

Перспектива совершенствования методов расчета строительных конструкций с учетом уровня надежности

Ю.А. Беленцов¹, Ш.М. Мамедов², Н.С. Воронцова², П.Н. Пачулия²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Рассматриваются методы расчета и проектирования строительных конструкций, позволяющие гарантировать вероятность безотказной работы в течение срока службы, а значит и уровень надежности. По показателю безотказности предлагается схема нормирования надежности проектируемых строительных конструкций и увязывается с оценкой показателей качества возводимых конструкций. Вводятся гарантированные с заданной вероятностью безотказной работы показатели качества конструкции, не связанные с прочностью: геометрические размеры, модуль деформации и упругости, с учетом вариативности свойств и технологии. Определяются соответствующие коэффициенты запаса, обеспечивающие требуемую вероятность безотказной работы. Развивается схема расчета проектирования конструкций с требуемым уровнем надежности в процессе проектирования, возведения и эксплуатации конструкций.
Ключевые слова: метод расчета конструкций, надежность, безотказность, коэффициент запаса, класс по прочности, индекс надежности, совершенствование расчета конструкций.

Введение

Современные нормативные документы по расчету конструкций предполагают риск-ориентированный подход и обеспечение требуемого уровня надежности. Реализуется концепция управляемой надежности и долговечности. Перспективно развиваются полностью вероятностные методы определения коэффициентов надежности. Эквивалентом термина «вероятность разрушения» является термин «индекс надежности» β , формально определяемый, как отрицательное значение стандартной переменной, распределенной по нормальному закону, соответствующее вероятности разрушения P_f [1, 2].

Характеристика безопасности получила интерпретацию: в координатной плоскости обобщенных случайных переменных – сопротивления элемента R и нагрузки Q . В этих координатах характеристика безопасности β представляет собой кратчайшее расстояние от начала

координат до проектной точки, лежащей на кривой контура плотности распределения [3, 4].

Современный метод предельных состояний является на сегодняшний день наиболее достоверным. Учет уровня надежности зданий и сооружений формируется опосредованно, создавая запас несущей способности, что не позволяет оценить его численно.

Материалы и методы

Основной проблемой метода предельных состояний и частных коэффициентов надежности является сложность прогнозирования вероятности отказа конструкции или иной показатель, гарантирующий уровень надежности [5].

При этом выпадает из внимания, что надежность обеспечивается на всем периоде «жизненного цикла» конструкции. В современной литературе это описывается понятием триада надежности. Поскольку надежность закладывается при проектировании, оценивается и обеспечивается в процессе строительства, поддерживается в процессе эксплуатации. При этом контроль качества строительных конструкций является важной составляющей надежности и является залогом качественной и эффективной работы материалов в конструкциях зданий и сооружений. Контроль качества далеко не всегда обеспечивает высокий уровень точности и достоверности измерительных и контрольных операций [6]. Показатели качества оцениваются двумя физическими величинами, оцениваемыми в результате контроля (номинальным значением и допуском). Практически, в расчетах конструкций на любом этапе «жизненного цикла» участвует только номинальная величина, отклонения от номинала в расчетах не учитываются. Это обуславливает отсутствие взаимоувязки реальных показателей качества с учетом допуска на изделие с уровнем надежности [6].

Для характеристики классов надежности (RC) может быть использовано понятие индекса надежности β . Каждому из трех классов последствий CC1, CC2 и CC3 соответствует один из трех классов надежности RC1, RC2 и RC3.

Мерой надежности считается вероятность безотказной работы:

$$P_S = (1 - Pf) \quad (1)$$

где Pf – вероятность отказа в течение соответствующего базового периода времени; P_S – вероятность безотказной работы.

Если рассчитанная вероятность отказа выше, чем ее заданное целевое значение P_0 , то сооружение должно рассматриваться, как не надежное.

Альтернативной мерой надежности является условно определенный индекс надежности β , который связан с Pf соотношением:

$$Pf = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

$\Phi u(Pf)$ здесь описывает функцию стандартного нормального распределения.

