

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 6–13.  
The Siberian Transport University Bulletin. 2026. No. 4 (81), special issue. P. 6–13.

Научная статья

УДК 624.21

doi:10.52170/1815-9265\_2026\_81\_6

## Интеграция теорий накопления повреждений в рискориентированную парадигму оценки предельных состояний мостовых сооружений

Татьяна Сергеевна Овчинникова<sup>1✉</sup>, Шерали Назаралиевич Валиев<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>1</sup> ovchinnikovats@tyuiu.ru✉

<sup>2</sup> vshn2014@gmail.com

**Аннотация.** Цель работы – развитие рискориентированного подхода к оценке предельного состояния мостовых сооружений путем интеграции фундаментальных теорий накопления повреждений (Л. М. Качанова, Ю. Н. Работнова, А. Р. Ржаницына) и обоснование нового типа предельного состояния по кинетическим критериям.

Выполнен сравнительный анализ трех классических подходов: феноменологической теории Л. М. Качанова (параметр сплошности), кинетической теории Ю. Н. Работнова (параметр поврежденности) и вероятностного метода А. Р. Ржаницына (характеристика безопасности). Раскрыты физические основы каждой теории, показаны их преимущества и ограничения применительно к задачам мостостроения.

Обоснован выбор комбинированной модели, объединяющей кинетические уравнения Ю. Н. Работнова для описания скорости накопления повреждений, параметр поврежденности Качанова – Работнова как интегральную меру деградации и вероятностный аппарат А. Р. Ржаницына для учета случайного характера нагрузок и прочностных свойств.

Конкретные результаты работы: предложена модифицированная классификация уровней риска с пятью градациями (от «хорошо» до «недопустимо») и количественными критериями по параметру поврежденности и скорости его накопления; разработана методика определения индикативных показателей предельного состояния на основе приращений относительных деформаций с использованием кинетических уравнений поврежденности; обосновано предельное состояние третьего типа как момент достижения критической скорости накопления повреждений (в отличие от первого типа, связанного с критическим значением параметра поврежденности, и второго типа – с допустимыми деформациями), что позволяет выявлять режим прогрессирующего разрушения до возникновения макроскопических дефектов. Разработанная методика может быть интегрирована в системы мониторинга технического состояния мостов, а предложенные критерии – использованы при формировании нормативных требований к эксплуатации сооружений в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред.

**Ключевые слова:** мостовые сооружения, накопление повреждений, механика поврежденности, теория Качанова, теория Работнова, метод Ржаницына, рискориентированный подход, остаточный ресурс, кинетические уравнения

**Для цитирования:** Овчинникова Т. С., Валиев Ш. Н. Интеграция теорий накопления повреждений в рискориентированную парадигму оценки предельных состояний мостовых сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 6–13. DOI 10.52170/1815-9265\_2026\_81\_6.

# BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

## Integration of damage accumulation theories into a risk-based paradigm for assessing limit states of bridge structures

Tatyana S. Ovchinnikova<sup>1✉</sup>, Sherali N. Valiev<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

<sup>1</sup> ovchinnikovats@tyuiu.ru✉

<sup>2</sup> vshn2014@gmail.com

**Abstract.** The objective of this study is to develop a risk-based approach to assessing the ultimate limit state of bridge structures by integrating fundamental theories of damage accumulation (L. M. Kachanov, Yu. N. Rabotnov, A. R. Rzhanytsyn) and substantiating a new type of ultimate limit state based on kinetic criteria.

A comparative analysis of three classical approaches is performed: L. M. Kachanov's phenomenological theory (continuity parameter), Yu. N. Rabotnov's kinetic theory (damage parameter), and A. R. Rzhanytsyn's probabilistic method (safety characteristic).

The physical foundations of each theory are revealed, and their advantages and limitations are demonstrated as applied to bridge construction problems. A rationale is provided for the choice of a combined model combining Yu. N. Rabotnov's kinetic equations to describe the rate of damage accumulation, the Kachanov – Rabotnov damage parameter as an integral measure of degradation, and A. R. Rzhanytsyn's probabilistic apparatus to account for the random nature of loads and strength properties.

