Расчет и проектирование строительных конструкций

УДК 624.046.5

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН*

В.С. УТКИН, *доктор технических наук, профессор*
С.А. СОЛОВЬЕВ, *аспирант*
Вологодский государственный университет, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, ser6sol@yandex.ru

В статье предложены методы расчета надежности железобетонных балок по критерию прочности поперечной арматуры при образовании наклонных трещин в бетоне. Для учета ограниченности статистической информации о контролируемых параметрах расчет надежности проводится на основе положений теории надежности и теории нечетких множеств. Рассмотрено два расчетных случая с различным количеством нечетких переменных в расчетных математических моделях предельного состояния. Приведены численные примеры расчета надежности. Предлагаемые методы могут в одних случаях поспособствовать предотвращению аварий железобетонных балок, а в других случаях получить экономический эффект от отказа от усиления или замены балки, даже при ширине раскрытия трещины больше нормативного значения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, безопасность эксплуатации, железобетонная балка, наклонные трещины, стадия эксплуатации, критерий прочности, теория возможностей

Проблеме безопасности строительных конструкций уделяется большое внимание. Об этом свидетельствуют новые стандарты в области обеспечения надежности (безопасности) строительных конструкций: Межгосударственный Стандарт ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», вступивший в силу с 01.07.2015, Международный Стандарт ISO 2394:2015 «General principles on reliability of structures» и др. Причиной к столь повышенному вниманию могут служить обрушения строительных конструкций, в том числе железобетонных балок, за последние 5-10 лет. Так в 2014 г. в США (г. Форт Лодердейл) из-за обрушения железобетонной балки погиб 1 человек и еще 2 пострадали. 11 человек погибли на юго-востоке Бангладеш из-за обрушения 3 железобетонных балок. В 2015 г. в Китае (г. Тяньцзинь) произошло обрушение железобетонной плиты перекрытия, в результате чего погибли 6 человек. Это свидетельствует о необходимости разработки инженерных методов расчета надежности на стадии проектирования и эксплуатации по всем критериям работоспособности несущих элементов строительных конструкций, в том числе по критерию прочности поперечной арматуры в сечении балки с наклонной трещиной.

Предпосылки использования вероятностных расчетов уже внедрены в строительные нормы. Так в СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» отмечено, что «расчет бетонных и железобетонных конструкций можно производить по заданному значению надежности на основе полного вероятностного расчета при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов, входящих в расчетные зависимости». ГОСТ 27751-2015 также рекомендует использование вероятностно-статистических методов «при

* *Статья печатается в порядке обсуждения*

наличии достаточных данных об изменчивости основных параметров, если количество (длина ряда) данных позволяет проводить их статистический анализ (в частности, эти данные должны быть однородными и статистически независимыми)». Однако зачастую для индивидуальных несущих элементов не удается получить полную статистическую информацию. В этом случае расчет надежности вероятностно-статистическими методами приводит к некорректным результатам.

В [1] приводится расчет надежности железобетонных балок по критерию ширины раскрытия наклонной трещины. В данной работе расчет надежности ведется по математической модели вида $a_{crc} \le a_{crc,ult}$, т.е. по критерию ширины раскрытия трещины, как одному из многочисленных критериев работоспособности железобетонной балки. В число этих критериев работоспособности входит также критерий прочности поперечной арматуры после образования наклонных трещин в балке на стадии эксплуатации. В последнее время применяется усиление железобетонных балок при возникновении наклонных трещин полимерными стрежнями и полосами. Проблема расчета надежности таких элементов рассмотрена в работе [2]. Метод определения остаточной несущей способности железобетонных балок при наличии трещин рассмотрен в работе [3]. Расчет надежности железобетонной балки по критерию длины трещины в бетоне приведен в работе [4]. Экспериментально-теоретический расчет индекса надежности β для железобетонных балок различного поперечного сечения рассмотрен в работе [5]. Применение Байесовского подхода к расчету надежности железобетонных балок с учетом коррозии рассмотрено в работе [6].