Для периода в n лет характеристика безопасности вычисляется по приближенной формуле Туркстра [7]:

$$\Phi(\beta n) = [\Phi(\beta 1)]^n \quad (3)$$

$$P_n = (1 - P_1)^n \quad (4)$$

В расчетах с учетом уровня надежности не учитывается случайный характер всех физических величин, участвующих в расчете. Например, геометрические размеры. Хотя EN1990 подразумевают возможность вероятностного подхода. Влияние вариативности нагрузки в расчетах учитывается значениями квантиля. Подразумевается переход на гарантированные величины.

Перспективой совершенствования методов расчета конструкций является возможность гарантировать уровень надежности, при проектировании, проверить и обеспечить в процессе строительства и

поддерживать в процессе эксплуатации [8]. Основное направление заложено в работах Стрелецкого, Корнвела, Ржаницына, в которых уровень надежности оценивается с учетом коэффициента запаса по несущей способности. Необходимо сравнивать гарантированную несущую способность с нагрузочным эффектом, выраженным с требуемой достоверностью, исходя из гарантированных показателей внешней нагрузки [9, 10]. При нормировании показателей для определения коэффициентов надежности метода расчета используют нормальный закон распределения случайных величин нагрузочного эффекта и несущей способности. При учете величин с другим характером распределения рекомендуется привести к нормальному закону распределения. Например, для описания значений максимальных скоростей ветра рекомендуется использовать распределение Гумбеля [11], при этом увеличив количество наблюдений за характером распределения. Использование различных видов распределения не принципиально уточняет картину расчетов конструкций, но существенно усложняет расчеты.

Нужен переход на вероятностные методы расчета конструкций, в которых влияющие факторы представляются случайной величиной, нормированной с известной достоверностью. Например, при определении несущей способности конструкции по классу материала и по прочности при соответствующем НДС, необходимо обеспечить определение не только геометрических показателей конструкции с гарантированной вероятностью, но и определение внутренних усилий и коэффициентов, учитывающих условия работы [12-14].

Предложенный метод расчета конструкций по уровню надежности основан на теоретической базе, заложенной в работах Ржаницына. В них фигурирует не прочность материала или конструкции, как было в дальнейшем реализовано в понятии «класс», а несущая способность и

нагрузочный эффект. Поэтому нет различия применения методов расчетов конструкций для создания вероятностной схемы расчета, например, деформаций. Введение понятия «класс по прочности» - это первый шаг внедрения расчетных методов теории надежности в вероятностном проектировании строительных конструкций.

Результаты

Сущность метода расчета по уровню надежности (допустимой вероятности отказа конструкции) заключается в том, что в процессе расчета по предельным состояниям используются гарантированные с вероятностью 95% величины. Например, класс по прочности, геометрические размеры, модуль деформации, класс арматуры, размеры и схема установки арматуры, допустимые дефекты и деформации и другие (см. рис. 1).

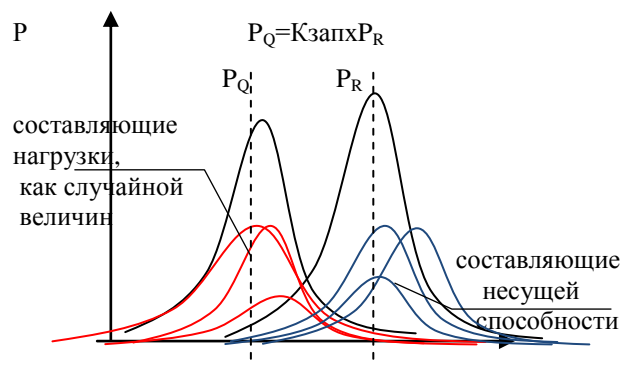


Рис. 1. Сравнение несущей способности и нагрузочного эффекта, как суммирующих набор случайных факторов: нагрузок, прочности, геометрических размеров и д.р.

Практическая реализация должна разделяться на несколько этапов вне зависимости от вида материала:

- 1) Определение основных показателей физико-механических свойств материалов, участвующих в расчетах конструкций с гарантированной величиной (95%) класса прочности. К ним можно отнести класс прочности (R), класс по модулю упругости и деформаций (E_0 и E),

класс по образованию трещин (R_{ser}) и другие. Частично реализовано по прочности. Особенностью этого этапа является учет $K_{зан}$ (отношение фактической экспериментально полученной прочности к расчетной), зависящего от коэффициента вариации ν_R , ν_E , ν_Q , свойств материала и нагрузочного эффекта. ν_Q на первом этапе может быть принята, как при определении класса материала, исходя из достоверности $P=0,95$ и требуемой вероятности отказа P_f .

Для класса прочности характеристика безопасности:

$$\beta = (\beta_{R^2} = \beta_{Q^2})^{1/2} \quad (5)$$

или:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{K_{зан} - 1}{\sqrt{(\nu_R^2 K_{зан} + \nu_Q^2)}} \quad (7)$$

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi(\beta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (8)$$

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp\left(\frac{-\beta^2}{2}\right) \quad (9)$$

Где β_R , β_Q – индекс надежности по несущей способности и нагрузке; \bar{R} , \bar{Q} – значение прочности, и нагрузочного эффекта; S_R , S_Q – среднеквадратическое отклонение прочностных свойств материала и нагрузок; ν_R , ν_Q – коэффициент вариации прочностных свойств материала и нагрузок.

2) Геометрический размер с учетом случайного процесса отклонения конструкции от номинального размера (этап?). Показатели геометрических размеров конструкции с учетом коэффициента вариации $\nu_{z,p}$. Гарантированному показателю геометрического размера будет соответствовать величина, которая отличается от фактически измеренной по

результатам контроля на величину вариативности (с учётом доверительной вероятности P , количества измерений n , коэффициента Стьюдента и коэффициента вариаций v , предполагается нормальный характер распределения величин).

Начальные отклонения размеров могут быть описаны соответствующей случайной переменной, а зависящие от времени отклонения описываются зависящими от времени систематическими отклонениями размеров. Для объяснения данных фундаментальных понятий на рис. 2 представлены функция распределения вероятности для структурного размера a и его номинальный (базовый) размер a_{nom} , систематическое отклонение $\delta a_{sys}(t)$, предельное отклонение Δa и ширина допуска $2\Delta a$.

