

$$P_i(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^m}{t_0^m}}. \quad (12)$$

Оценку величины риска возможного отказа пролетного строения следует рассматривать в направлении, когда предельное динамическое напряжение σ_g в балке пролетного строения равно или меньше значения R при аналогичной вероятности того, что значения временной подвижной нагрузки $P_{вр}$ равно или больше некоторого значения $P_{вр}^{\max}$, распределенного по длине балки $L(x)$.

Вероятность отказа пролетного строения от динамического воздействия представим в виде

$$\Pi = \int_0^{\infty} R \cdot L(x) dx. \quad (13)$$

Среднестатистическое нагружение будет расположено по длине балки между $P(x) \rightarrow \max$ и $Q(x) \rightarrow \min$ при $P(x) = (1 - Lx)$ и $Q(x) = 1 - P_{вр}^{\max}$. Тогда формула вероятного отказа будет иметь вид

$$1 - \Pi = \int_0^{\infty} P(x) Q(x) dx. \quad (14)$$

Чтобы обеспечить требуемый уровень надежности, равный 0,95, необходимо выполнение зависимости

$$\sigma_g > 1,2 R. \quad (15)$$

Учитывая, что динамическая прочность материала элементов пролетных строений уменьшается со временем t за счет процесса старения, можно утверждать, что риск воздействия временной нагрузки $P_{вр}$, вызывающей динамические напряжения, превышающие σ_g , со временем возрастает. Тогда отказ работы пролетного строения произойдет в тот момент, когда количество энергии, запасенной путем колебательного процесса, превзойдет критическое значение прочности материала. Таким образом, прочность материала конструкции есть значение внешней динамической нагрузки, при которой происходит отказ. В этом случае справедливо уравнение долговечности [16]:

$$t = \frac{1}{k^{\parallel}} \left(\ln R - \ln P_{вр} \right) e^{\frac{-E_a}{R_E}}, \quad (16)$$

где t – срок безотказной службы в годах; $P_{вр}$ – эквивалентная нагрузка; R – нормативная прочность материала; E_a – энергия активации; R_E – энергия реак-

ции балки; $k^{\parallel} = K_i \cdot e^{\frac{-E_a}{R_E}}$ – константа, зависящая от материала.

Воздействие случайного транспортного потока является источником вероятной динамической нагрузки элементов пролетного строения. Вероятность появления перегрузок в течение нормативного срока службы мостов указывает на возможность преждевременного отказа работы пролетного строения. Перегрузки практически всегда возникают в малые промежутки времени dt . Тогда вероятность наступления отказа за счет перегрузки характеризуется выражением

$$P_i^c(t) = dt \int_0^{\infty} P_i(t, V_{\sigma}) V_{\sigma} \cdot dV, \quad (17)$$

где dt – интервал времени возможного отказа; $\int_0^{\infty} P_i(t, V_{\sigma}) V_{\sigma}$ – интеграл математического ожидания [11, 17].

Рассматривая реальный срок службы пролетного строения T , необходимо определить возникновение и уровень перегрузок, которые могут вызвать отказы в работе сооружений в течение времени T . Разбивая на промежутки T (T_1 T_2 T_3 T_n), определим время и период перегрузки в виде $0 < T_i < \Delta$; $n_i = T / l_i$.

Появление перегрузки в течение T определяется коэффициентом вероятности K_V , равным

$$K_V = \frac{\alpha \cdot T_p}{\Delta}, \quad (18)$$

где T_p – время, в течение которого могут возникнуть перегрузки; $\alpha = \frac{\Delta}{T}$; Δ – время действия перегрузки; T – промежуток времени, в котором происходит перегрузка.

Рассматривая в качестве перегрузки скопление автотранспорта на мосту, проезд транспорта в виде случайного сверхнормативного и сверхрасчетного нагружения, несанкционированный проезд нагрузки увеличенной грузоподъемности в течение коротких сроков их появления от часа до одного месяца, вероятность перегрузки в момент T запишем по формуле Байеса [18, 19]:

$$V_c = \frac{\alpha(1-b)}{1-\alpha}. \quad (19)$$

Обозначим $I = \frac{\alpha}{\Delta}$ – вероятность плотности появления перегрузки. Рассмотрим случай, когда при $t = 0, t_1, t_2, t_3, nt_i = T$ перегрузки нет, но она появляется в период $t = t_1$. Тогда $V_c^{t_i} = I \cdot T = \frac{\alpha T_p}{\Delta} = \alpha \cdot n$. Если $V_c = \alpha \cdot n$, то $n = \frac{T_p}{t_i}$.

