

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

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 1. С. 194–202.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (1): 194–202.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.014.072

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202

EDN: TMXROP

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НЕСУЩИХ БАЛОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ

Владимир Михайлович Картопольцев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев²

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

²*ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Многокритериальное прогнозирование эксплуатационной надежности несущих элементов пролетных строений мостов на основе комплексного применения механических и энергетических критериев, а также элементов теории катастроф определяет актуальность проблемы.

Многокритериальное прогнозирование надежности несущих элементов пролетных строений мостов представляет собой расширение использования элементов теории катастроф на основе механических и энергетических критериев.

Цель: рассмотреть многокритериальное прогнозирование надежности мостовых конструкций в процессе термодинамического состояния и приспособляемости материала, элементов и конструкций в целом в течение длительного эксплуатационного периода.

Результаты: на основе равновесных состояний, характеризующих и сопровождающих мгновенность деформационно-катастрофического процесса, определены управляющие параметры процесса прогнозирования надёжности.

Ключевые слова: надежность, критерии, балка, случайные величины, прочность, пролетное строение, нагрузка

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Многокритериальное прогнозирование эксплуатационной надежности несущих балок металлических мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 194–202. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202. EDN: TMXROP

ORIGINAL ARTICLE

MULTI-CRITERIA PREDICTION OF SERVICE RELIABILITY OF LOAD-BEARING BEAMS OF METAL BRIDGES

Vladimir M. Kartopoltsev¹, Andrey V. Kartopoltsev²

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. Multi-criteria prediction of the service reliability of load-bearing elements based on the application of mechanical and energetic criteria and theory of catastrophes, determines the relevance of the study. Multi-criteria prediction of the service reliability of load-bearing elements of bridge spans is an expansion of understanding and use of elements of catastrophe theory based on mechanical and energy criteria.

Purpose: The aim of this work is to consider multi-criteria prediction of the service reliability of bridge structures in thermodynamic state and adaptability of the material, elements and structures as a whole during a long operational period.

Research findings: Control parameters of the reliability forecasting process are determined based on equilibrium states, characterized and accompanying the instantaneousness of the deformation-catastrophic process.

Keywords: service reliability, criteria, beam, random variables, strength, span, load

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Multicriteria Prediction of Service Reliability of Load-Bearing Beams of Metal Bridges. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 194–202. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202. EDN: TMXROP

В условиях многокритериальности прогнозирования надежности конструкций мостов наблюдается скачкообразное изменение управляющих параметров функции, описывающей состояние элементов или конструкции балки в целом. Такой подход учитывает резервирование и восстановление с определением зависимости между числом управляющих параметров (например, вертикальной стенки в бистальной балке) и числом катастроф за счет выхода этого элемента за предел «исправных» [1]:

число управляющих параметров (*n*) 1, 2, 3
 число видов катастроф (*m*) 1, 2, 5

Примечание. *n*: 1 – параметр нагрузки; 2 – предельное состояние; 3 – задержка пластических деформаций и резервирование; *m*: 1 – частичная потеря несущей способности; 2 – достижение предельного состояния с частичной бифуркацией упругопластического состояния; 5 – поэлементный выход из работы – запредельное состояние – выход за предел «исправных».

Функция плотности вероятности распределения чувствительности элемента к состоянию при нормальном законе распределения со значением среднего квадратичного отклонения ($\bar{\sigma}$) графически представлена на рис. 1 [2, 3].

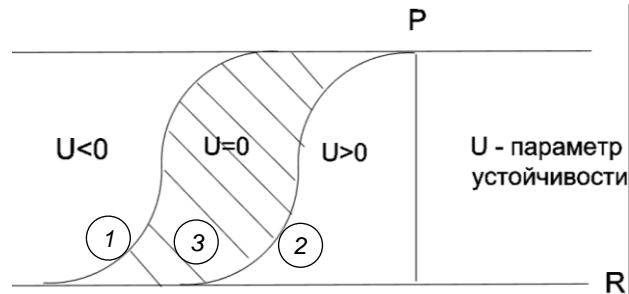


Рис. 1. Модель катастрофы элемента в зависимости от функции плотности распределения вероятности R :