Specific results of the study: a modified classification of risk levels with five gradations (from 'good' to 'unacceptable') and quantitative criteria for the damage parameter and its accumulation rate is proposed; a methodology for determining indicative indicators of the limit state based on increments of relative deformations using kinetic equations of damage is developed; the limit state of the third type is substantiated as the moment of reaching a critical rate of damage accumulation (in contrast to the first type, associated with a critical value of the damage parameter, and the second type with permissible deformations), which makes it possible to identify the mode of progressive destruction before the occurrence of macroscopic defects. The developed methodology can be integrated into bridge condition monitoring systems, and the proposed criteria can be used in the development of regulatory requirements for the operation of structures under increased loads and aggressive environments.

**Keywords:** bridge structures, damage accumulation, damage mechanics, Kachanov theory, Rabotnov theory, Rzhanytsyn method, risk-based approach, residual life, kinetic equations

**For citation:** Ovchinnikova T. S., Valiev Sh. N. Integration of damage accumulation theories into a risk-based paradigm for assessing limit states of bridge structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(81):6–13. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2026\_81\_6.

## Введение

Современная теория надежности мостов базируется на методе предельных состояний и вероятностных подходах, позволяющих учитывать случайную природу нагрузок и разброс прочностных характеристик материалов [1, 2]. Однако классические методы расчета, основанные на сопоставлении силовых факторов и несущей способности, не в полной мере отражают кинетику деградационных процессов, протекающих в материале конструкций в течение всего срока эксплуатации [3, 4].

Показатели безопасности мостовых сооружений оцениваются в терминах риска причинения вреда, однако общей методики расчета риска для эксплуатируемых мостовых сооружений до настоящего времени не создано [5, 6]. Существующие подходы рассматривают статическую картину взаимодействия нагрузок и прочности, но не учитывают кинетику накопления повреждений во времени [5, 7].

Фундаментальный вклад в развитие представлений о накоплении повреждений внесли работы Л. М. Качанова, Ю. Н. Работнова и А. Р. Ржаницына. В 1958 г. Л. М. Качанов ввел понятие параметра сплошности, описав состояние материала одним структурным параметром, что положило начало механике поврежденности [8, 9]. Ю. Н. Работнов развил этот подход, предложив параметр поврежденности и кинетические

уравнения, связывающие скорость накопления повреждений с напряженным состоянием и температурой [10, 11]. А. Р. Ржаницын рекомендовал для описания поврежденности материала использовать термин мгновенной прочности материала  $r$ . Также им разработан вероятностный аппарат оценки надежности конструкций, с рассмотрением запаса прочности как случайной величины и введением характеристики безопасности [12, 13].

Цель настоящей работы – развитие рискориентированного подхода к оценке предельного состояния мостовых сооружений на основе интеграции классических теорий накопления повреждений, сравнительный анализ применимости различных моделей и обоснование выбора комбинированного метода для прогнозирования остаточного ресурса и управления рисками.

## Теоретические исследования

Основоположником феноменологического подхода к описанию накопления повреждений является Л. М. Качанов, который ввел понятие сплошности, или трещиноватости, описав состояние материала одним структурным параметром  $\psi(t)$  ( $0 \leq \psi \leq 1$ ,  $t$  – время) [8, 9, 14].

В модели Л. М. Качанова параметр  $\psi = 1$  соответствует неповрежденному материалу,  $\psi = 0$  – полному разрушению. Скорость изменения параметра сплошности связывается с напряжением  $\sigma$  и состоянием материала [8, 14]:

$$\frac{d\psi}{dt} = -A \left( \frac{\sigma}{\psi} \right)^n, \quad (1)$$

где  $\psi$  – параметр сплошности;  $t$  – время;  $A$ ,  $n$  – эмпирические константы материала;  $\sigma$  – действующее напряжение.

Интегрирование уравнения (1) при постоянном напряжении позволяет получить зависимость для определения времени до разрушения:

$$t_p = \frac{1}{A(n+1)\sigma^n}. \quad (2)$$

Ю. Н. Работнов развил идеи Л. М. Качанова, введя параметр  $\Pi$  ( $0 \leq \Pi \leq 1$ ), приняв, что при  $\Pi = 0$  материал считается неповрежденным, а при  $\Pi = 1$  начинается его разрушение [10, 11, 14]. Позднее он обобщил модель, введя несколько параметров поврежденности, не наделяя их конкретным физическим смыслом [14, 15]. Определяющие соотношения для одноосного напряженного состояния в модели Ю. Н. Работнова имеют вид [14, 15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_c}{dt} &= f(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_n), \\ \frac{d\Pi_i}{dt} &= \varphi_i(\sigma, T, t, q_1, q_2, \dots, q_n), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_c$  – необратимые деформации ползучести;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $\Pi_i$  – структурные параметры.

В случае одного параметра поврежденности  $\Pi$  система (3) может быть конкретизирована:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = B \frac{\sigma^\mu}{(1-\Pi)^\nu}, \quad \frac{d\Pi}{dt} = B_1 \frac{\sigma^m}{(1-\Pi)^n}. \quad (4)$$

Здесь параметры  $B$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $B_1$ ,  $m$ ,  $n$  определяются на основе экспериментальных данных и в общем случае зависят от температуры.

Для описания коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры используется уравнение накопления повреждений, предложенное Ю. Н. Работновым [16]:

$$\frac{d\Pi}{dt} = a \frac{\sigma^b}{(1-\Pi)^k}, \quad \Pi(0) = 0, \quad (5)$$

где  $a(T, C)$  и  $b(T, C)$ ,  $k$  – коэффициенты, являющиеся функциями температуры и концентрации агрессивной среды.

Интегрируя уравнение при  $\sigma$ ,  $T$ ,  $C = \text{const}$ , получаем

$$\Pi(t) = 1 - [1 - (b+1)\sigma^b t]^{\frac{1}{b+1}}. \quad (6)$$

Из условия разрушения  $\Pi(t_p) = 1$  имеем

$$t_p = A\sigma^{-b}. \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой степенную зависимость, которая широко используется для описания кривых длительной прочности и коррозионного растрескивания сталей [16, 17].

Преимущество модели Ю. Н. Работнова заключается в возможности учета различных механизмов повреждения и истории нагружения.

А. Р. Ржаницын разработал вероятностный подход к оценке надежности строительных конструкций, рассматривая запас прочности как случайную величину [12, 13]. Он ввел понятие характеристики безопасности:

$$\beta = \frac{R_{mean} - S_{mean}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (8)$$

где  $R_{mean}$  – математическое ожидание прочности;  $S_{mean}$  – математическое ожидание нагрузки;  $\sigma_R$ ,  $\sigma_S$  – среднеквадратические отклонения прочности и нагрузки соответственно.

При нормальном распределении прочности и нагрузки вероятность отказа  $P_f$  связана с характеристикой безопасности соотношением

$$P(f) = \Phi(-\beta), \quad (9)$$

где  $\Phi$  – функция стандартного нормального распределения [12].

Основное преимущество метода А. Р. Ржаницына – учет статистической природы нагружения и прочности. Для выбора наиболее адекватной модели накопления повреждений применительно к мостовым сооружениям необходимо сопоставить рассмотренные теории по следующим критериям:

1) адекватность описания физических процессов – способность модели отражать реальные механизмы деградации (коррозию, усталость, ползучесть);

2) возможность учета истории нагружения;

3) статистическая обоснованность – учет случайной природы нагрузок и свойств материалов;

4) идентифицируемость параметров – возможность определения параметров модели по экспериментальным данным ограниченного объема;

5) вычислительная реализуемость;

6) совместимость с нормативной базой.

Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнительный анализ теорий накопления повреждений

| Критерий                                     | Теория Качанова                | Теория Работнова                                 | Метод Ржаницына                 |
|----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| Физическая обоснованность                    | Низкая<br>(феноменологическая) | Средняя (феноменологическая с элементами физики) | Высокая<br>(статистическая)     |
| Учет истории нагружения                      | Отсутствует                    | Полный (кинетические уравнения)                  | Частичный (через распределения) |
| Учет случайных факторов                      |                                | Отсутствует                                      | Полный                          |
| Число параметров                             | 2–3                            | 4–6                                              | 2–3                             |
| Сложность идентификации                      | Средняя                        | Высокая                                          | Низкая                          |
| Применимость к коррозии                      | Ограниченная                   |                                                  | Средняя                         |
| Применимость к усталости                     |                                |                                                  | Высокая                         |
| Совместимость с методом предельных состояний | Низкая                         | Средняя                                          |                                 |

Для задач оценки предельного состояния мостовых сооружений наиболее перспективным представляется комбинированный подход, объединяющий достоинства рассмотренных теорий.

1. Кинетические уравнения Ю. Н. Работнова используются для описания скорости накопления повреждений под действием эксплуатационных факторов (коррозии, усталости, ползучести).

2. Параметр поврежденности Качанова – Работнова служит интегральной мерой деградации материала.

3. Вероятностный аппарат А. Р. Ржаницына применяется для учета случайного характера нагрузок и разброса прочностных свойств, а также для оценки вероятности отказа.

Комбинированная модель может быть представлена системой уравнений:

– кинетическое уравнение накопления повреждений

$$\frac{d\Pi}{dt} = f(\sigma(t), T, C, \Pi), \Pi(0) = 0, \Pi(t_p) = 1; \quad (10)$$

– зависимость несущей способности от параметра поврежденности

$$R(t) = R_0[1 - \Pi(t)]^\alpha; \quad (11)$$

– вероятность отказа в момент времени  $t$

$$P_f(t) = P\{R(t) < S(t)\} = \Phi\left(-\frac{R_{mean}(t) - S_{mean}(t)}{\sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_S^2(t)}}\right), \quad (12)$$

где  $\Pi(t)$  – параметр поврежденности;  $R(t)$  – текущая несущая способность;  $R_0$  – начальная несущая способность;  $\alpha$  – показатель степени;  $P_f(t)$  – вероятность отказа в момент времени  $t$ .

На основе комбинированной модели предлагается модифицированная классификация вероятностных уровней превышения нагрузки над несущей способностью (как составляющей риска отказа) для пролетных строений эксплуатируемых мостовых сооружений, учитывающая не только текущее состояние, но и скорость накопления повреждений (табл. 2) [5].

Под показателем риска  $R$  в табл. 2 понимается вероятность нежелательного события (отказа) в интервале времени  $\Delta t$ , что соответствует первой компоненте риска согласно ГОСТ Р 51897–2021 (п. 1.1).

Диапазон изменения вероятностного показателя (0,1) выбран на основе анализа расхождения нормативных требований к массе транспортных средств (40 и 44 т в технических регламентах Таможенного союза), что отражает

Таблица 2

## Классификация уровней риска с учетом кинетики повреждений

| Уровень риска     | Показатель риска $R$ | Параметр поврежденности $\Pi$ | Скорость накопления повреждений $\frac{d\Pi}{dt}$ |
|-------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Хорошо            | $< 0,1$              | $< 0,2$                       | $< 10^{-5}$ год $^{-1}$                           |
| Удовлетворительно | $0,1 \dots 0,115$    | $0,2 \dots 0,4$               | $10^{-5} \dots 10^{-4}$ год $^{-1}$               |
| Опасный           | $0,115 \dots 0,14$   | $0,4 \dots 0,6$               | $10^{-4} \dots 10^{-3}$ год $^{-1}$               |
| Критический       | $0,14 \dots 0,2$     | $0,6 \dots 0,8$               | $10^{-3} \dots 10^{-2}$ год $^{-1}$               |
| Недопустимый      | $> 0,2$              | $> 0,8$                       | $> 10^{-2}$ год $^{-1}$                           |

инженерный допуск при взвешивании и назначении нагрузок [5]. Численные границы вероятностных уровней (0,1; 0,115; 0,14; 0,2) определены по методике [5].

Дополнительное введение параметра поврежденности и скорости его накопления позволяет дифференцировать сооружения с одинаковым текущим уровнем риска, но с различной кинетикой деградации.

Для практической реализации предложенного подхода разработана методика определения индикативных показателей предельного состояния, базирующаяся на приращениях относительных деформаций [6].

Связь между приращениями деформаций  $\Delta \varepsilon$  и параметром поврежденности устанавливается на основе модели Ю. Н. Работнова [11, 14]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = B \frac{\sigma^\mu}{(1 - \Pi)^v}. \quad (13)$$

Логарифмируя (13), получаем линейную зависимость, позволяющую идентифицировать параметры модели по данным натурных наблюдений:

$$\ln \left( \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \right) = \ln B + \mu \ln \sigma - v \ln(1 - \Pi). \quad (14)$$

Критическое значение приращения деформаций  $\left( \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \right)_{кр}$ , соответствующее достижению предельного состояния, определяется из условия  $\Pi = \Pi_{кр}$ :

$$\left( \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \right)_{кр} = B \frac{\sigma^\mu}{(1 - \Pi_{кр})^v}. \quad (15)$$

В качестве индикативных показателей предлагается использовать [6]: текущее значение скорости деформаций, отношение текущей скорости к критической, прогнозное время достижения критического состояния. Развивая предложенную ранее концепцию предельного состояния третьего типа [6], интерпретируем ее в терминах механики поврежденности.

**Предельное состояние первой группы** соответствует достижению параметром поврежденности критического значения  $\Pi = 1$ , при котором происходит макроскопическое разрушение элемента [5, 8].

**Предельное состояние второй группы** связано с превышением допустимых деформаций или раскрытия трещин, что может быть выражено через параметр поврежденности  $\Pi = \Pi_{доп}$ , где  $\Pi_{доп} < 1$  [1, 2].

**Предельное состояние третьей группы** (опасное) характеризуется достижением критической скорости накопления повреждений  $\left( \frac{d\Pi}{dt} \right)_{кр}$ , при которой даже при достаточной несущей способности ( $\Pi < 1$ ) возникает недопустимый риск отказа в обозримой перспективе [6].

Математически условие наступления предельного состояния третьего типа записывается как

$$\left( \frac{d\Pi}{dt} \right) \geq \left( \frac{d\Pi}{dt} \right)_{кр}. \quad (16)$$

Для мостовых сооружений наиболее значимыми механизмами деградации являются коррозия и усталость [4, 16]. В рамках комбинированной модели предлагается раздельное описание этих процессов с последующим суммированием повреждений.

**Коррозионные повреждения** описываются модифицированным уравнением Ю. Н. Работнова с учетом концентрации агрессивной среды  $C$  [14]:

$$\frac{d\Pi_{cor}}{dt} = a(C) \frac{\sigma^{b(C)}}{(1 - \Pi_{cor})^k}, \quad (17)$$

где  $a(C)$ ,  $b(C)$  – эмпирические функции, определяемые по экспериментальным данным для конкретной среды;  $C$  – концентрация агрессивной среды;  $k$  – показатель нелинейности.

**Усталостные повреждения** при случайном процессе нагружения могут быть описаны на основе линейного правила суммирования Пальмгрена – Майнера с коррекцией по параметру поврежденности [3]:

$$\frac{d\Pi_{fat}}{dt} = \frac{\sum \left( \frac{n_i}{N_i} \right)}{(1 - \Pi_{fat})^\gamma}, \quad (18)$$

где  $n_i$  – число циклов с амплитудой  $\sigma_i$ ;  $N_i$  – число циклов до разрушения при данной амплитуде;

$\gamma$  – показатель нелинейности суммирования.

Общий параметр поврежденности определяется как суперпозиция повреждений от различных механизмов:

$$\Pi = \Pi_{cor} + \Pi_{fat} - \Pi_{cor}\Pi_{fat}, \quad (19)$$

что соответствует модели независимых повреждений [14].

На основе разработанного подхода предлагается следующая методика прогнозирования остаточного ресурса мостовых сооружений:

**Этап 1. Сбор и анализ исходных данных** – данных натурных обследований (деформации, трещины, прогибы), информации о режимах нагружения (интенсивность движения, состав потока), параметров внешней среды (температура, влажность, агрессивность).

**Этап 2. Идентификация параметров модели** – определение параметров кинетических уравнений (17), (18) по экспериментальным данным, калибровка модели по результатам многолетних наблюдений, оценка статистических характеристик нагрузок и прочности.

**Этап 3. Расчет текущего состояния** – вычисление текущего параметра поврежденности  $\Pi(t)$  по формулам (17)–(19), оценка текущей несущей способности  $R(t)$  по формуле (11), определение текущего показателя риска  $R_i = P_i U_i$  [6].

**Этап 4. Прогнозирование остаточного ресурса** – решение кинетических уравнений на перспективный период, определение времени достижения предельных состояний различных типов, оценка вероятности отказа как функции времени  $P_{f(t)}$ .

**Этап 5. Разработка рекомендаций по управлению риском** – назначение компенсирующих мероприятий [5], оптимизация сроков и объемов ремонтных работ, корректировка режимов эксплуатации при необходимости.

