

В.А. СМИРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ЗАДАННОГО ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРИОДА ОБЪЕКТА

**Аннотация.** В действующем нормативном поле РФ (ГОСТ 27751–2014, СП 20.13330 и др.) полувероятностный метод расчёта по предельным состояниям опирается на фиксированные коэффициенты надёжности, которые назначены для определённого срока эксплуатации (как правило, 50 – 75 лет в зависимости от класса ответственности) и типовый набор неопределённостей. При этом в практике строительства возрастает доля временных, модульных и реконструируемых сооружений, а также задач продления ресурса, для которых требуется согласованная корректировка целевых показателей надёжности и локальных коэффициентов безопасности с учетом заданного срока службы. В статье представлен обзор современных вероятностных подходов к обеспечению надёжности сооружений (на примере Eurocode, JCSS, ISO 2394), применяемых при калибровке норм и оценке существующих конструкций. На основе результатов НИР, выполненной в НИУ МГСУ, предлагается инженерная методика перехода от референсного уровня надёжности к заданному сроку эксплуатации  $T$  за счет пересчёта целевого годового индекса надёжности и последующей корректировки локальных коэффициентов  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$  по чувствительности (FORM) при логнормальном описании случайных величин. Показано, что для климатических нагрузок (снег, ветер) при  $T \approx 10$ –15 лет расчетные  $\gamma_f$  могут быть снижены примерно на 10–20% при сохранении суммарно допустимого риска за весь срок эксплуатации; для постоянных нагрузок и коэффициентов по материалам корректировки, как правило, малы. Приведены вычислительный алгоритм и иллюстративный расчет для переменной климатической нагрузки.

**Ключевые слова:** надёжность; индекс надёжности  $\beta$ ; проектный срок службы; вероятность отказа; FORM; частные коэффициенты; Eurocode; JCSS; ГОСТ 27751; СП 20.13330.

V.A. SMIRNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

## IMPROVING STRENGTH AND RELIABILITY ASSESSMENT METHODS CONSIDERING A SPECIFIED SERVICE LIFE

**Abstract.** In the current Russian framework for limit state design, partial safety factors are commonly calibrated for a reference service life (typically 50 years) and a conventional set of uncertainties. Modern practice increasingly involves temporary, modular and transformable facilities, as well as service-life extension of existing structures, where a consistent adjustment of target reliability and local safety factors to a specified service life is required. This paper reviews contemporary probabilistic concepts used in structural reliability and code calibration (Eurocodes, JCSS, ISO 2394 and service-life design). Based on R&D results obtained at NRU MGSU, an engineering procedure is proposed to map a reference reliability level to a target service life  $T$  by (i) converting the accepted total failure risk over the reference period into an equivalent annual target reliability index and (ii) adjusting local partial factors for actions and resistances using sensitivity factors from FORM under a lognormal representation of basic variables. The approach indicates that for variable climatic actions (snow, wind) the design partial factor  $\gamma_f$  may be reduced by approximately 10–20% for  $T \approx 10$ –15 years while keeping the accepted total risk over the service life constant; for permanent actions and resistance factors  $\gamma_m$ , the correction is usually minor. A step-by-step algorithm and an illustrative calculation example are provided.

**Keywords:** structural reliability; reliability index; service life; failure probability; FORM; partial safety factors; Eurocode; JCSS; GOST 27751, SP 20.13330.

## 1. Введение

Методы обеспечения надежности строительных конструкций развиваются в двух взаимосвязанных парадигмах: (i) нормативный расчет по предельным состояниям с использованием частных коэффициентов безопасности и (ii) вероятностный анализ (структурная надежность), позволяющий количественно оценивать риск отказа и калибровать нормативные требования. В отечественной практике расчёт по предельным состояниям закреплён в ГОСТ 27751–2014 и системе сводов правил, включая СП 20.13330 «Нагрузки и воздействия». Система частных коэффициентов ( $\gamma_f$ ,  $\gamma_m$ ,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_c$ , коэффициенты сочетаний  $\psi$  и др.) обеспечивает заданный средний уровень безопасности для типового проектного срока эксплуатации сооружения (как правило, 50 лет). Однако рост доли временных сооружений, реконструкций, а также задач продления ресурса формирует запрос на методику согласования срока службы, целевого индекса надежности и параметров полувероятностного расчета [1, 2, 7, 25, 26]. Современные нормативные документы, включая ГОСТ 27751–2014 «Надёжность строительных конструкций. Основные положения», устанавливают полувероятностный метод расчёта, основанный на использовании частных коэффициентов надёжности по нагрузке, материалу, условиям работы и ответственности [4 – 6]. Однако в действующей редакции нормативной базы Российской Федерации отсутствует чёткая методология корректировки этих коэффициентов в зависимости от проектного (назначенного) срока службы сооружения, что приводит к избыточному запасу прочности при проектировании временных или краткосрочных сооружений и, как следствие, к необоснованным экономическим затратам.