1 – зона устойчивого состояния; 2 – зона неустойчивого состояния; 3 – зона опасности (возможного проявления несовершенств), характеризуемая коэффициентом γ_{ψ}

Fig. 1. Catastrophe model depending on the probability density function R :

1 – stable state zone; 2 – unstable state zone; 3 – zone of danger of possible manifestation of imperfections characterized by the coefficient γ_{ψ}

При составлении уравнения равновесия используется свойство потенциальной энергии, которое принимает в состоянии равновесия экстремальное значение $\Pi = \Pi_{\max}$, при этом, согласно постулату Лежёна Дирихле¹, устойчивому состоянию отвечает \min потенциальной энергии $U < 0$, неустойчивому – $\max U > 0$, расстояние между ними – постоянное или нулевое значение $U = 0$. При переходе из одного состояния в другое возникают качественно новые функциональные свойства системы:

- перераспределение напряжений;
- регулирование напряженно-деформированного состояния системы;
- самоорганизация процесса.

Самоорганизующаяся система – это система, которая без какого-то специфического воздействия извне приобретает новую пространственную, временную или функциональную структуру. Для стальных балок такой самоорганизующей силой может выступить упругопластическое деформирование.

Принципом, акцентирующим количественную сторону самоорганизации процесса, является принцип хрупкости аналитической оценки чувствительности к несовершенствам в форме трещинообразования, тем самым ограничивающий зону дискретной или континуальной устойчивости в цепочке событий «устойчивость – катастрофа» [4]. Тогда любое изменение надежности, определяемое отношением $\frac{\gamma_i}{\gamma_0} = -e^{\lambda \cdot t}$ к отношению прочностных свойств и нагруженности (R_i) для несущих балок, представляется функционалом несовершенства конструкции (ψ) в виде

¹ Дирихле П.Г.Л. Об устойчивости равновесия // Аналитическая механика. Том 1 / Ж. Лагранж. Москва; Ленинград: ГИТТЛ, 1950. 594 с.

$$\psi = 1 - \sqrt{k_{\phi} \cdot f \cdot \lambda_{Rt}}, \quad (1)$$

где λ_{Rt} – коэффициент прочности; f – параметр несовершенств элементов; k_{ϕ} – коэффициент формы сечения элемента [5, 6], равен $\frac{1}{\frac{A \cdot h^2}{4J} + 1}$ или:

- для двутаврового сечения – 0,63;
- для прямоугольного – 0,75.

В мостовых конструкциях параметр несовершенства адекватен коэффициенту повреждаемости $\psi \cong \varepsilon$, где ε – мера повреждаемости.

В этом случае вероятностная задача оценки меры чувствительности элемента балки к несовершенствам оценивается следующими значениями ψ : для балок двутаврового сечения $\psi = 0,7$; для балок коробчатого сечения $\psi = 0,3-0,6$. Решение задачи оценки чувствительности к проявлению несовершенств на основе случайных величин подчиняется условию «неустойчивость – переход к устойчивому состоянию» и представляет единый процесс количественной и качественной саморегуляции системы, сопровождающейся перестройкой из одного состояния надежности $P \approx 0,999$ $\psi = 1$ в другое $P \approx 0,69-0,70$ $\psi = 0,7$. Для изгибаемых элементов пролетных строений металлических мостов, в зависимости от предельного состояния, значение ψ рекомендуется определять по формуле

$$\psi = 1 - \frac{0,80}{(S \cdot \bar{\sigma})^{2/3}}, \quad (2)$$

где S – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и свойств материала: в упругой стадии работы $S = S_{\text{упр}} = 1 - 0,84 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$; в упругопластической

стадии $S = S_{\text{уп.пл}} = 1 - 0,84 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$.

При накоплении повреждений – фактор проявления несовершенств материала и конструкции при динамических воздействиях – функция разрушения будет записана в виде

$$\Phi_d = D_i - D_{(t)}, \quad (3)$$

где D_i – объем повреждений усталостного характера, вызывающих разрушение элемента; $D_{(t)}$ – накопление за время t повреждений.