Вероятность отказа в работе пролетного строения за счет перегрузки характеризуется выражением

$$1 - \Pi = (1 - \alpha) \left[1 - V_c^{t_i} \right]^{T_p / t_i}. \quad (20)$$

Заключение

В рамках случайных динамических колебаний балок пролетных строений с малой диссипацией оценку надежности конструкций целесообразно проводить с использованием теории выбросов случайных функций динамической надежности колеблющейся системы «пролетное строение + автомобиль» как узкополосный случайный процесс с медленно изменяющимися случайными амплитудно-частотными характеристиками и фазами смещения форм колебаний, для которых справедлива зависимость

$$P_i \approx 1 - N(t), \quad (21)$$

где $N(t)$ – математическое ожидание числа случайных выбросов компонент колебания; $P_i(t)$ – характеристические функции плотности вероятности отказов на отрезке времени t .

Принимаем за нормативное значение динамической надежности некоторое число, зависящее от времени и заданной в функции $P_i(t)$ на интервале времени $t_0 \leq t \leq T_p$, для которого необходимо выполнение равенства

$$P_i(t) = P_i^H(t), \quad (22)$$

где $P_i^H(t)$ – нормативное значение параметра надежности.

Рассмотрели обеспечение надежности как технико-экономическую задачу, решение которой в конечном итоге сводится к отысканию минимума в выражении [20]:

$$C = C_0(P_i^H(t) + C_1(P_i^H(t)(1 - P_i^H(t))) \rightarrow 0, \quad (23)$$

где C_0 – начальная стоимость сооружения; C_1 – сумма расходов, связанная с выводом пролетных строений моста за предел «исправных».

Рассматривая C_1 как функцию долговечности моста при выводе за предел «исправных», формулу (23) можно записать в виде:

$$C = C_0 + C_1 \cdot T_{\text{пр}}, \quad (24)$$

где $T_{\text{пр}}$ – предельный срок службы пролетных строений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечаев Ю.П. Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений : сб. научных трудов. ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1989. С. 67–72.
2. Добромыслов А.И. Исследование надежности конструктивных систем // Промышленное строительство. 1989. № 12. С. 20–22.
3. Gaal G., Veen C., Djorai M. Prediction of concrete bridges in the Netherlands // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Барселона, 2002. 6 р.
4. Межнякова А.В., Овчинников И.Г., Пиеничкина В.А. Оценка надежности железобетонных элементов конструкций мостовых сооружений. Саратов, 2006. 65 с.
5. Берлоу Р., Прошан Ф. Математические теории надежности : пер. с англ. / под ред. Б.В. Гнеденко. Москва, 1969. 488 с.
6. Колчин К.Б. Расчет прочности и надежности строительных сооружений (Современный подход). Кишнев : Изд-во Картя Молдовенскэ, 1976. 85 с.
7. Stewart M., Estes A., Frangoopol D. Bridge deck replacement strategies and life-cycle cost analyses under multiple limit states // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Барселона, 2002. 6 р.
8. Муллер Р.А. Вероятность достижения предельного состояния конструкций и взаимозависимость коэффициентов однородности и перегрузки // Вопросы безопасности и прочности строительных конструкций. Москва : Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1952. С. 119–137.
9. Li Y., Vrouwenvelder T. Probabilistic inspection and maintenance for concrete bridge structures // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Барселона, 2002. 6 р.
10. Болотин В.В. Применение метода теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1971. 105 с.
11. Ржаницын А.П. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 229 с.
12. Болотин В.В., Гольденблат И.И., Смирнов А.Ф. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. Москва : Изд-во литературы по строительству, 1972. 180 с.
13. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. Москва : Высшая школа, 1988. 234 с.
14. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures // Proceedings on First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Барселона, 2002. 7 р.
15. Справочник по надежности. Т. I. Москва : Мир, 1969. 229 с.
16. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчёт долговечности. Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. 231 с.
17. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. Москва : Изд-во АСВ, 1998. 302 с.
18. Tanner P., Ortega L. Reducing Intervention Time and Costs by Applying Reliability Analysis // Safety, risk, reliability – trends in engineering. Мальта, 2001. 8 р.
19. Хог Э., Арора Ф. Прикладное оптимальное проектирование. Москва : Мир, 1983. 479 с.
20. Дривинг А.Я. К определению числовых характеристик надежности конструкций сооружений с чисто экономической ответственностью // Проблемы надежности в строительной механике. Вильнюс : РИНТИП, 1968. 32 с.