Между тем международные стандарты — в частности, ISO 2394:2015, EN 1990:2002 (Еврокод 0) и рекомендации Совместного комитета по структурной безопасности (JCSS) — предусматривают возможность дифференциации требований к надёжности в зависимости от расчётного периода эксплуатации. Эти подходы основаны на вероятностной интерпретации надёжности, выражаемой через целевой индекс надёжности  $\beta$ , который напрямую связан с допустимой вероятностью отказа за заданный временной интервал. При этом сокращение срока службы объективно снижает вероятность реализации экстремальных нагрузок, что позволяет обоснованно уменьшать коэффициенты запаса без ущерба для общей безопасности объекта [14 – 20].

Фундаментальные исследования отечественных учёных — В.В. Болотина, А.Р. Ржаницына, В.Д. Райзера, О.В. Мкртычева, А.В. Перельмутера, О.В. Кабанцева и др. — заложили теоретические основы вероятностного подхода к оценке надёжности строительных конструкций, включая учёт деградации материалов, статистической изменчивости нагрузок и влияния срока эксплуатации на уровень риска [4 – 6]. Тем не менее, практическая реализация этих положений в нормативных документах РФ остаётся фрагментарной и требует системного обобщения, формализации и адаптации к современным условиям проектирования [21, 22, 28, 29].

В международной практике: ISO 2394, Eurocode (EN 1990) и Probabilistic Model Code JCSS оперируют едиными понятиями надёжности: вероятность отказа  $P_f$ , индекс надёжности  $\beta$ , случайные модели нагрузок и сопротивлений и инструменты оценки (FORM/SORM, Монте-Карло, байесовское обновление) [7 – 9]. В Eurocode целевые значения  $\beta$  задают по классам надёжности и референсным периодам (например, 1 год и 50 лет), что обеспечивает согласованную калибровку частных коэффициентов. JCSS ориентирован на унификацию вероятностных моделей и практику калибровки норм, включая учёт неопределённостей моделей, геометрии, эксплуатационных воздействий и деградации [9, 12, 18]. В инженерной практике вероятностные методы применяются в области ответственных инфраструктурных объектов, при оценке существующих конструкций (ISO 13822), а также в задачах жизненного цикла (life-cycle performance) и сервис-лайф дизайна (ISO 15686, ISO 16204, fib Model Code 2010) [10 – 13, 24 – 26, 33, 35].

В рамках второго поколения Еврокодов уточняют положения EN 1990 по требованиям надёжности и калибровке частных коэффициентов, включая развитие приложений по надёжности (Annex C) [25–27]. Публикации последних лет рассматривают согласование целевых индексов надёжности для проектирования и оценки существующих сооружений, а также корректировку частных коэффициентов с учетом риска и контекста применения [30–

32]. В отечественной научной школе развиваются подходы регулируемых коэффициентов надежности и вероятностного проектирования элементов на заданный уровень надежности и долговечности [28, 29]. Для оценок существующих объектов и жизненного цикла все шире используются процедуры обновления надежности по данным обследований и мониторинга (Bayesian updating, SHM) [33].

## 2. Модели и методы

Учёт заданного срока эксплуатации может быть осуществлен в терминах вероятности отказа за период  $T$  или через эквивалентный годовой уровень риска. В простой модели независимых годовых максимумов переменных нагрузок вероятность безотказной работы за  $T$  лет выражается как:

$$P_{no-fail,T} = P_{no-fail,1}^T, \quad (1)$$

а вероятность отказа как:

$$P_f(T) = 1 - (1 - P_{f,1})^T. \quad (2)$$

Индекс надежности для одного события связывается с  $P_f$  по формуле [31, 32]:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), \quad (3)$$

где  $\Phi$  — функция стандартного нормального распределения.

Рациональная для оптимизационных постановок идея, заключается в сохранении одинаковой суммарно допустимой вероятности отказа за весь срок эксплуатации при переходе от референсного срока  $T_{ref}$  к новому сроку  $T$ . Тогда допустимая годовая вероятность отказа растет при меньших  $T$ , а эквивалентный годовой индекс надежности  $\beta_{eq}(T)$  уменьшается. С целью уточнения данного подхода (особенно применительно к реконструируемым или восстанавливаемым сооружениям) можно также учитывать зависимость максимумов, деградацию расчётного сопротивления и обновлять информацию по данным обследований/мониторинга сооружения, что приводит к задачам нестационарной надёжности и байесовского обновления [33, 35].

Предлагаемая методика предназначена для инженерного применения в рамках расчета по предельным состояниям без перехода к полноценному вероятностному расчету всей системы. Частные коэффициенты  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$  трактуют как параметры калибровки, обеспечивающие заданный целевой индекс надёжности для доминирующего механизма отказа. В предположении логнормальности базовых переменных (нагрузочный эффект  $S$  и сопротивление  $R$ ) и при использовании FORM изменение расчетных значений связывают с изменением  $\beta$  через коэффициенты чувствительности  $\alpha_S$  и  $\alpha_R$  и логнормальные стандартные отклонения  $\sigma_{lnS}$  и  $\sigma_{lnR}$ :

$$\sigma_{lnX} = \sqrt{\ln(1 + \nu_X^2)}, \quad (4)$$

где  $\nu_X$  — коэффициент вариации.

В результате получают экспоненциальные формулы пересчета локальных коэффициентов надёжности:

$$\gamma_f(T) = \gamma_f(T_{ref}) \exp[\alpha_S (\beta_T - \beta_{ref}) \sigma_{lnS}], \quad (5)$$

$$\gamma_m(T) = \gamma_m(T_{ref}) \exp[-\alpha_R (\beta_T - \beta_{ref}) \sigma_{lnR}], \quad (6)$$

где  $\beta_{ref}$  — целевой индекс надёжности для стандартного срока  $T_{ref}$ ;  $\beta_T$  — целевой индекс на срок  $T$ ;  $\alpha_S > 0$ ,  $\alpha_R < 0$  — коэффициенты чувствительности метода;  $\sigma_{lnS} \approx \nu_S$ ,  $\sigma_{lnR} \approx \nu_R$  при малых коэффициентах вариации  $\nu = CoV$  или по формуле (4).

Ключевыми практическими вопросами являются выбор статистических параметров нагрузок/материалов и идентификация доминирующей переменной.

Инженерная последовательность выполнения расчётов следующая:

- 1) задание типа предельного состояния, класса ответственности и срока эксплуатации выбранного сооружения;
- 2) выбор референсного уровня надёжности и коэффициентов  $\gamma_f(T_{ref})$ ,  $\gamma_m(T_{ref})$ ;
- 3) вычисление  $\beta_{eq}(T)$  по условию равенства суммарного риска за срок  $T$  и  $T_{ref}$ ;

- 4) определение коэффициентов чувствительности  $\alpha_R$  и  $\alpha_S$  (используя процедуру метода FORM либо по типовым значениям);
- 5) пересчет  $\gamma_f(T)$ ,  $\gamma_m(T)$  по формулам (5) - (6);
- 6) при оценке существующих сооружений — учет апостериорной надежности (факт безотказной работы до момента обследования) через снижение целевого  $\beta$  на величину порядка 0,2–0,3 и повторный пересчет  $\gamma$ .