В предлагаемой статье рассмотрен расчет надежности балки по критерию прочности поперечной арматуры (хомутов) в сечении балки с наклонной трещиной на стадии эксплуатации без предварительного напряжения рабочей арматуры. Причинами образования наклонных трещин в железобетонных балках являются: перегрузка конструкции [7], недостаточное поперечное армирование балки или отсутствие поперечной арматуры; недостаточная прочность бетона; перегрузка балки; низкое качество сварки поперечных и продольных стержней; снижение несущей способности балки в результате деградации материала бетона и арматуры; повышенное влияние поперечной силы для балок с малым пролетом и др. Условная схема железобетонной балки с трещинами изображена на рис. 1.

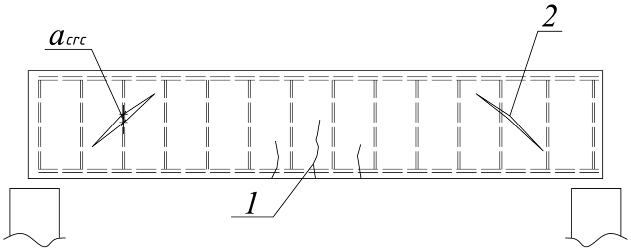

Рис. 1. Железобетонная балка с трещинами:
1 – нормальные трещины; 2- наклонные трещины

В месте появления наклонных трещин резко возрастает напряжение в хомутах σ_{sw}. В [8] приведены сведения о значениях ширины раскрытия нормальных и наклонных трещин, при которых в арматуре достигается предел текучести стали. Отмечается, что при малых расстояниях между трещинами предел текучести стали в арматуре наступит раньше, чем ширина раскрытия трещины достигнет предельного состояния, установленного нормами.

В предлагаемой работе в качестве математической модели предельного состояния по критерию прочности поперечной арматуры примем условие:

$$\tilde{\sigma}_{sw} \le \tilde{\sigma}_{np,sw}, \tag{1}$$

где $\tilde{\sigma}_{sw}$ – напряжение в поперечной арматуре (хомутах) в сечении с наклонной трещиной, определяемое по результатам измерения параметров, от которых зависит $\tilde{\sigma}_{sw}$, как будет показано ниже, и в связи с этим является случайной величиной, что отмечено волнистой линией над символом; $\tilde{\sigma}_{np,sw}$ - предельное напряжение стали поперечной арматуры при растяжении, определяемое экспериментально по результатам испытаний образцов арматуры балки, число которых по [9] должно быть не менее двух.

В [10], а также в строительных нормах по железобетонным конструкциям СНиП 2.03.01-84*, расчет ширины раскрытия наклонных трещин, измеряемой вдоль хомутов, определяется по формуле:

$$a_{crc} = \varphi_l \frac{0.6\sigma_{sw} d_w \eta}{E_s(d_w / h_0) + 0{,}15 E_b (1 + 2\alpha\mu_w)}, \tag{2}$$

где μ_w - коэффициент армирования поперечными стержнями, определяемый как $\mu_w = A_{sw} / b \cdot s$, где A_{sw} - площадь сечения поперечного армирования; b - ширина балки; s – шаг хомутов; d_w - диаметр поперечной арматуры; η - коэффициент, зависящий от вида профиля растянутой арматуры: для гладкой арматуры $\eta = 1{,}3$; для арматуры периодического профиля $\eta = 1$; E_s, E_b - модули упругости арматуры и бетона соответственно; σ_{sw} - напряжение в поперечной арматуре; $\alpha = E_s / E_b$; h_0 - рабочая высота балки. $\tilde{E}_s$ и $\tilde{E}_b$ являются случайными величинами, т.к. $\tilde{E}_b$ определяется неразрушающими методами, а $\tilde{E}_s$ определяется по диаграмме напряжений $\sigma_s - \varepsilon_s$ по результатам испытаний образцов из стержней поперечной арматуры.

Измерение деформаций в арматуре на участке раскрытой трещины практически невозможно в связи с ограниченной шириной трещины a_{crc} и в связи с практическим отсутствием способов определения напряжения σ_{sw} в сечении с трещиной. В связи с этим предлагается в расчетах надежности балки по условию (1) для определения напряжения σ_{sw} в сечении железобетонной балки на участке ширины наклонной трещины использовать формулу (2) по результатам многократных (но ограниченных по числу) измерений ширины раскрытия $\tilde{a}_{crc}$ и модулей упругости $\tilde{E}_s$ и $\tilde{E}_b$ с учетом их изменчивости, а также с учетом других детерминированных параметров в (2). В этом случае $\tilde{\sigma}_{sw}$ будет случайной величиной, и определяться по формуле (после математических преобразований):

$$\tilde{\sigma}_{sw} = \frac{\tilde{a}_{crc} \cdot \left[\tilde{E}_s (d_w / h_0 + 0{,}3\mu_w) + 0{,}15\tilde{E}_b\right]}{0.6\varphi_l d_w \eta}. \tag{3}$$

Математическую модель предельного состояния (1) с учетом (3) можно записать как:

$$\frac{\tilde{a}_{crc} \cdot \left[\tilde{E}_s (d_w / h_0 + 0{,}3\mu_w) + 0{,}15\tilde{E}_b\right]}{0.6\varphi_l d_w \eta} \le \tilde{\sigma}_{np,sw}. \tag{4}$$

Учитывая ограниченность результатов измерений случайных величин в (4), расчет надежности будем строить на основе теории возможностей [11] и теории нечетких множеств [12]. Для сокращения записи и для большей связи с теорией возможностей [11] введем обозначения случайных величин, а в терминах теории возможностей [11] нечетких переменных в виде: $\tilde{a}_{crc}/0.6\varphi_l d_w \eta = X$, $0{,}15\tilde{E}_b = Y$, $\tilde{\sigma}_{np,sw} = Z$, $\tilde{E}_s\left(d_w/h_0 + 0{,}3\mu_w\right) = T$. Тогда математическую модель (4) можно представить в виде:

$$\frac{X\left(T+Y\right)}{Z} \le 1. \tag{5}$$

Нечеткие переменные в (5) будем описывать наиболее распространенной в практике расчетов надежности [4, 13, 14 и др.] функцией распределения возможностей $\pi_X(x)$, представленной на рис. 2, с аналитическим выражением:

$$\pi_X(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-a_x}{b_x}\right)^2\right], \tag{6}$$

где $a_x = 0{,}5\cdot(X_{\max} + X_{\min})$ - «условное среднее»; $b_x = 0{,}5(X_{\max} - X_{\min})/\sqrt{-\ln\alpha}$ - мера «рассеяния», где $X_{\max}$ и $X_{\min}$ - наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной *X*, полученных из результатов измерений; $\alpha \in [0;1]$ - уровень среза (риска), значением которого задаются, например, по рекомендациям, приведенным в [14]. Обратная функция от $\pi_X(x)$ из (6) будет иметь вид $x = a_x \pm b_x\sqrt{-\ln\alpha}$ или $x = a_x \pm b_x\beta$, где $\beta = \sqrt{-\ln\alpha}$, где α - уровень среза для функции $\pi_X(x)$.

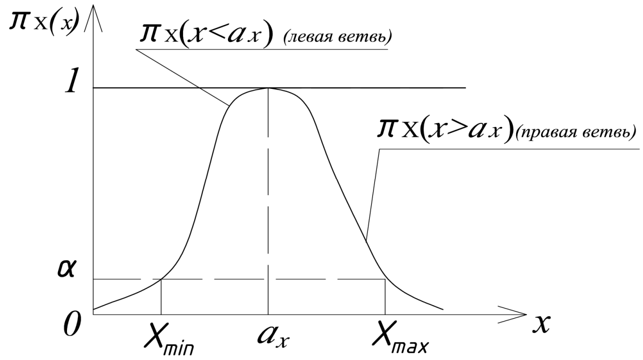

Рис. 2. График функции распределения возможностей $\pi_X(x)$

Рассмотрим первый вариант совокупности нечетких переменных в (5) в которой $\tilde{E}_s$ в силу его малой изменчивости по [15] примем детерминированной величиной $E_s = 2\cdot 10^{11}$ Па. В этом случае выражение в квадратных скобках в виде $\left(T+Y\right)$ будет нечеткой переменной, которую обозначим Y_T. Примем для Y_T такую же функцию распределения возможностей, как и для *X*, т.е. (6) с параметрами: $a_{y_T} = T + a_t$, $b_{y_T} = 0{,}5(Y_{\max} - Y_{\min})/\sqrt{-\ln\alpha}$ и обратная функция $y_T = a_{y_T} \pm b_y\sqrt{-\ln\alpha}$, где α – уровень среза, принимаемый одинаковым для всех нечетких переменных в (5). В этом случае (5) примет вид:

$$\frac{XY_T}{Z} \le 1. \tag{7}$$

Расчет надежности железобетонных балок по критерию (7) проведем с использованием принципа обобщения Л. Заде из теории нечетких множеств [12]. Формируем из (5) нечеткую переменную J как функцию от нечетких аргументов X, Y_T, Z в виде:

$$J = \frac{XY_T}{Z} \le 1. \tag{8}$$

Графический вид функции $\pi_J(j)$ неизвестен, но она характеризуется значениями a_i, b_i, α, как и $\pi_X(x)$. Условная «средняя» определяется по (8) в виде $a_j = a_x a_{y_T} / a_z$, с левой ветвью $j \le \alpha_j$ и правой ветвью $j > \alpha_j$ функции $\pi_J(j)$, а обратная функция j от J будет определяться через обратные функции x, y_T, z от X, Y_T, Z, которые имеют вид обратной функции x от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_J(j)$ имеем:

$$j_{лев} = (a_x - b_x\beta)(a_{y_T} - b_y\beta)/(a_z + b_z\beta), \tag{9}$$

$$j_{пр} = (a_x + b_x\beta)(a_{y_T} - b_y\beta)/(a_z - b_z\beta), \tag{10}$$

где $\beta = \sqrt{-\ln \pi_J(j)} = \sqrt{-\ln \alpha_*}$. Перед «$b$» в $j_{лев}$ ставят знак минус в числителе, а в знаменателе плюс, если от этой величины значение левой ветви в (9) возрастает, а в (10) все наоборот. Обозначим $\alpha_* = \pi_J(j)$ для сокращения записи, по аналогии с $\alpha = \pi_X(x)$. При $j = a_j$ имеем $\pi_J(j) = 1$ или β =0. По (9) при выполнении $a_j \le 1$ значение возможности безотказной работы балки по [Уткин] принимается R = 1. Возможность отказа Q (для правой ветви функции $\pi_J(j)$) найдем по значению β, полученного из (10) при $j_{пр} = 1$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности или наибольшей обеспеченности. По результатам решения (10), при $j_{пр} = 1$ находят $\beta_{\min}$ по абсолютному значению и возможность отказа по критерию прочности арматуры $Q = \exp(-\beta^2_{\min})$. В [11] нечеткая переменная характеризуется мерами возможности R и необходимости N. В понятиях надежности, необходимость N безотказной работы балки, которая вычисляется из N=1-Q. Тогда надежность железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры в сечении с наклонной трещиной характеризуется интервалом [N; R=1] или в вероятностных показателях $[\underline{P}; \overline{P}]$, где $\underline{P}$ и $\overline{P}$ - нижнее и верхнее значение вероятности безотказной работы.

Пример 1. Пусть для железобетонной балки условно известны значения: $\tilde{a}_{crc} = \{0{,}15; 0{,}17; 0{,}13\}$ мм; $E_s = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $d_w = 10$ мм; $h_0 = 0{,}5$ м; $\mu_w = 0{,}01$; $\varphi_l = 1{,}5$; $\eta = 1$; $\tilde{E}_b = \{25; 22; 28\} \cdot 10^9$ Па; $\tilde{\sigma}_{np,sw} = \{240; 210; 270\}$ Па. Определяем параметры: $a_x = 0{,}017$, $a_{y_T} = 8{,}35 \cdot 10^9$ Па, $a_z = 240$ МПа. При уровне риска 0,05: $b_x = 0{,}0013$, $b_y = 2{,}60 \cdot 10^8$ Па, $b_z = 17{,}34$ МПа. Т.к. условное среднее $a_g = a_x (a_{y_T}) / a_z = 0{,}58 \le 1$, то возможность безотказной работы балки принимается R=1. Из (9) для правой ветви $\pi_G(g)$ при $g_{np} = 1$, как самое осторожное решение, найдем $\beta = \{59{,}32; 2{,}92\}$, $\beta_{\min} = 2{,}92$. Возможность отказа $Q = \exp\left[-(2{,}92)^2\right] = 0{,}0002$. Необходимость безотказной работы N = 1 - 0,0002 =

0,9998. Надежность железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры характеризуется интервалом [0,9998; 1].