При стационарном режиме динамического нагружения значение $D_{(t)}$ может быть представлено равенством [7]:

$$D_{(t)} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^{V_{i(t)}} \sigma_i^3, \quad (4)$$

где $V_{i(t)}$ – суточная интенсивность движения транспорта по мосту; σ_i – диапазон напряжений в элементах от проходящего по мосту транспорта (размах); t – срок эксплуатации в днях.

Единственные нормирующие показатели системы многокритериального прогнозирования надежности стальных балок пролетных строений металлических мостов запишутся следующим образом:

– γ_m – коэффициент надежности по материалу: для стали 16Д – 1,09; 15ХСНД – 1,164; 10ХСНД – 1,125 [8];

– γ_{fi} – коэффициент по нагрузке конструкции, определяется в соответствии с СП 35.13330.2011. «Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*» и состоит из коэффициента статической нагрузки γ_{fis} и динамической нагрузки γ_{fid} , которые равны:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{fis} &= 1 + s \cdot \gamma_c \cdot V_{ct}; \\ \gamma_{fid} &= 1 + s \cdot \gamma_c \cdot V_{di}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где
$$s = \frac{(\sigma_{ct}^2 + \sigma_i^2)^{3/2}}{\sigma_{ct} + \sigma_i};$$

– γ_c – коэффициент надежности по нагрузке для каждого элемента сечения балки, $\gamma_c = \frac{(\sigma_{ct}^2 + \sigma_i^2)}{\sigma_{ct} + \sigma_i}$; σ_{ct} – среднеквадратичное отклонение для статической нагрузки; σ_i – среднеквадратичное отклонение для динамической нагрузки; V_{ct} – среднестатистическая статическая нагрузка на балку, распределенная по нормальному закону; V_d – среднестатистическая динамическая нагрузка, распределенная по нормальному закону; V_{cti} – коэффициент вариации для статической нагрузки, $V_{cti} = \frac{V_{ct}}{\sigma_{ct}}$; V_{di} – коэффициент вариации для динамической нагрузки, $V_{di} = \frac{V_d}{\sigma_i}$;

– γ_s – коэффициент безопасности, равный отношению среднего значения прочности элемента R_{cp} к среднему значению напряжения в элементе σ_{cp} :

$$\gamma_s = \frac{R_{cp}}{\sigma_{cp}} \geq 1;$$

– γ_3 – коэффициент запаса прочности,

$$\gamma_3 = \gamma_s - 1 = \frac{R_{cp} - \sigma_{max}}{\sigma_s};$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{cp} + \beta \cdot \sigma_{s\sigma}; \quad \beta = 3-6,$$

где σ_{max} – максимальное напряжение в элементе; $\sigma_{s\sigma}$ – среднеквадратичное отклонение по напряжению; σ_s – среднеквадратичное отклонение по прочности;

– γ_{zt} – коэффициент запаса прочности по времени (коэффициент долговечности) [9]:

$$\gamma_{zt} = \frac{t_{разр}}{t}, \quad (6)$$

где $t_{разр}$ – время возможного разрушения конструкции или элемента при напряжении $\sigma = \sigma_i$; t – время эксплуатации конструкции (ресурсный период);

– γ_σ – коэффициент запаса по напряжениям, $\gamma_\sigma = \frac{\sigma_{\text{разр}}}{\sigma_i}$; $\sigma_{\text{разр}}$ – напряже-

ние разрушения; σ_i – текущее напряжение;

– γ_n – коэффициент надежности по назначению (СП 35.13330.2011. «Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*»);

– γ_ψ – коэффициент несовершенства материала и конструкции;

– γ_V – коэффициент сплошности, $\gamma_V = \frac{1}{\gamma_\psi}$ [10, 11].