Предварительные расчёты, выполненные по представленной методике, показывают, что для климатических нагрузок (снег, ветер) при уменьшении срока эксплуатации с 50 до 10–15 лет расчетные  $\gamma_f(T)$  могут быть снижены на 10–20%, а при 5–10 годах — до 15–30%; для постоянных нагрузок и  $\gamma_m$  изменения обычно невелики.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Рассмотрим переменную климатическую нагрузку, для которой в расчетах по СП 20.13330 типично принимается  $\gamma_f(50)=1,4$  при  $T_{ref}=50$  лет. Примем целевой индекс надежности для 50-летнего периода  $\beta_{50}=3,8$  (класс надежности RC2 по EN 1990) и допустимую суммарную вероятность отказа  $P_{f,ref}(50) = \Phi(-3,8) \approx 7,23 \cdot 10^{-5}$ . Эквивалентный годовой индекс  $\beta_{eq}(50)$  определяют из приближения  $P_{f,1} \approx P_f(50)/50$ . Для  $T=30, 15, 10$  и 5 лет при сохранении  $P_f(T)=P_f(50)$  получаем меньший  $\beta_{eq}(T)$  и, соответственно, меньший  $\gamma_f(T)$ . Для иллюстрации примем типовые параметры для доминирующей переменной нагрузки:  $\alpha_S=0,9$ ;  $v_S=0,5$  ( $\sigma_{lnS}$  по (4)). Результаты пересчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пример пересчета коэффициента надежности по снеговой нагрузке при сохранении суммарно допустимого риска

T, лет	$\beta_{eq}(T)$	$\gamma_f(T)/\gamma_f(50)$	$\gamma_f(T)$ при $\gamma_f(50)=1,4$
50	4.678	1.000	1.400
30	4.572	0.956	1.338
15	4.425	0.898	1.257
10	4.337	0.865	1.211
5	4.182	0.810	1.134

Как видно по результатам, приведённым в таблице 1, метод даёт ожидаемые результаты: при уменьшении срока эксплуатации получаем чуть меньшие значения частных коэффициентов. При этом, если по формулам произвести вычисления на больший срок, то получим чуть большие значения коэффициентов надёжности. При этом всё это происходит при неизменном принятом «интегральном» риске.

Данную методику следует применять в случаях, когда требуется согласованная корректировка уровня нормативного запаса под заданный срок эксплуатации без выхода за рамки расчета по предельным состояниям. Она, естественно, подходит для расчётного обоснования временных сооружений, модульных объектов, а также для задач продления ресурса при наличии данных обследований и мониторинга.

Ограничения определяются допущениями модели: независимость годовых максимумов, выбор вероятностных моделей (логнормальность), точность  $\alpha$ -коэффициентов и статистических параметров, а также корректность выделения доминирующего механизма отказа. Для систем с несколькими конкурирующими механизмами отказа рекомендуется применять модели, учитывающие системную надежность и/или моделирование, например, методами Монте-Карло, или применение суррогатных моделей.

### 4. Заключение

- 1) Рассмотрены современные вероятностные подходы к обеспечению надежности сооружений и их отражение в международных нормативных системах.
- 2) Предложена инженерная методика учета заданного срока эксплуатации  $T$  в рамках полувероятностного расчета за счет пересчета  $\beta_{eq}(T)$  и корректировки частных коэффициентов  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$ .

3) Для климатических нагрузок при  $T \approx 10-15$  лет  $\gamma_f$  может быть снижён на  $\sim 10-20\%$  при сохранении суммарно допустимого риска; для  $\gamma_m$  корректировки малы (и могут быть уменьшены дополнительным учётом технологических особенностей производства, как это сделано, например, в СТО 7746710-001-2025).

4) Методика может служить основой для разработки рекомендаций/приложений к нормативным документам РФ по расчёту на заданный срок эксплуатации и оценке остаточного ресурса.