Нормативное значение вероятности безотказной работы зависит от ответственности несущего элемента за безопасность всей конструкции, от критерия работоспособности и т.д., и находится в стадии обсуждения и изучения.

Если возникают сомнения в малой изменчивости модуля упругости стали арматуры, например, при воздействиях в течение некоторого времени на балку повышенных температур; при длительной эксплуатации балки; после аварийных воздействий на балку и т.д., то следует $\tilde{E}_s$ определять по результатам испытаний образцов, изготовленных из арматуры (хомутов) балки, что представляет определенную трудность в процессе эксплуатации, т.к. нарушается большая часть бетона балки и восстанавливаемый стержень не работает без предварительной разгрузки балки. В силу ограниченности числа образцов для испытаний в этом случае число значений $\tilde{E}_s$ также ограниченно и его следует рассматривать как нечеткую переменную. В соответствии с принципом обобщения *Л.* Заде в теории нечетких множеств [12], формируем из (5) нечеткую переменную *G* как функцию от нечетких аргументов *X*, *Y*, *Z*, *T* в виде:

$$G = \frac{X(T+Y)}{Z} \le 1. \tag{11}$$

Нечеткую переменную *G* будем характеризовать функцией распределения возможностей $\pi_G(g)$ с условной «средней» по (7) $a_g = a_x(a_k + a_y)/a_z$, с левой ветвью $g \le \alpha_g$ и правой ветвью $g > \alpha_g$, а обратная функция *g* от *G* будет определяться через обратные функции *x*, *y*, *z*, *t* от *X*, *Y*, *Z*, *T*, которые имеют вид обратной функции *x* от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_G(g)$ имеем:

$$g_{лев} = (a_x - b_x\beta)\left[(a_t - b_t\beta) + (a_y - b_y\beta)\right]/(a_z + b_z\beta), \tag{12}$$

$$g_{пр} = (a_x + b_x\beta)\left[(a_t + b_t\beta) + (a_y + b_y\beta)\right]/(a_z - b_z\beta), \tag{13}$$

где $\beta = \sqrt{-\ln \pi_G(g)} = \sqrt{-\ln \alpha_*}$. Перед «*b*» в $g_{лев}$ ставят знак минус в числителе, а в знаменателе плюс, если от этой величины значение левой ветви в (12) возрастает, а в (13) все наоборот. Обозначим $\alpha_* = \pi_G(g)$ для сокращения записи, по аналогии с $\alpha = \pi_X(x)$. При $g = a_g = a_x(a_t + a_y)/a_z$ имеем $\pi_G(g) = 1$ или $\beta = 0$. По (13) при выполнении $a_g \le 1$ значение возможности безотказной работы балки по [13, 14 и др.] принимается *R* = 1. Возможность отказа *Q* (для правой ветви функции $\pi_G(g)$) найдем по значению β, полученного из (13) при $g_{пр} = 1$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности или наибольшей обеспеченности. По результатам решения (13), при $g_{пр} = 1$ находят $\beta_{\min}$ по абсолютному значению и возможность отказа по критерию прочности арматуры $Q = \exp(-\beta_{\min}^2)$. Надежность железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры в сечении с наклонной трещиной характеризуется интервалом [*N*; *R*=1].

Пример 2. Пусть для железобетонной балки условно известны значения: $\tilde{a}_{crc} = \{0{,}15;0{,}17;0{,}13\}$ мм; $\tilde{E}_s = \{2{,}2;2{,}0;1{,}8\}\cdot 10^{11}$ Па; $d_w = 10$ мм; $h_0 = 0{,}5$ м; $\mu_w = 0{,}01$; $\varphi_l = 1{,}5$; $\eta = 1$; $\tilde{E}_b = \{25;22;28\}\cdot 10^9$ Па; $\tilde{\sigma}_{пр,sw} = \{240;210;270\}$ Па.