Универсальный коэффициент многокритериального прогнозирования надежности равен:

$$\gamma_i = \gamma_m \cdot \gamma_{fi} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_z \cdot \gamma_{zt} \cdot \gamma_\sigma \cdot \gamma_\psi \cdot \gamma_n \cdot \gamma_c \cdot \gamma_V. \quad (7)$$

С использованием экспоненциального закона распределения случайных величин выражение надежности будет иметь вид

$$P_{\gamma_i} = \gamma_i \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \text{ где } \lambda = \frac{-\ln y_t}{t}. \quad (8)$$

Многокритериальный способ прогнозирования надежности предусматривает рассмотрение этапов эксплуатационной надежности на уровне нормативных требований СП 35.13330.2011 в последовательности $U = 3$ $P_{\gamma_i} = 0,9$ (рис. 2).

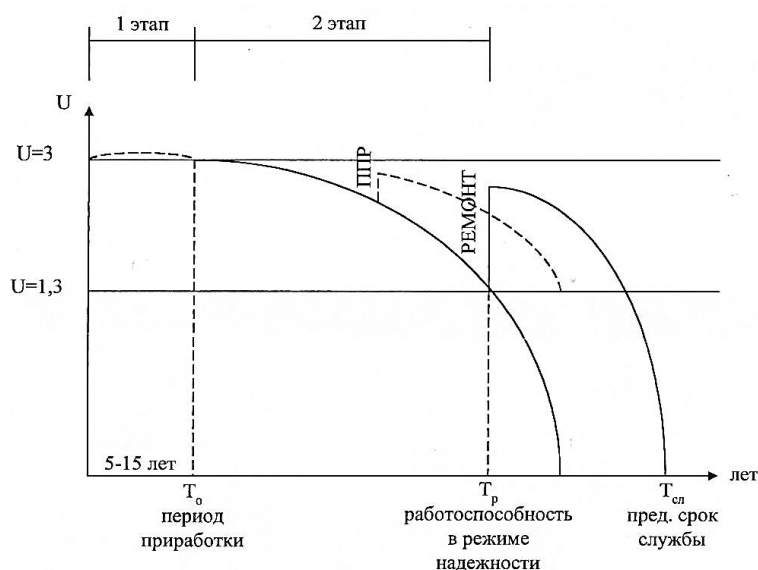


Рис. 2. Нормативные сроки службы мостов
Fig. 2. Standard service lives of bridges

Относительная надежность на любом этапе эксплуатации отображается в виде J – джей-интеграл кривой плотности распределения несущей способности (рис. 3).

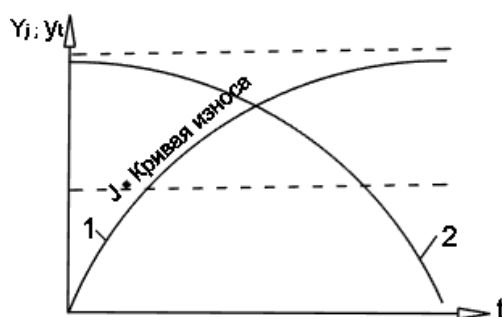


Рис. 3. Изменение надежности конструкции пролетных строений со временем:

$$1 - J \rightarrow \frac{dy_t}{dt}; 2 - \frac{dY_t}{dt} \quad [12]$$

Fig. 3. Changes in the reliability of superstructures over time:

$$1 - J \rightarrow \frac{dy_t}{dt}; 2 - \frac{dY_t}{dt} \quad [12]$$

При $y_t = 1 - \varepsilon$ и $\lambda = \frac{-\ln y_t}{t}$ проявление несовершенства за период времени эксплуатации t будет определяться равенством

$$\varepsilon = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (9)$$

где ε, λ – общепринятые для мостостроения параметры – повреждение и износ [13].

Относительная надежность P_0 равна:

$$P_0 = 1 - \varepsilon. \quad (10)$$

Выводы

Многокритериальный подход в прогнозировании эксплуатационной надежности мостовых конструкций отображает не только количественный, но и качественный уровень эксплуатационной прочности. Использование элементов теории катастроф и синергетики в прогнозировании надежности расширяет диапазон вероятности предельных состояний:

- упругое и упругопластическое состояние с учетом запаздывания текучести;
- изменение прочности материала со временем;
- усталостные изменения в материале и конструкциях;
- изменение динамической надежности и нагруженности элементов;
- следственная зависимость множественности отказов с количеством несовершенств системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Картопольцев А.В. Прогнозирование надежности бистальных балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182
2. Корчак М.Д., Галкин С.В., Картопольцев В.М. Основы неустойчивости в теории катастроф инженерных конструкций. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1997. 123 с. ISBN 5-7511-0910-4 : Б. ц.