### **5. Благодарности**

Данная работа была реализована в рамках Программы развития НИУ МГСУ на 2025–2036 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. М.: Минстрой России, 2016 (с изм.).
3. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». 30.12.2009 (с изм.).
4. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010.
5. Ведяков И.И., Полевода И.И. Надежность строительных конструкций и расчет по предельным состояниям. М.: АСВ, 2016.
6. Перельмутер А.В., Кабанцев О. В., Пичугин С. Ф. Основы метода расчетных предельных состояний – М.: издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, 2019 – 240 с.
7. EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode — Basis of structural design. CEN, Brussels.
8. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. ISO, Geneva.
9. JCSS. Probabilistic Safety Model Code. Joint Committee on Structural Safety, 2001 (online).
10. ISO 13822:2010. Bases for design of structures — Assessment of existing structures. ISO, Geneva.
11. ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. ISO, Geneva.
12. ISO 16204:2012. Durability — Service life design of concrete structures. ISO, Geneva.
13. fib Model Code 2010. Final draft. Fédération internationale du béton (fib), 2013.
14. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. Wiley, 2007.
15. Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press, 2012.
16. Melchers R.E., Beck A.T. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley, 2018.
17. Rackwitz R. Reliability analysis: a review and some perspectives // Structural Safety. 2001. Vol. 23. No. 4. Pp. 365–395.
18. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? // Structural Safety. 2009. Vol. 31. No. 2. Pp. 105–112.
19. Sudret B. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions // Probabilistic Engineering Mechanics. 2008. Vol. 23. Nos. 2–3. Pp. 245–259.
20. Straub D. Reliability updating with equality information // Probabilistic Engineering Mechanics. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 254–258.
21. Andrieu-Renaud C., Sudret B., Lemaire M. The PHI2 method: a way to compute time-variant reliability // Reliability Engineering & System Safety. 2004. Vol. 84. No. 1. Pp. 75–86. DOI: 10.1016/j.res.2004.06.002.
22. Frangopol D.M., Soliman M. Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions // Structure and Infrastructure Engineering. 2016. Vol. 12. No. 1. Pp. 1–20.
23. European Commission, Joint Research Centre. Eurocodes: background and applications. Handbook series (reliability backgrounds). 2005 (PDF).
24. Helland S. Service life design of concrete structures: opportunities and challenges // Structural Concrete. 2013. Vol. 14. No. 4. Pp. 279–286.
25. European Commission, Joint Research Centre. Reliability background of the Eurocodes: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: 10.2760/9482837. JRC139110 (EUR 40072).
26. Joint Research Centre. Overview of the evolution EN 1990: Eurocode 0 — Basis of structural design. Issue 1 dated 15.10.2020. 2020 (PDF).
27. Formichi P., Landi L., Croce P. A consistent approach to the calibration of partial factors for permanent and variable loads // Structure and Infrastructure Engineering. 2023. Vol. 21. No. 10. Pp. 1695–1709. DOI: 10.1080/15732479.2023.2290704.

28. Надольский В.В. Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1444–1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453.
29. Соловьёв С.А., Копейкин О.Е., Соловьёва А.А. Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 655–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666.
30. Fernández Ruiz M., Tanner P., Martí-Herrero J., et al. Designing new structures and assessing existing ones: a discussion from the perspective of reliability // Structures. 2025. Vol. 70. 107108. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.107108.
31. Su J., Zhang J., Caprani C.C., Zhou J. A practical framework for determining target reliability indices for the assessment of existing structures based on risk-informed decision-making // Structural Safety. 2025. Vol. 114. 102583. DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102583.
32. Pandey M.D., Polset A., Feng M.Q., et al. Life safety in the reliability-based design and assessment of structures // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102453. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102453.
33. Chen C., Wang C., Zhao X., et al. Gaussian process-based Bayesian updating for time-dependent reliability assessment of aging bridges // Probabilistic Engineering Mechanics. 2025. Vol. 81. 103820. DOI: 10.1016/j.probengmech.2025.103820.
34. Wang C., Huang Y., Zhang K., et al. Reliability-based analysis and design of offshore wind turbine support structures: a comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. 112250. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112250.
35. Cheng K., Weng G., Cheng Z. Influence of load partial factors adjustment on reliability design of RC frame structures in China // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 7260. DOI: 10.1038/s41598-023-34241-5.