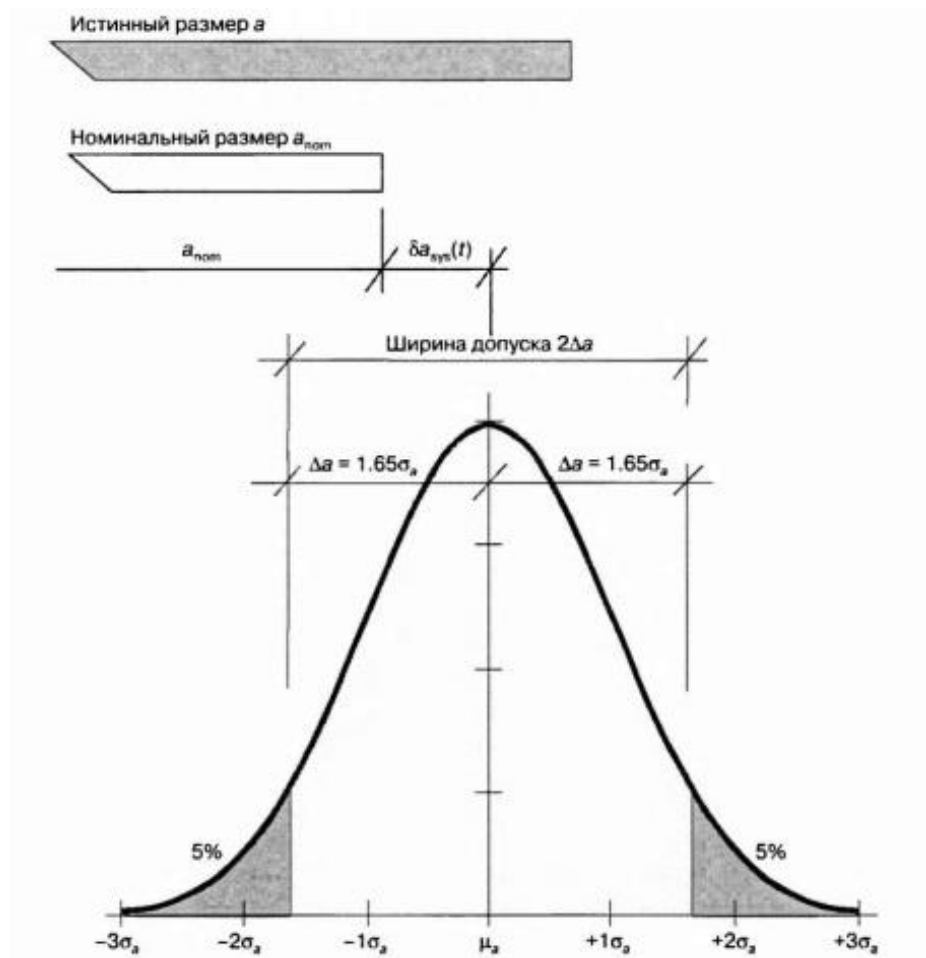


Рис. 2. – Характеристики размера вероятностного подхода к определению геометрических размеров конструкции

Номинальный (базовый) размер a_{nom} является базовым размером, который используется в рабочих чертежах и документации, и к которому относятся все отклонения. Систематическое отклонение $\delta a_{sys}(t)$ является зависящим от времени значением, представляющим собой зависящие от времени пространственные отклонения. Δa соответствует вероятности 0,05, что является вероятностью, традиционно используемой для определения характеристической прочности. В данном случае предельное отклонение задается, как $\Delta a = 1,65\sigma_a$. μ_a - математическое ожидание (среднее значение) геометрических размеров в серии образцов.

В общем случае, квантиль a_p размера a , соответствующий вероятности p , может быть выражен следующим образом:

$$a_p = a_{nom} + \delta a_{sys}(t) + k_p \sigma_a \quad (10)$$

Где: коэффициент k_p зависит от вероятности p и заданного типа распределения [15]; σ_a - среднеквадратическое отклонение геометрических размеров измеренных в серии образцов.

Для прямоугольных сечений определяющими будут величина высоты и ширины сечения в соответствии с ГОСТ Р ИСО 2859-1-2007. Принципиальный момент такого подхода к обеспечению надежности строительных конструкций позволяет связать уровень надежности с требованиями и параметрами контроля качества.

В результате необходимо назначить точность геометрических размеров с учетом разброса геометрических размеров и точности измерения. Принимается $v_{z.p.}=0,02$, исходя из требуемой точности изготовления для конструкций, например, бетонных и железобетонных. $T=1,95$ принимается для двустороннего интервала при $P=0.95$ и $n=\infty$. Принципиальное отличие от схемы, используемой для класса бетона, заключается в двустороннем интервале раскрытия t , поскольку отклонения и «+», и «-» недопустимы.

3) Учет влияния на уровень надежности расчетных моделей и формул необходим, чтобы гарантировать искажение с квантилем, укладываемым в 5%. Требуется оценить точность расчетных моделей и формул и ввести учет нестабильности расчетных формул и коэффициентов работы с соответствующим коэффициентом вариации для каждого вида предельного состояния конструкций. При проектировании и контроле качества в процессе возведения и эксплуатации допустимо ориентироваться на пробные конструкции или натурные испытания.

4) Нагрузочный эффект. Рассчитывается как гарантированная величина с вероятностью 0,95, как допустимо в еuronормах. Вопрос нормирования нагрузок сложен и требует отдельных исследований, но решение, в принципе, существует и есть работы, в которых оно применяется [15]. Подобный подход позволит гармонизировать наши нормы с европейскими по уровню действия нагрузки.