### Выводы

В результате выполненного исследования получены следующие основные результаты:

1. Выполнен сравнительный анализ подходов Л. М. Качанова, Ю. Н. Работнова и А. Р. Ржаницына к накоплению повреждений. Показано, что каждый из них имеет свои преимущества и ограничения применительно к задачам оценки предельного состояния сооружений.

2. Обоснован выбор комбинированной модели, объединяющей кинетические уравнения Ю. Н. Работнова для описания скорости накопления повреждений, параметр поврежденности Качанова – Работнова как интегральную меру деградации и вероятностный аппарат А. Р. Ржаницына для учета случайного характера нагрузок и прочностных свойств.

3. Предложена модифицированная классификация уровней риска потери несущей способности пролетных строений; дополнительное введение параметра поврежденности и скорости его накопления позволяет дифференцировать сооружения с одинаковым текущим уровнем риска, но с различной кинетикой деградации.

4. Разработана методика определения индикативных показателей предельного состояния на основе приращений относительных деформаций с использованием кинетических уравнений поврежденности, позволяющая перейти от статической оценки запаса прочности к динамическому анализу скорости деградации.

5. Развита концепция предельного состояния третьего типа, интерпретируемого как момент достижения критической скорости накопления повреждений, предшествующий макроскопическому разрушению. Сформулировано математическое условие наступления данного состояния.

6. Предложена методика прогнозирования остаточного ресурса мостовых сооружений, включающая этапы сбора данных, идентификации параметров, расчета текущего состояния, прогнозирования и выработки управленческих решений.

Практическая значимость работы заключается в создании методической основы для предиктивного управления жизненным циклом мостовых сооружений. Экспериментальное обоснование параметров кинетических уравнений для конкретных материалов и условий эксплуатации является самостоятельным направлением дальнейших исследований.

Предлагаемый подход создает основу для перехода от планово-предупредительного обслуживания к обоснованному предиктивному управлению жизненным циклом мостовых сооружений, базирующемуся на анализе кинетики накопления повреждений и оценке риска, что является ключевым фактором обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации транспортной инфраструктуры.

## Список источников

1. Валиев Ш. Н., Васильев А. И. Оценка параметрической надежности мостовых сооружений // Транспортное строительство. 2022. № 2. С. 4–6. EDN TLWEZH.
2. Васильев А. И. Основы теории надежности автодорожных мостов и тоннелей : учебное пособие. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 312 с.
3. Овчинникова Т. С., Валиев Ш. Н. Современные подходы к оценке и обеспечению надежности мостовых сооружений: анализ проблем и перспективы развития // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Исследование, проектирование, строительство и эксплуатация искусственных сооружений: проблемы и пути их решения на протяжении жизненного цикла». Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2025. С. 27–35.
4. Длительные деградационные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации / А. И. Васильев, Ш. Н. Валиев, В. С. Шмидт, И. Г. Овчинников // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14, № 2.
5. Научные основы оценки предельного состояния мостовых сооружений по критериям допустимости риска нежелательного события / Ш. Н. Валиев, В. С. Надеждин, Д. А. Кочетков [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2024. № 3. С. 30–40. DOI 10.15593/24111678/2024.03.04.
6. Валиев Ш. Н. Методы формирования индикативных показателей риска при эксплуатации мостовых сооружений // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 4. DOI 10.15862/12SATS424.
7. Оценка технических рисков в техническом регулировании дорожного хозяйства / Ю. Э. Васильев, Ш. Н. Валиев, С. В. Ильин [и др.]. Москва : МАДИ, 2017. 295 с.
8. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Известия АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26–31.
9. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. Москва : Наука, 1974. 312 с.
10. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. Москва : Издательство АН СССР, 1959. С. 5–7.
11. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. Москва : Наука, 1966. 752 с.
12. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
13. Ржаницын А. Р. Строительные конструкции : сборник статей / под ред. А. Р. Ржаницына. Москва : ЦНИИСК, 1970. Вып. 8. 312 с.
14. Овчинников И. И. Вопросы нелинейной механики конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями : специальность 2.1.9 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Овчинников Илья Игоревич. Саратов, 2023. 494 с.
15. Овчинников И. И., Седдак А. Применение теории накопления повреждений Ю. Н. Работнова к моделированию коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры // Труды III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций». Новосибирск, 2014. С. 47–52.
16. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения. Москва : Наука, 1987. 80 с.
17. Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов. Москва : Физматлит, 2016. 506 с.