## REFERENCES

1. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. General provisions. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.)
2. \*SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated edition of SNiP 2.01.07-85\*\*.\* Moscow: Minstroy of Russia; 2016. (In Russ.)
3. Federal Law No. 384-FZ. Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures. 30 Dec 2009. (In Russ.)
4. Raizer V.D. Theory of Reliability of Structures. Moscow: ASV; 2010. (In Russ.)
5. Vedyakov I.I., Polevoda I.I. Reliability of Building Structures and Limit State Design. Moscow: ASV; 2016. (In Russ.)
6. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. Fundamentals of the method of calculated limit states. Moscow: SKAD SOFT Publishing House, ASV Publishing House; 2019. 240 p. (In Russ.)
7. \*EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode — Basis of structural design.\* Brussels: CEN.
8. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. Geneva: ISO.
9. JCSS. Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety; 2001.
10. ISO 13822:2010. Bases for design of structures — Assessment of existing structures. Geneva: ISO.
11. ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. Geneva: ISO.
12. ISO 16204:2012. Durability — Service life design of concrete structures. Geneva: ISO.
13. fib Model Code 2010. Final draft. Fédération internationale du béton (fib); 2013.
14. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. Wiley; 2007.
15. Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press; 2012.
16. Melchers R.E., Beck A.T. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley; 2018.
17. Rackwitz R. Reliability analysis: a review and some perspectives. Structural Safety. 2001;23(4):365–395.
18. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? Structural Safety. 2009;31(2):105–112.
19. Sudret B. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. Probabilistic Engineering Mechanics. 2008;23(2–3):245–259.
20. Straub D. Reliability updating with equality information. Probabilistic Engineering Mechanics. 2011;26(2):254–258.
21. Andrieu-Renaud C., Sudret B., Lemaire M. The PHI2 method: a way to compute time-variant reliability. Reliability Engineering & System Safety. 2004;84(1):75–86. doi:10.1016/j.res.2004.06.002.
22. Frangopol D.M., Soliman M. Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions. Structure and Infrastructure Engineering. 2016;12(1):1–20.
23. European Commission, Joint Research Centre. Eurocodes: background and applications. Handbook series (reliability backgrounds). 2005.
24. Helland S. Service life design of concrete structures: opportunities and challenges. Structural Concrete. 2013;14(4):279–286.

25. Vrouwenvelder T., Dimova S.L., Sousa M.L., et al. *Reliability background of the Eurocodes: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2024. doi:10.2760/9482837. JRC139110 (EUR 40072).
26. Joint Research Centre. *Overview of the evolution EN 1990: Eurocode 0 — Basis of structural design*. Issue 1 dated 15.10.2020. 2020.
27. Formichi P., Landi L., Croce P. A consistent approach to the calibration of partial factors for permanent and variable loads. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2023;21(10):1695–1709. doi:10.1080/15732479.2023.2290704.
28. Nadolski V.V. Adjustable partial factor method for design of steel structures. *Vestnik MGSU*. 2024;19(9):1444–1453. doi:10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453. (In Russ.)
29. Solovyev S.A., Kopeykin O.E., Solovyeva A.A. Probabilistic design of steel trusses for a given reliability and durability. *Vestnik MGSU*. 2025;20(5):655–666. doi:10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. (In Russ.)
30. Fernández Ruiz M., Tanner P., Martí-Herrero J., et al. Designing new structures and assessing existing ones: a discussion from the perspective of reliability. *Structures*. 2025;70:107108. doi:10.1016/j.istruc.2025.107108.
31. Su J., Zhang J., Caprani C.C., Zhou J. A practical framework for determining target reliability indices for the assessment of existing structures based on risk-informed decision-making. *Structural Safety*. 2025;114:102583. doi:10.1016/j.strusafe.2025.102583.
32. Pandey M.D., Polset A., Feng M.Q., et al. Life safety in the reliability-based design and assessment of structures. *Structural Safety*. 2025;113:102453. doi:10.1016/j.strusafe.2024.102453.
33. Chen C., Wang C., Zhao X., et al. Gaussian process-based Bayesian updating for time-dependent reliability assessment of aging bridges. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2025;81:103820. doi:10.1016/j.probenmech.2025.103820.
34. Wang C., Huang Y., Zhang K., et al. Reliability-based analysis and design of offshore wind turbine support structures: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112250. doi:10.1016/j.rser.2022.112250.
35. Cheng K., Weng G., Cheng Z. Influence of load partial factors adjustment on reliability design of RC frame structures in China. *Scientific Reports*. 2023;13:7260. doi:10.1038/s41598-023-34241-5.

#### Информация об авторах

##### Смирнов Владимир Александрович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия.

канд. техн. наук, доц., доцент кафедры Строительной и Теоретической Механики, заведующий Лабораторией Динамики Сооружений НИИ ЭМ НИУ МГСУ

E-mail: [VASmirnov@mgsu.ru](mailto:VASmirnov@mgsu.ru)

#### Information about authors

##### Smirnov Vladimir A.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

candidate in tech. sc., associated prof. of the dep. of structural and theoretical mechanics, head of Structural Dynamic Lab.

E-mail: [VASmirnov@mgsu.ru](mailto:VASmirnov@mgsu.ru)

Статья поступила в редакцию 17.01.2026  
Одобрена после рецензирования 08.02.2026  
Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 17.01.2026  
Approved after reviewing 08.02.2026  
Accepted for publication 13.02.2026