5) Для обеспечения требуемого уровня надежности нужно связать параметры контроля качества с уровнем надежности в процессе эксплуатации, например, за счет снижения расчетного поперечного сечения или прочности в процессе коррозии, или иных процессов. Оценивается резерв несущей способности при различных НДС и группах предельных состояний, как превышение над нагрузочным эффектом. Принципиально важно, что в дальнейшем при определении параметров, например, качества и класса бетона по прочности, мы закладываем в процессе расчета гарантированные характеристики достоверности, индекса надежности, а, значит, и вероятности безотказной работы. Поэтому можно использовать полученные результаты для оценки вероятности разрушения всей конструкции и проектировать конструкции с требуемым уровнем надежности.

Обсуждение

Принципиальный момент метода расчета по уровню подразумевает приведение любой характеристики к нормальному распределению. Потому что две нормально распределенные характеристики, например, прочность и геометрические размеры, позволят определить несущую способность по 1 группе предельных состояний, для которой будет справедливо нормальное распределение. Это позволит произвести сравнение внутренними усилиями, в свою очередь, приведенными к нормальному распределению. С одной стороны, это приведет к снижению точности расчетных формул, с другой величина будет меньше, чем точность измерения физических величин. Например, прочность стандартных разрушающих методов имеет точность измерения в пределах 5-7%.

Среди достоинств данного метода можно выделить модульность и адаптивность, то есть возможность использовать существующие наработки и вносить легкие изменения в процессе совершенствования. Второе принципиальное достоинство - возможность связать основные параметры расчета и процессов контроля качества в процессе строительства и их изменения в процессе эксплуатации. Это позволит аналитическими методами (непрерывно) оценивать уровень надежности и при необходимости вводить корректирующие воздействия, например, дополнительные осмотры и ремонты.

Выводы

Расчет по уровню надежности позволит снять несколько существенных проблем:

- Можно контролировать вероятность разрушения конструкций в процессе строительства, то есть, перейти на вероятностные методы расчёта.

- Все конструкции, проектируемые из разных материалов, будут обладать одинаковым уровнем надежности при расчёте по разным нормативным документам.

- появится возможность непосредственно связать контроль в процессе проектирования, строительства и эксплуатации с уровнем надежности. На сегодняшний момент, например, контроль геометрических размеров, проводится по детерминированной схеме, что приводит к искажению результатов.

- возможно создать схему контроля, которая обеспечит наследственность передачи информации в процессе проектирования, строительства и эксплуатации конструкции, что очень важно для совершенствования методов расчета.

- в зависимости от требуемой функциональной нагрузки проектируемых конструкций зданий и сооружений, можно будет создавать требуемый уровень надежности, например, для ответственных конструкций, соответствующий запас несущей способности обеспечит требуемую вероятность разрушения при разных НДС.

Литература

1. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

2. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: АСВ, 1998. 304 с.

3. Cornell C.A. A Probability Based Structural Code // ACI-Journal. 1969. №12, Vol. 66. С. 974-985.

4. Belentsov Yu.A., Smirnova O.M. Influence of acceptable defects on decrease of reliability level of reinforced concrete structures // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). November 2018. Volume 9, Issue 11. pp. 2999–3005.

5. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010. 384 с.
 6. Belentsov Y.A., Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Improvement of competitive edge of precast reinforced concrete by increasing the reliability level and quality control // Volume 666, Quality Management and Reliability of Technical Systems. St Petersburg, Russian Federation: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 20–21 June 2019. URL: doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012037..
 7. Turkstra C. Theory and Structural Design: Study No. 2. Canada: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, 1972. 124 p.
 8. Индейкин А.В., Чижов С.В., Шестакова Е.Б., Антонюк А.А., Кулагин Н.И., Смирнов В.Н., Карпов В.В., Голицынский Д.М. Приближенные методы оценки надежности балочных пролетных строений железнодорожных мостов // Инженерно-строительный журнал. 2017. №7(75). С. 150–160. URL: doi.org/10.18720/MCE.75.15.
 9. Lesovik V.S., Belentsov Y.A., Klementyeva A.A., Elistratkin M.Y. Transition to the assessment of the brickwork quality in terms of compressive strength class // Lecture notes in Civil Engineering. 2021. №147. pp. 131–137. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_20.
 10. Краснощеков Ю.В. О безопасности железобетонных мостов с плитными пролетными строениями // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2018. №15(6). С. 922-932. URL: doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-922-932.
 11. Aydin D. Estimation of the lower and upper quantiles of Gumbel distribution: an application to wind speed data // Applied Ecology and Environmental Research. January 2018. №16(1). pp. 1-15. URL: doi.org/10.15666/aeer/1601_001015.
 12. Mkrtycheva O.V., Dzhinchvelashvilia G.A., Busalova M.S. Assessing the reliability of a multi-storey monolithic concrete building with a base // Procedia
-