3. Алексеев А.А., Картопольцев А.В., Черепанов Д.И. К вопросу ресурсной долговечности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-211-219
4. Hult J. Creep in Continua and Structures // Int. Conf. Creep and Fatigue in Elevated Temperature Application Sheffreed. 1974. P. 137–155.
5. Физдель И.А. Дефекты в конструкциях и сооружениях и методы их устранения. Москва : Стройиздат, 1978. 160 с.
6. Степин П.А. О расчетных схемах балок // Исследования по теории сооружений. Москва ; Ленинград : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1951. С. 389–393.
7. Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов. Ленинград : ЛИСИ, 1989. 96 с.
8. Потупкин А.А. Методические указания к основам расчета мостовых конструкций на надежность. Москва : МАДИ, 1987. 20 с.
9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва : Машиностроение, 1975. 399 с.
10. Семкин Е.Ф., Картопольцев В.М. К вопросу многокритериальной оценки надежности мостов // Современные методы статического и динамического расчета сооружений и конструкций. Вып. 3. Воронеж, 1994. С. 25–33.
11. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. 2nd edition. Denmark : Department of Mechanical Engineering Technical University, 2007. 373 p.
12. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. 223 с.
13. Нечаев Ю.П. Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений. Москва : Транспорт, 1989. С. 67–72.

REFERENCES

1. Kartopol'tsev A.V. Towards Durability of Redundant Composite Beams. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekurno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182 (In Russian)
2. Korchak M.D., Galkin S.V., Kartopol'tsev V.M. Fundamentals of Instability in the Theory of Catastrophes of Engineering Structures. Tomsk: TSU, 1997, 123 p. (In Russian)
3. Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V., Cherepanov D.N. Towards Resource Durability of Bridge Spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekurno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (4): 211–219. (In Russian)
4. Hult J. Creep in Continua and Structures. In: *Proc. Conf. "Creep and Fatigue in Elevated Temperature Application"*. Sheffreed, 1974. Pp. 137–155.
5. Fizel T.F. Defects in Structures and Buildings and Methods for their Elimination. Moscow: Stroyizdat, 1978. 160 p. (In Russian)
6. Stepin P.A. Design Schemes of Beams. In: *Research in the Theory of Structures*. Moscow; Leningrad, 1951. Pp. 389–393. (In Russian)
7. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikovich V.L. Reliability Prediction of Steel and Composite Concrete Bridges. Leningrad, 1989. 96 p. (In Russian)
8. Potapkin A.A. Methodology of Calculating Bridge Reliability. Moscow, 1987. 19 p. (In Russian)
9. Malinin N.N. Applied Theory of Plasticity and Creep. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 389 p. (In Russian)
10. Semkin E.F., Kartopol'tsev V.M. On Multicriteria Assessment of Bridge Reliability. In: *Modern Methods of Static and Dynamic Analysis of Structures*. Vol. 3. Voronezh, 1994. Pp. 25–33. (In Russian)
11. Ditlevsen O., Madsen N.O. Structural Reliability Methods. 2nd ed. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007. 373 p.
12. Moroz L.S. Mechanics and Physics of Deformation and Fracture of Materials. Leningrad: Mashinostroenie, 1984, 223 p. (In Russian)
13. Nechaev Yu.P. Durability of Artificial Structures. In: *Service Reliability of Artificial Structures*. Moscow: Transport, 1989. Pp. 67–72. (In Russian)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

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

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003.

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

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024
Одобрена после рецензирования 23.10.2024
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 02.10.2024
Approved after review 23.10.2024
Accepted for publication 31.10.2024