REFERENCES

1. *Nechaev Yu.P.* Dolgovechnost' iskusstvennykh sooruzhenii [Durability of artificial structures]. In: *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' iskusstvennykh sooruzhenii. Sbornik nauchnykh trudov (Coll. Papers 'Operational Reliability of Man-Made Structures')*. Moscow, Transport, 1989. Pp. 67–72. (rus)
2. *Dobromyslov A.I.* Issledovanie nadezhnosti konstruktivnykh sistem [Reliability of structural systems]. *Promyshlennoe stroitel'stvo*. 1989. No. 12. Pp. 20–22. (rus)
3. *Gaal G., Veen C., Djorai M.* Prediction of concrete bridges in the Netherlands. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Barselona, 2002. 6 p.
4. *Mezhnyakova A.V., Ovchinnikov I.G., Pshenichkina V.A.* Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh elementov konstruktii mostovykh sooruzhenii [Reliability assessment of reinforced concrete elements of bridge structures]. Saratov, 2006. 65 p. (rus)
5. *Barlow R., Proschan F.* Matematicheskaya teoriya nadezhnosti [Mathematical theory of reliability], B.V. Gnedenko, Ed., Moscow: Sovetskoe radio, 1969. 488 p. (transl. from Engl.)
6. *Kolchin K.B.* Rasschet prochnosti i nadezhnosti stroitel'nykh sooruzhenii. (Sovremennyy podkhod) [Strength analysis of buildings]. Kishenev: Kartya Moldovenske, 1976. 85 p. (rus)
7. *Stewart M., Estes A., Frangoopol D.* Bridge deck replacement strategies and life-cycle cost analyses under multiple limit states. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Barselona, 2002. 6 p.
8. *Muller R.A.* Veroyatnost' dostizheniya predel'nogo sostoyaniya konstruktii i vzaimozavisimost' koefitsientov odnorodnosti i peregruzki [Probability of reaching the limit state of structures and interdependence of homogeneity and overload coefficients]. *Voprosy bezopasnosti i prochnosti stroitel'nykh konstruktii*. Moscow: Stroiizdat, 1952. Pp. 119–137. (rus)
9. *Li Y., Vrouwenvelder T.* Probabilistic inspection and maintenance for concrete bridge structures. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Barselona, 2002. 6 p.
10. *Bolotin V.V.* Primenenie metoda teorii veroyatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii [Probability and reliability theories in structural design]. Moscow: Stroiizdat, 1971. 105 p. (rus)
11. *Rzhanitsyn A.P.* Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktii na nadezhnost' [Theoretical calculation of reliability of building structures]. Moscow: Stroiizdat, 1978. 229 p. (rus)
12. *Bolotin V.V., Gol'denblat I.I., Smirnov A.F.* Stroitel'naya mekhanika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Construction mechanics. Current state and prospects for development]. Moscow: Stroiizdat, 1972. 180 p. (rus)
13. *Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z.* Nadezhnost' mashin [Machine reliability]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 234 p. (rus)
14. *Thoft-Christensen P.* Deterioration of concrete structures. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Barselona, 2002. 7 p.
15. *Spravochnik po nadezhnosti* [Reliability handbook]. Vol. 1, Moscow: Mir, 1969. 229 p. (rus)
16. *Khevilend R.* Inzhenernaya nadezhnost' i raschet dolgovechnosti. Moscow; Leningrad: Energiya, 1966. 231 p. (rus)
17. *Raizer V.D.* Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii [Reliability theory in construction design]. Moscow: ASV, 1998. 302 p. (rus)
18. *Tanner P., Ortega L.* Reducing intervention time and costs by applying reliability analysis. In: *Safety, risk, reliability trends in engineering*. Malta, 2001. 8 p.
19. *Khog E., Arora F.* Prikladnoe optimal'noe proektirovanie [Applied optimal design]. Moscow: Mir, 1983. 479 p. (rus)
20. *Driving A.Ya.* K opredeleniyu chislovykh kharakteristik nadezhnosti konstruktii sooruzhenii s chisto ekonomicheskoi otvetstvennost'yu [Numerical characteristics of structural reliability with economic responsibility]. In: *Problemy nadezhnosti v stroitel'noi mekhanike*. Vilnius, 1968, 32 p. (rus)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной 24/1, diamos@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, alekseev10@yandex.ru

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Audrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru