

В.С. УТКИН¹, С.А. СОЛОВЬЕВ¹, О.В. ЯРЫГИНА¹¹ ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия

РАСЧЕТ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО ЗАДАННОМУ ЗНАЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРИ НЕПОЛНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Федеральный Закон РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» содержит требования обеспечения механической (конструкционной) безопасности несущих элементов строительных конструкций на стадиях проектирования, изготовления, строительства и эксплуатации. Количественной мерой механической (конструкционной) безопасности может служить надежность, риск, живучесть и т.д. В статье рассмотрены предложения о новом алгоритме расчетов несущих элементов конструкций, в основе которого задано проектное значение надежности по одному или по нескольким критериям работоспособности элементов при ограниченной статистической информации. Приведены примеры расчетов несущего элемента вероятностным методом. Расчет надежности несущих элементов в статье основывается на положениях теории возможностей и теории нечетких множеств. В качестве меры надежности используется необходимость безотказной работы N и возможность безотказной работы R . Предлагаемый подход к порядку (алгоритму) расчета несущих элементов имеет преимущество перед известным традиционным порядком расчета, т.к. сокращает время расчета и соответственно стоимость. Предложенные алгоритмы расчетов несущих элементов конструкций по заданному значению надежности могут быть использованы при подборе сечений несущих элементов строительных конструкций по критериям работоспособности первой и второй группы предельных состояний с обеспечением заданного значения надежности, в частности, при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах, что обеспечит выполнение требований стандарта ГОСТ 27751-2014.

Ключевые слова: алгоритм расчета элемента, надежность (безопасность эксплуатации), прочность, жесткость, стальная балка, вероятность отказа

V.S. UTKIN¹, S.A. SOLOVYEV¹, O.V. YARIGINA¹¹Vologda State University, Vologda, Russia

STRUCTURAL ELEMENTS DESIGN ON RELIABILITY LEVEL IN CASE LIMITED STATISTICAL DATA

Abstract. Russian Federation Federal Law No. 384-FZ "Technical regulations on the safety of buildings and structures" contains requirements for ensuring the mechanical (structural) safety of structural elements of structures at the stages of design, manufacture, construction and operation. Quantitative measures of mechanical (structural) safety are reliability, risk, survivability, etc. The article considers the new algorithm for design load-bearing structural elements based on the reliability index for one or more limit state criteria with limited statistical data. Examples of design of the load-bearing element using the probabilistic method are given. The method is based on the provisions of the possibility theory and fuzzy sets theory. As a measure of reliability, the necessity N and the possibility R of non-failure are used. The proposed approach to the order (algorithm) for load-bearing elements design has an advantage over the known traditional approach since it reduces the design time and, accordingly, the costs. The proposed algorithms for structural elements design for a given reliability level can be used when selecting cross-sections of load-bearing elements of structures according to the limit state criteria of the first and second groups with the specified reliability level, in particular, with limited statistical information about the controlled parameters, which will ensure compliance with the requirements of GOST 27751-2014.

Keywords: design method, operational safety, strength, reliability, stiffness, steel beam, failure probability.

Введение

Основная цель в расчетах несущих элементов строительных конструкций на стадии проектирования заключается в определении необходимых значений размеров и форм поперечных сечений элементов, обеспечивающих безопасность и долговечность работы конструкции на стадии эксплуатации. Такие расчеты с учетом требований безопасности и экономичности проводятся по первой и второй группам предельных состояний по критериям работоспособности, приведенными в нормативной литературе: стандартах, СНиПах, сводах Правил и т.д. В последнее время появился целый ряд документов, содержащих требования обеспечения надежности – эксплуатационной безопасности строительных конструкций. К ним относятся: Межгосударственный стандарт ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», вступивший в силу с 2015 года; Закон РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 2009 г.; ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» и др.

В [1] отмечено, что общепринятые методы поиска оптимальных параметров изделия, основанные на неоднократном проектировании и опытной проверке, в настоящее время оказываются непригодными из-за своей длительности. Отсюда следует необходимость нахождения теоретических способов определения надежности изделия, заменяющих его перепроектирование и опытную проверку.

В данной работе предлагается расчеты элементов конструкций начинать с удовлетворения требования обеспечения заданного по проекту значения надежности несущих элементов конструкций. По результатам расчетов надежности всех несущих элементов конструкций устанавливается значение надежности всей конструкции как системы, состоящей из отдельных элементов и образующих последовательные, параллельные и смешанные системы в понятиях теории надежности. Дальнейшая проверка их надежности по условию проектного задания, как принято в настоящее время, не требуется и решение является окончательным. При таком подходе к расчетам несущих элементов конструкций возникает необходимость в разработке нормативных положений на значения надежности несущих элементов конструкций и соответствующего программного обеспечения.

Проблема в разработке методов расчета надежности при проектировании и эксплуатации строительных конструкций еще остается актуальной на данный момент, но заметны успехи в ее развитии. В работе [2] постулируется, что полувероятностный расчет (метод предельных состояний) содержащийся в строительных нормах расчетов не позволяет сделать вывод о вероятности выхода из строя сооружения или его элемента, не дает возможность спроектировать конструкцию с определенным уровнем безотказности сооружения и не позволяет провести полный качественный анализ проектного решения по заданным критериям работоспособности с количественным показателем безопасности эксплуатации несущих элементов.

В [3] доктора технических наук Митасов В.М. и Адищев В.В. отмечают, что решения в вероятностной постановке расчетов надежности, пригодные для практического использования, в настоящее время ограничены или отсутствуют, и применение существующих вероятностно-статистических методов лишь декларируется. О таком же состоянии в практике расчетов надежности строительных конструкций содержится в [4]. В [5] отмечается важность альтернативных подходов к расчетам надежности, например, на основе теории нечетких множеств (fuzzy sets).

В.Д. Райзер в работе [6] отмечает, что в настоящее время обобщенный российский и мировой опыт может служить опорой для разработки новых стандартов по проектированию с вероятностной оценкой прочности, жесткости и других критериев работоспособности несущих элементов, а при реставрации и обследовании эксплуатируемых сооружений можно использовать подходы к оценке безопасности при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах. В Научно-исследовательском институте железобетона приводят тезис о том, что настоящие методы расчета по предельным состояниям не отвечают на

вопрос о количественной оценке риска (вероятностной опасности) при проектировании и эксплуатации сооружений, а более объективной характеристикой безопасности элементов сооружений можно считать результаты их расчетов, полученные на основе вероятностных методов расчета с использованием положений теории надежности. В работах [7, 8] д.т.н., проф. А.Г. Тамразян указывает на то, что расчет надёжности и риска несущих конструкций и ключевых элементов является необходимым условием безопасной эксплуатации зданий и сооружений. Принцип обеспечения безопасности конструкций на стадиях разработки проекта и эксплуатации сооружения реализуется в результате расчетов надежности элементов сооружений, который начинает получать особое развитие в последнее время, в том числе благодаря введению Межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014.

Интерес к расчетам надежности несущих элементов конструкций в РФ подтверждается изданием за последние годы монографий [9, 10 и др.] по данной проблеме. Расчеты несущих элементов конструкций на заданный уровень надежности обсуждается также в научных статьях ученых за рубежом. В [11] рассматривается применение вероятностных подходов при оценке безопасности атомных электростанций. В [12] приведен подход к расчету надежности элементов строительных конструкций без использования функций распределений, а на основе моментов случайных величин. В [13, 14, 15] приведены методы расчетов к анализу надежности элементов строительных конструкций на основе вероятностно-статистических подходов.

Предлагаемый в данной работе алгоритм расчетов несущих элементов по заданному в проектном задании значению надежности рассмотрим на отдельных примерах расчетов несущих элементов строительных конструкций. Предварительно отметим, что в соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 27751-2014, расчет надежности несущих элементов конструкций в целом рекомендовано проводить вероятностно-статистическими методами, «при наличии достаточных данных об изменчивости основных параметров» в математических моделях предельных состояний для их статистического анализа. Для выполнения требований ГОСТ 27751-2014 наибольшую проблему представляет выявление статистической информации о контролируемых параметрах в математических моделях предельных состояний, особенно на стадии проектирования. Зачастую на практике приходится ограничиваться малым объемом статистической информации. В таких случаях вместо вероятностно-статистических подходов приходится использовать другие (менее информативные) методы расчетов надежности. К ним относятся методы на основе теории возможностей, теории Демпстера-Шефера, теории интервальных средних и др. В практике расчетов надежности строительных несущих элементов получили наибольшее развитие и применение методы на основе теории возможностей. В дальнейшем расчет конструкций по надежности будет построен на «возможностном» методе [5, 16, 17, 18]. Сущность его заключается в том, что на основе малой информации об изменчивости контролируемых параметров в математических моделях предельных состояний контролируемые параметры описываются условными средними значениями, мерой их изменчивости и уровнем среза (риска) в понятиях теории возможностей на основе работ [5, 16, 17, 18].

В качестве примера, рассмотрим расчет стальной балки на стадии проектирования по критерию прочности по существующему алгоритму в практике расчетов по предельным состояниям. Расчетная математическая модель предельного состояния для расчета на изгиб стальной балки первого класса на прочность по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» представляется в виде:

$$\frac{M}{R_y \cdot W_{\min} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где M – максимальный изгибающий момент от расчетной нагрузки;

W_{min} – минимальный момент сопротивления поперечного сечения стальной балки (в дальнейшем будем писать $W=W_{min}$);

R_y – расчетное сопротивление стали, принимаемое по СП 16.13330;

γ_c – коэффициент условий работы (коэффициент «запаса»).

По существующему в настоящее время алгоритму (порядку) расчет балки по критерию прочности выполняется по известным значениям M , R_y , γ_c и заключается в определении по (1) требуемого минимального значения W_{min} с учетом прочности и экономичности. Затем для ответственных по уровню безопасности элементов конструкций должна быть проверена надежность запроектированной балки по критериям прочности при наличии информации об изменчивости случайных величин в (1) в виде изгибающего момента и прочности материала балки. Если в результате расчета будет установлено, что значение требуемой по проекту надежности для балки по прочности не выполняется, то задаются большим значением W , изменяют класс стали или расчетную схему балки, и расчет надежности балки повторяют до удовлетворения требований по заданному значению ее надежности. Недостаток расчета балки по (1) заключается еще в том, что в (1) содержится коэффициент $\gamma_c > 1$, вызванный некоторой неопределенностью (недоверностью) результатов расчета реальным условиям работы балки.

Модели и методы

Рассмотрим иной порядок расчета того же элемента по тому же критерию прочности материала, но при заданном (по проекту) значению надежности. Мерой надежности могут быть вероятность безотказной работы, вероятность отказа, возможность безотказной работы и т.д. Упростим задачу тем, что балку будем проектировать из прокатных стандартных двутавров, считая их геометрические характеристики детерминированными величинами в силу малой их изменчивости в реальных условиях изготовления.

Преобразуем расчетную математическую модель (1) без введения коэффициента γ_c , если не требуются какие-либо особые условия работы балки:

$$\tilde{M} \leq \tilde{\sigma}_{ult} W_{min}, \quad (2)$$

где $\tilde{\sigma}_{ult}$ – предельное напряжение для стали балки, которое принимается в виде напряжения соответствующего условному пределу текучести стали $\sigma_{0,2}$, полученный на основании результатов испытаний образцов стали.

Волнистой линией над символами в (2) обозначены случайные величины (или нечеткие переменные – в терминах теории возможностей) [21, 22].

Для частных случаев, (2) можно представить в виде:

$$\frac{\tilde{q}l^2}{8} \leq \tilde{\sigma}_{ult} W_{min}, \quad \text{или} \quad \frac{\tilde{F}l}{4} \leq \tilde{\sigma}_{ult} W_{min},$$

где \tilde{q} и \tilde{F} – распределенная и сосредоточенная в середине пролета l балки нагрузки.

Введем обозначения, принятые в методе расчетов по теории возможностей в виде $\tilde{M} = X$; $\tilde{\sigma}_{ult} = Y$. Тогда математическую модель предельного состояния (2) можно записать в виде:

$$X \leq Y \cdot W.$$

$(\bar{\sigma}_{ult} - R_u)$ половина ширины всего интервала изменчивости $\tilde{\sigma}_{ult}$. Нижнее значение $\tilde{\sigma}_{ult}$ будет равно нормативному сопротивлению с вероятностью 0,95.

На стадии эксплуатации, как правило, значение $\sigma_{0,2}$ определяют по результатам неразрушающих испытаний стали балки, например, метод «царапання» [23]. Для нагрузки исходная статистическая информация устанавливается по СП 20.13330.2017 «Нагрузки и воздействия» по тому же принципу.

По (2) находят значение W , значение которого будем отождествлять со значением N из интервала $[N; R]$. Условие (2) и его решение можно представить в графическом виде, представленным на рисунке 2. Среднее значение для $Y \cdot W$ равно $a_y W$, а характеристика изменчивости равна $b_y W$ при одинаковых значениях уровня среза (риска) α для \tilde{M} и $\tilde{\sigma}_{ult}$ (X и Y).

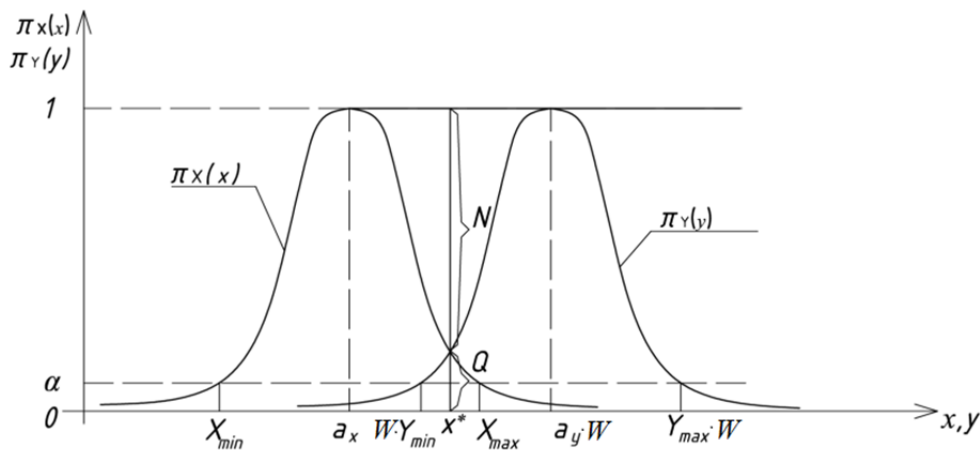


Рисунок 2 - Условное графическое представление решения по условию (2) при заданном (известном) значении уровня среза (риска) α

Требуемый момент сопротивления сечения балки W по критерию надежности определяется следующим образом: вычисляются параметры нечеткой переменной X в виде a_x и b_x при некотором значении α . Затем по известным параметрам a_x и b_x функции распределения возможностей $\pi_X(x)$ и требуемому по проекту значению необходимости безотказной работы из $N=1-Q$, где возможность отказа Q вычисляется по значению абсциссы $x^* > a_x$ как показано на рисунке 2 или по формуле:

$$Q = \exp\left\{-\left[(x^* - a_x)/b_x\right]^2\right\}. \quad (4)$$

Из (4) при $x^* > a_x$ (см рисунок 2) имеем:

$$x^* = a_x + b_x \sqrt{-\ln Q}. \quad (5)$$

Этому значению x^* соответствует значение отказа и для функции $\pi_Y(W \cdot y)$.

Для левой ветви функции $\pi_Y(yW)$ при $x^* \leq a_y W$ имеем $\pi_Y(x^*) = \exp\left[-(a_y W - x^*)/b_x W\right]^2$. Отсюда с учетом (3) имеем $-\ln Q = [(a_y W - x^*)/b_x W]^2$ или:

$$\sqrt{-\ln Q} = (a_y W - x^*)/b_x W.$$

Для расчета требуемого момента сопротивления W балки по проектному заданию вероятности отказа Q используем формулу:

$$W_{\min} = \frac{x^*}{a_y - b_y \sqrt{-\ln Q}}. \quad (6)$$

Обратные функции нечеткой переменной T по (8) слева и справа от x^* (см. рисунок 2) будут иметь вид:

$$z_{лев} = \frac{(a_x - b_x \beta) + (a_y - b_y \beta)}{(a_z + b_z \beta)} \leq W. \quad (9)$$

$$z_{np} = \frac{(a + b_x \beta) + (a_y + b_y \beta)}{(a_z - b_z \beta)} \leq W. \quad (10)$$

Требуемое значение возможности отказа $Q = \pi_z(T = W) = \alpha_* = e^{-\beta_{\min}^2}$ и $N = 1 - e^{-\beta_{\min}^2}$.

Пример 2. Пусть известны параметры предельного напряжения $\tilde{\sigma}_{np}$ материала стали $a_z = 300$ МПа, $b_z = 10$ МПа и нагрузки в виде: $a_x = 20$ кН·м; $b_x = 2$ кН·м и $a_y = 10$ кН·м; $b_y = 2$ кН·м. При заданном значении надежности (см. пример 1) $Q=0,01$ найдем из $Q = e^{-\beta_{\min}^2}$ значение $\beta = 2,146$. Из (9) найдем

$$W_{mp} = \frac{(20 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot 2,146) + (10 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot 2,146)}{(300 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6 \cdot 2,146)} = 0,139 \text{ м}^3.$$

Примем по СТО АСЧМ 20-93 двутавр №18Б2 с $W=146,3$ см³.

Надежность балки из двутавра №18Б2 по (9) найдем из

$$0,0001463 = \frac{(20 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot \beta) + (10 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot \beta)}{(300 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6 \cdot \beta)},$$

откуда $\beta = 2,53$. Этому значению β соответствует возможность отказа $Q = \exp(-\beta^2) = \exp(-2,53^2) = 0,0017$. Необходимость безотказной работы $N = 1 - Q = 1 - 0,0017 = 0,9983$. При заданной надежности $[0,9900; 1]$ фактический уровень надежности получился равным $[0,9983; 1]$, т.е. условие обеспечения безотказной работы по заданному значению $N = 1 - Q = 0,99$.

Надежность балки должна быть обеспечена и по второй группе предельных состояний.

Рассмотрим методику расчета стальной балки по критерию жесткости. Примем по [24] модуль упругости стали детерминированной величиной в виду малой изменчивости. Пролет балки l , как правило, также малоизменяющаяся величина в расчетах. Математическая модель предельного состояния (для однопролетной шарнирно-опертой балки) имеет вид:

$$f = s \frac{\tilde{M} l^2}{EJ} \leq f_{ult}, \quad (11)$$

где J – момент инерции поперечного сечения балки; E – модуль упругости стали балки.

Преобразуем (11) к виду:

$$\frac{5}{48} \frac{\left[\frac{\tilde{q} l^2}{8} \right] l^2}{EJ} + \frac{1}{12} \frac{\left[\frac{\tilde{F} l}{4} \right] l^2}{EJ} \leq f_{ult}. \quad (12)$$

Введем обозначения $\frac{5}{48} \frac{\left[\frac{\tilde{q} l^2}{8} \right] l^2}{EJ} = X$, $\frac{1}{12} \frac{\left[\frac{\tilde{F} l}{4} \right] l^2}{EJ} = Y$. Нечеткие переменные X и Y бу-

дем описывать функцией распределения возможностей вида (3). Требуемое значение момента инерции J , найдем из условия:

$$Q = 1 - N = \exp \left[- \left(\frac{f_{ult} - a_z(J)}{b_z(J)} \right)^2 \right] \leq Q_{\text{заданное}}, \quad (13)$$

$$\text{где } a_z(J) = \left(\frac{5}{48} \frac{a_x l^2}{EJ} \right) + \left(\frac{1}{12} \frac{a_y l^3}{EJ} \right), \quad b_z(J) = \left(\frac{5}{48} \frac{b_x l^2}{EJ} \right) + \left(\frac{1}{12} \frac{b_y l^3}{EJ} \right).$$

Пример 3. Пусть известны параметры нагрузки (из примера 2): $a_x = 20$ кН·м; $b_x = 2$ кН·м и $a_y = 10$ кН·м; $b_y = 2$ кН·м; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^6$ МПа; пролет балки $l = 5$ м; а предельный прогиб $l/200 = 0,030$ м. Пусть по проектному заданию предельное значение надежности по второй группе предельных состояний ниже, чем было принято для первой группы (по условию примера 2): $Q = 1 - N = 0,05$. Из условия (13) найдем $J_{mp} = 2,91 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$.

По СТО АСЧМ 20-93 принимаем двутавр №25Б1 с моментом инерции $J = 0,00003537 \text{ м}^4$, что меньше требуемой по условию прочности. По заданному по проектному заданию значению надежности по несущей способности и жесткости принимаем двутавр №25Б1. Надежность балки из двутавра №25Б1 по прогибу составляет $[0,999905; 1]$

Для оценки значения надежности балки как условной механической системы с последовательным соединением условных элементов (прочности и жесткости) [22] имеем:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max \left(0, \sum_{i=1}^n \underline{P}_i - (n-1) \right), \\ \bar{P} = \min(\bar{P}_i) \end{cases} \quad (14)$$

где \underline{P}_i и \bar{P}_i - нижнее и верхнее значения вероятности безотказной работы балки по i -му критерию работоспособности из n - числа критериев работоспособности (элементов).

По условиям решения примеров 2 и 3, по (14) имеем $\bar{P} = \min(\bar{P}_i) = 1$ и $\underline{P} = \max(0, (0,998320 + 0,999905) - (2-1)) = 0,998225$, следовательно, надежность балки как системы составляет $[0,998225; 1]$. Если принять требуемое значение надежности 0,995 (значение устанавливается с учетом допустимого риска [26, 27], то балка в виде прокатного двутавра №25Б1 удовлетворяет требованию надежности и экономичности.

Выводы

1. Предложен новый алгоритм расчета несущих элементов строительных конструкций по заданному значению надежности элемента при неполной статистической информации о контролируемых параметрах, что дает возможность выполнять требования ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»;

2. На числовых примерах представлен алгоритм расчета стальной балки, исходя из требований к значению надежности по первой и второй группе предельных состояний и

надежности балки в целом как условной последовательной механической системы в понятиях теории надежности;

3. Предложенный подход может быть использован при расчете других несущих элементов конструкций на заданное значение надежности при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах в математических моделях предельных состояний, приводящий к экономии времени и средств в проектных работах, учитывающих требования ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»;

4. Рассмотренная методика расчетов несущих элементов строительных конструкций может найти применение при формировании новых Сводов Правил по расчету конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. М.: АСВ, 2008. 184 с.
2. Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю. Вероятностное проектирование конструкций по заданному уровню надежности // Вестник СибАДИ. 2015. Вып. 1 (15). С. 68-73.
3. Митасов В.М., Адищев В.В., Стаценко Н.В. Концепция предельных состояний и их проверка по российским нормам и Еврокодам // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. №8. С. 15-23.
4. Клевцов, В.А., Кузеванов Д.В. Вопросы проектирования конструкций с использованием теории надежности // Бетон и железобетон. 2009. №2. С. 9-12.
5. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб: Наука, 2007. 404 с.
6. Райзер В.Д. Очерк развития теории надежности и норм проектирования строительных конструкций // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. 2014. №2. С. 29-35.
7. Тамразян А.Г. Оценка риска и надёжности несущих конструкций и ключевых элементов - необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК. 2009. №1. С. 160 – 171.
8. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон – проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №8. С. 30-33.
9. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет. М.: АСВ, 2018. 414 с.
10. Ni Z., Qiu Z. Hybrid probabilistic fuzzy and non-probabilistic model of structural reliability. Computers & Industrial Engineering. 2010. Vol. 58. Issue 3. pp. 463-467.
11. Ling C., Lu Z., Zhang X. Safety analysis for the postfust reliability model under possibilistic input and fuzzy state. Aerospace Science and Technology. 2020. Vol. 99. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105739>
12. Structural safety reliability of concrete buildings of HTR-PM in accidental double-ended break of hot gas ducts. Nuclear Engineering and Technology // Q. Guo, S. Wang, S. Chen, Y. Sun. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.015>.
13. Wang C., Zhang H., Li Q. Moment-based evaluation of structural reliability. Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 181. pp. 38-45.
14. Zhao Y., Li P., Lu Z. Efficient evaluation of structural reliability under imperfect knowledge about probability distributions. Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 175. pp. 160-170.
15. Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. Vol. 67. pp. 91-99.
16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.
17. Уткин В.С., Ярыгина О.В. Расчет надежности индивидуальных бетонных и железобетонных элементов на продавливание при действии сосредоточенной силы и изгибающего момента с использованием неравенства Чебышева // Строительство и реконструкция. 2010. №3(29). С. 49-54.
18. Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности железобетонных балок по критерию прочности поперечной арматуры при образовании наклонных трещин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. №5. С. 34-42.
19. Hybrid reliability analysis and optimization for spacecraft structural system with random and fuzzy parameters Aerospace Science and Technology / C. Wang, H.G. Matthies, M. Xu, Y. Li. 2018. Vol. 77. pp. 353-361.
20. Уткин В.С., С.А. Соловьев, А.А. Каберова. Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможным методом // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6. С. 63-67.
21. Wang C., Zhang H., Beer M. Computing tight bounds of structural reliability under imprecise probabilistic information. Computers & Structures. 2018. Vol. 208. pp. 92-104.
22. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. pp. 338-353.
23. Патент RU 2308018 C1 Российская Федерация: МПК G 01 N 3/46. Устройство для определения твердости материалов методом царапания / Уткин В.С., Плотникова О.С., Русанов В.В.; заявитель и патентооб-

ладатель Вологодский государственный технический университет. - №2006102641/28; заявл. 30.01.2006; опубл. 10.10.2007. Бюл. №28.

24. Augusti G., Baratta A., Casciati F. Probabilistic methods in structural engineering. London, New York: Chapman and Hall, 1984. 556 p.

25. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. СПб: Любович, 1999. 166 с.

26. Li X., Tang W. Structural risk analysis model of damaged membrane LNG carriers after grounding based on Bayesian belief networks. Ocean Engineering. 2019. Vol. 171. pp. 332-344.

27. Guede F. Risk-based structural integrity management for offshore jacket platforms. Marine Structures. 2019. Vol. 63. pp. 444-461.

REFERENCES

1. Lychev A.S. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy [Reliability of building structures]. Moscow : ASV, 2008. 184 p.

2. Krasnoshchekov YU.V., Zapoleva M.YU. Veroyatnostnoe proektirovanie konstruksiy po zadannomu urovnyu nadezhnosti [Probabilistic design of structures at a given level of reliability]. *Vestnik SibADI*. 2015. No 1 (15). Pp. 68-73.

3. Mitasov V.M., Adishchev V.V., Statsenko N.V. Kontseptsiya predel'nykh sostoyaniy i ikh proverka po rossiyskim normam i Evrokodam [The concept of limit states and their verification according to Russian standards and Eurocodes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2017. No 8. Pp. 15-23.

4. Klevtsov, V.A., Kuzevanov D.V. Voprosy proektirovaniya konstruksiy s ispol'zovaniem teorii nadezhnosti [Problems of designing structures using the theory of reliability]. *Beton i zhelezobeton*. 2009. No 2. Pp. 9-12.

5. Utkin L.V. Analiz riska i prinyatie resheniy pri nepolnoy informatsii [risk analysis and decision making with incomplete information]. Saint Petersburg: Nauka, 2007. 404 p.

6. Rayzer V.D. Ocherk razvitiya teorii nadezhnosti i norm proektirovaniya stroitel'nykh konstruksiy [Essay on the development of the theory of reliability and design standards for building structures]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo i bezopasnost' sooruzheniy*. 2014. No 2. Pp. 29-35.

7. Tamrazyan A.G. Otsenka riska i radiozhnosti nesushchikh konstruksiy i klyuchevykh elementov - neobkhodimoe uslovie bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures]. *Vestnik TSNIISK*. 2009. No 1. Pp. 160 - 171.

8. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton - problemy i perspektivy [Concrete and reinforced concrete - problems and prospects]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No 8. Pp. 30-33.

9. Vedyakov I.I., Rayzer V.D. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy. Teoriya i raschet [Reliability of building structures. Theory and calculation]. Moscow: ASV, 2018. 414 p.

10. Ni Z., Qiu Z. Hybrid probabilistic fuzzy and non-probabilistic model of structural reliability. *Computers & Industrial Engineering*. 2010. Vol. 58. Issue 3. pp. 463-467.

11. Ling C., Lu Z., Zhang X. Safety analysis for the posfust reliability model under possibilistic input and fuzzy state. *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 99. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105739>

12. Guo Q., Wang S., Chen S., Sun Y. Structural safety reliability of concrete buildings of HTR-PM in accidental double-ended break of hot gas ducts. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.015>.

13. Wang C., Zhang H., Li Q. Moment-based evaluation of structural reliability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 181. pp. 38-45.

14. Zhao Y., Li P., Lu Z. Efficient evaluation of structural reliability under imperfect knowledge about probability distributions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 175. pp. 160-170.

15 Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 67. pp. 91-99.

16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.

17. Utkin V.S., YArgina O.V. Raschet nadezhnosti individual'nykh betonnykh i zhelezobetonnykh elementov na prodavlivanie pri deystvii sosredotochennoy sily i izgibayushchego momenta s ispol'zovaniem neravenstva Chebysheva [Reliability calculation of individual concrete and reinforced concrete elements for punching under the action of concentrated force and bending moment using Chebyshev inequality]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2010. No 3(29). Pp. 49-54.

18. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnykh balok po kriteriyu prochnosti poperechnoy armatury pri obrazovanii naklonnykh treshchin [Reliability calculation of reinforced concrete beams according to the criterion of strength of transverse reinforcement during the formation of inclined cracks]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2017. No 5. Pp. 34-42.

19. Wang C., Matthies H.G., Xu M., Li Y. Hybrid reliability analysis and optimization for spacecraft structural system with random and fuzzy parameters. *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 77. pp. 353-361.

20. Utkin V.S., S.A. Solov'ev, A.A. Kaberova. Znachenie urovnya sreza (riska) pri raschete nadezhnosti nesushchikh elementov vozmozhnostnym metodom [The value of the cutoff level (risk) when calculating the reliability of the bearing elements by the probabilistic method]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2015. No 6. Pp. 63-67.
21. Wang C., Zhang H., Beer M. Computing tight bounds of structural reliability under imprecise probabilistic information. *Computers & Structures*. 2018. Vol. 208. pp. 92-104.
22. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. pp. 338-353.
23. Patent RU 2308018 C1 Rossiyskaya Federatsiya: MPK G 01 N 3/46. Ustroystvo dlya opredeleniya tverdosti materialov metodom tsarapaniya / Utkin V.S., Plotnikova O.S., Rusanov V.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Vologodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [atent RU 2308018 C1 Russian Federation: IPC G 01 N 3/46. A device for determining the hardness of materials by scratching / Utkin V.S., Plotnikova O.S., Rusanov V.V. ; Applicant and patentee Vologda State Technical University]. №2006102641/28; accepted. 30.01.2006; publ. 10.10.2007. Byul. No 28.
24. Augusti G., Baratta A., Casciati F. Probabilistic methods in structural engineering. London, New York: Chapman and Hall, 1984. 556 p.
25. Gurov S.V., Utkin L.V. Nadezhnost' sistem pri nepolnoy informatsii. Saint Petersburgs: Lyubovich, 1999. 166 p.
26. Li X., Tang W. Structural risk analysis model of damaged membrane LNG carriers after grounding based on Bayesian belief networks. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 171. pp. 332-344.
27. Guede F. Risk-based structural integrity management for offshore jacket platforms. *Marine Structures*. 2019. Vol. 63. pp. 444-461.

Информация об авторах:

Уткин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства.
[E-mail: utkinvogtu@mail.ru](mailto:utkinvogtu@mail.ru)

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.
[E-mail: ser6sol@yandex.ru](mailto:ser6sol@yandex.ru)

Ярыгина Ольга Валентиновна

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.
[E-mail: ola_yarigina@mail.ru](mailto:ola_yarigina@mail.ru)

Information about authors

Utkin Vladimir S.

Vologda State University (VSU), Vologda, Russia,
doctor of technical Sciences, professor, professor of industrial and civil engineering department.
E-mail: utkinvogtu@mail.ru

Solovyev Sergey A.

Vologda State University (VSU), Vologda, Russia,
candidate of technical Sciences, associate professor of industrial and civil engineering department.
[E-mail: ser6sol@yandex.ru](mailto:ser6sol@yandex.ru)

Yarigina Olga Valentinovna

Vologda State University (VSU), Vologda, Russia,
candidate of technical Sciences, associate professor of industrial and civil engineering department.
[E-mail: ser6sol@yandex.ru](mailto:ser6sol@yandex.ru)