## References

1. Valiev Sh. N., Vasiliev A. I. Assessment of the parametric reliability of bridge structures. *Transport Construction*. 2022;(2):4–6. EDN TLWEZH. (In Russ).
2. Vasiliev A. I. Fundamentals of reliability theory for highway bridges and tunnels. A textbook. Moscow; Vologda: Infra-Engineering; 2024. 312 p. (In Russ).
3. Ovchinnikova T. S., Valiev S. N. Modern approaches to assessing and ensuring the reliability of bridge structures: analysis of problems and development prospects. *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. Research, Design, Construction, and Operation of Artificial Structures: Problems and Solutions Throughout the Life Cycle*Novosibirsk: Publishing house of the State Transport University; 2025. P. 27–35. (In Russ).
4. Vasiliev A. I., Valiev Sh. N., Schmidt V. S., Ovchinnikov I. G. Long-term degradation processes affecting the reduction in the load-bearing capacity and durability of bridge structures during their operation. *Bulletin of Eurasian Science*. 2022;14(2):15. (In Russ).
5. Valiev Sh. N., Nadezhdin V. S., Kochetkov D. A. [et al.]. Scientific foundations for assessing the limit state of bridge structures based on the criteria for the acceptability of the risk of an undesirable event. *Transport. Transport Structures. Ecology*. 2024;(3):30–40. (In Russ). DOI 10.15593/24111678/2024.03.04.

6. Valiev Sh. N. Methods for forming indicative risk indicators for operation of bridge structures. *Transport Structures*. 2024;11(4). (In Russ). DOI 10.15862/12SATS424.
7. Vasiliev Yu. E., Valiev Sh. N., Ilyin S. V. [et al.]. Assessment of technical risks in technical regulation of road facilities. Moscow: MADI; 2017. 295 p. (In Russ).
8. Kachanov L. M. On the time of fracture under creep conditions. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. OTN. 1958;(8):26–31. (In Russ).
9. Kachanov L. M. Fundamentals of Fracture Mechanics. Moscow: Nauka; 1974. 312 p. (In Russ).
10. Rabotnov Yu. N. On the mechanism of long-term failure. *Issues of Strength of Materials and Structures*. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences; 1959. P. 5–7. (In Russ).
11. Rabotnov Yu. N. Creep of structural elements. Moscow: Nauka; 1966. 752 p. (In Russ).
12. Rzhantsyn A. R. Theory of reliability calculation of building structures. Moscow: Stroyizdat; 1978. 239 p. (In Russ).
13. Rzhantsyn A. R. Building structures. A collection of articles. Edited by A. R. Rzhantsyn. Moscow: TsNIISK; 1970. Issue 8. 312 p. (In Russ).
14. Ovchinnikov I. I. Issues of nonlinear mechanics of structures interacting with aggressive environments and physical fields: dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Saratov; 2023. 494 p. EDN UTERCU. (In Russ).
15. Ovchinnikov I. I., Seddak A. Application of Yu. N. Rabotnov's damage accumulation theory to modeling stress-corrosion cracking of prestressed reinforcement. *Proceedings of the III All-Russian Conference. Deformation and Fracture of Structurally Heterogeneous Media and Structures*. Novosibirsk; 2014. P. 47–52. (In Russ).
16. Rabotnov Yu. N. Introduction to fracture mechanics. Moscow: Nauka; 1987. 80 p. (In Russ).
17. Lokoshchenko A. M. Creep and long-term strength of metals. Moscow: Fizmatlit; 2016. 506 p. (In Russ).

### **Информация об авторах**

*Т. С. Овчинникова* – аспирант базовой кафедры «Мостострой-11» Тюменского индустриального университета.

*Ш. Н. Валиев* – доцент базовой кафедры «Мостострой-11» Тюменского индустриального университета.

### **Information about the authors**

*T. S. Ovchinnikova* – Postgraduate Student, Department of Mostostroy-11, Tyumen Industrial University.

*Sh. N. Valiev* – Associate Professor, Department of Mostostroy-11, Tyumen Industrial University.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 16.05.2026; принята к публикации 26.06.2026.

The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 16.05.2026; accepted for publication 26.06.2026.