Определяем параметры: $a_x = 0{,}017$, $a_y = 3{,}75 \cdot 10^9$ Па, $a_z = 240$ МПа, $a_t = 4{,}6 \cdot 10^9$ Па. При уровне риска 0,05: $b_x = 0{,}0013$, $b_y = 2{,}60 \cdot 10^8$ Па, $b_z = 17{,}34$МПа, $b_t = 2{,}66 \cdot 10^8$ Па. Так как условное среднее $a_g = a_x\left(a_y + a_t\right)/ a_z = = 0{,}58 \le 1$, то возможность безотказной работы балки принимается R = 1. Из (9) для правой ветви $\pi_G(g)$ при $g_{пр} = 1$, как самое осторожное решение, найдем $\beta = \{57{,}11; 2{,}61\}$, $\beta_{\min} = 2{,}61$. Возможность отказа $Q = \exp\left[-\left(2{,}61\right)^2\right] = 0{,}0011$. Необходимость безотказной работы N = 1 -0,0011 = 0,9989. Надежность железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры характеризуется интервалом [0,9989; 1].

Если принять значение надежности $\underline{P} = 0{,}9989$, то такую вероятность безотказной работы в некоторых случаях можно считать недопустимой, если оно меньше нормативной, так, например по [16], предельное значение вероятности отказа Q для несущих элементов без предварительных сигналов рекомендовано принимать значение $Q = 10^{-4}$ или $P_{пр} = 0{,}9999$.

Надежность железобетонной балки как механической системы находится по теореме умножения вероятностей как:

$$P = \prod_{i}^{n} P_i ,$$

где P_i – вероятность безотказной работы балки по i-му критерию работоспособности балки. В данной работе рассмотрен метод расчета надежности по одному из критериев работоспособности балки – по критерию прочности поперечной арматуры в сечении балки с наклонной трещиной.

На основе полученных данных о надежности балки решается вопрос о ее дальнейшей эксплуатации. Так, при невысоких требованиях к надежности (безопасности), даже при ширине раскрытия трещин больше нормативного значения, можно продолжить эксплуатацию балки с применением противокоррозионных мероприятий. А при высоких требованиях к вероятности безотказной работы по критерию прочности поперечной арматуры, даже при условии выполнения нормативного требования $a_{crc} \le a_{crc,ult}$, балку придется усиливать или заменять.

Выводы:

1. Предложены методы расчета надежности железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры в сечении балки с наклонной трещиной;
2. Рассмотрены два варианта расчета надежности при различном количестве нечетких переменных в расчетной математической модели предельного состояния.
3. Алгоритмы расчета надежности железобетонной балки по критерию прочности поперечной арматуры приведены на примерах;
4. Информация о значениях надежности железобетонной балки позволяет обоснованно принять оптимальное решение о необходимости усиления или замены балки, или, наоборот, продолжении ее эксплуатации с проведением противокоррозионных мероприятий. В первом случае это приведет к предотвращению возможной аварии, а во втором к экономическому эффекту от отказа усиления/замены балки.

Список литературы

1. *Уткин В.С., Соловьев С.А.* Расчет надежности железобетонных балок по раскрытию трещин в бетоне при аварийных воздействиях // Современные проблемы расчета

железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 472—477.

2. *Shahnewaz M., Machial R.,Shahira Alam M.* Optimized shear design equation for slender concrete beams reinforced with FRP bars and stirrups using Genetic Algorithm and reliability analysis. Engineering Structures. 2016. Vol. 107. Pp. 151—165.

3. *Уткин В.С., Соловьев С.А.* Определение несущей способности железобетонных балок при наличии трещин в бетоне // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 58—64.

4. *Уткин В.С., Соловьев С.А.* Расчет надежности железобетонной балки на стадии эксплуатации по критерию длины трещины в бетоне// Вестник МГСУ. 2016. №1. С. 68—79.

5. *Al-Ansari M.* Reliability and flexural behavior of triangular and T-reinforced concrete beams. International journal of advanced structural engineering. 2015. Vol. 7. Issue 10. Pp. 377—386.

6. *Sharvil A.F., Nikil N., Shiddhartha G.* Reliability of a corroded RC beam based on Bayesian updating of the corrosion model. Engineering Structures. 2016. Vol. 126. Pp. 457—468.

7. *Гарбусенко В.В.* Аварии, дефекты и усиление железобетонных и каменных конструкций. М.: АСВ, 2016. 104 с.

8. *Гроздов В.Т.* Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. СПб: Издательский дом КН+, 2000. 48 с.