Engineering. 2015. №111. pp. 550 – 555 URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.041.

13. Pichugin S.F. Reliability estimation of industrial building structures // Magazine of Civil Engineering. 2018. №7 (83). pp. 24-37. URL: doi.org/10.18720/MCE.83.3.

14. Tao Y.R., Cao L., Cheng G.Q., Huang Zh. H. Safety analysis of structures with probability and evidence theory // International Journal of Steel Structures. 2016. Vol. 16. №2. pp. 289–298. URL: doi.org/10.1007/s13296-016-6003-3.

15. Handbook 2 reliability backgrounds partnership. Development of skills facilitating implementation of eurocodes. Prague. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. 2005. p. 254.

References

1. Rzhanicyn A.R. Teoriya rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost' [Theory of calculation of building structures for reliability]. Moskva: Strojizdat, 1978. 239 p.

2. Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii [Theory of reliability in construction design]. Moskva: ACB, 1998. 304 p.

3. Cornell C.A. A Probability Based Structural Code // ACI-Journal. 1969. №12, Vol. 66. Pp. 974-985.

4. Belentsov Yu.A., Smirnova O.M. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). November 2018. Volume 9, Issue 11. Pp. 2999–3005.

5. Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzhenij [Theory of reliability of structures]. Moskva: ACB, 2010. 384 p.

6. Belentsov Y.A., Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Volume 666, Quality Management and Reliability of Technical Systems. St Petersburg, Russian Federation: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 20–21 June 2019. URL: doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012037.



7. Turkstra C. Theory and Structural Design: Study No. 2. Canada: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, 1972. 124 p.
8. Indejkin A.V., Chizhov S.V., Shestakova E.B., Antonjuk A.A., Kulagin N.I., Smirnov V.N., Karpov V.V., Golicynskij D.M. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2017. №7(75). Pp. 150–160. URL: doi.org/10.18720/MCE.75.15.
9. Lesovik V.S., Belentsov Y.A., Klementyeva A.A., Elistratkin M.Y. Lecture notes in Civil Engineering. 2021. №147. Pp. 131–137. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_20.
10. Krasnoshhekov Ju.V. Nauchnyj recenziruemyj zhurnal "Vestnik SibADI". 2018. №15 (6). Pp. 922-932. URL: doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-922-932.
11. Aydin D. Applied Ecology and Environmental Research. January 2018. №16(1). Pp. 1-15. URL: doi.org/10.15666/aeer/1601_001015.
12. Mkrtycheva O.V., Dzhinchvelashvilia G.A., Busalova M.S. Procedia Engineering. 2015. №111. Pp. 550 – 555 URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.041.
13. Pichugin S.F. Magazine of Civil Engineering. 2018. №7 (83). Pp. 24-37. URL: doi.org/10.18720/MCE.83.3.
14. Tao Y.R., Cao L., Cheng G.Q., Huang Zh. H. International Journal of Steel Structures. 2016. Vol. 16. №2. Pp. 289–298. URL: doi.org/10.1007/s13296-016-6003-3.
15. Handbook 2 reliability backgrounds partnership. Development of skills facilitating implementation of eurocodes. Prague. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. 2005. P. 254.

Дата поступления: 27.09.2023

Дата публикации: 25.01.2024