9. *Бедов А.И., Сапрыкин В.Ф.* Обследование и реконструкция железобетонных и каменных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 1995. 191 с.

10. *Байков В. Н., Сигалов Э. Е.* Железобетонные конструкции (Общий курс). М.: Стройиздат, 1991. 767 с.

11. *Dubois D., Prade H.* Possibility Theory, Probability Theory and Multiple-valued Logics: A Clarification. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2001. No. 32. Pp 35—66.

12. *Zadeh L. A.* Fuzzy sets. Information and Control. 1965. No. 3. Pp. 338—353.

13. *Уткин В.С., Соловьев С.А.* Расчет надежности железобетонной балки по критерию длины трещины в бетоне // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 24—33.

14. *Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А.* Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможностным методом // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6. С. 63—67.

15. *Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф.* Вероятностные методы в строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1988. 584 с.

16. *Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Нотенко С.Н. и др.* Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2004. 447 с.

Поступила в редакцию 6 февраля 2017 г. Прошла рецензирование 26 апреля 2017 г. Принята к публикации 12 мая 2017 г.

Об авторах:

УТКИН В.С., доктор технических наук, профессор кафедры ПГС, Вологодский государственный университет, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, email: utkinvogtu@mail.ru, тел. 8(8172)518396.

СОЛОВЬЕВ С.А, аспирант кафедры ПГС, Вологодский государственный университет, email: ser6sol@yandex.ru , тел. 8(8172)518396

Для цитирования: *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
(DOI: 10.22363/1815-5235-2017-5-34-42).

References

1. *Utkin, V.S., Solov'ev, S.A.* (2016). Reliability analysis of reinforced concrete beams with taking into account opening of cracks in concrete under failure actions. *Sovremennye problemy*

rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij, zdanij i sooruzhenij na avarijnye vozdejstvija. Pod redakciej A.G. Tamrazjana, D.G. Kopanicy, pp. 472—477 (in Russian).

2. *Shahnewaz, M., Machial ,R.,Shahira, Alam M.* (2016). Optimized shear design equation for slender concrete beams reinforced with FRP bars and stirrups using Genetic Algorithm and reliability analysis. *Engineering Structures,* Vol. 107. 151—165.

3. *Utkin, V.S., Solov'ev, S.A.* (2015). The determination of bearing capacity of reinforced concrete beams with cracks in the concrete. *Vestnik Grazhdanskih Inzhenerov*, 53(6), 58—64 (in Russian).

4. *Utkin, V.S., Solov'ev, S.A.* (2016). An analysis of reliability of the exploited reinforces beam under criteria of the length of the crack in the concrete. *Vestnik MGSU,* (1), 68—79 (in Russian).

5. *Al-Ansari, M.* (2015) Reliability and flexural behavior of triangular and T-reinforced concrete beams*. International Journal of Advanced Structural Engineering,* Vol. 7, Issue 10, 377—386.

6. *Sharvil, A.F., Nikil, N., Shiddhartha, G.* (2016). Reliability of a corroded RC beam based on Bayesian updating of the corrosion model. *Engineering Structures,* Vol. 126. 457—468.

7. *Garbusenko, V.V.* (2016). *Failures, Defects, and Strengthening of Reinforced Concrete and Stone Structures*. Moscow: ASV. 104 (in Russian).

8. *Grozdov, V.T.* (2000). *Priznaki Avarijnogo Sostojanija Nesushhih Konstrukcij Zdanij i So-Oruzhenij* [*The Symptoms of Failure Condition of Bearing Structures of Buildings and Erections*], Saint-Petersburg: Izd. Dom KN+. 48 (in Russian).

9. *Bedov, A.I., Saprykin, V.F.* (1995). *Obsledovanie i Rekonstrukciya Zhelezobetonnih i Kamennyh Konstrukcij Ekspluatiruemyh Zdanij i Sooruzhenij* [*The Inspection and Reconstruction of Reinforced Concrete and Stone Structures of exploited Buildings and Erections*]. Moscow: Izd-vo ASV, 191 p.

10. *Bajkov, V.N., Sigalov, E.E.* (1991). *Zhelezobetonnye Konstrukcii (Obschij Kurs*) [*Reinforced Concrete Structures],* Moscow: Stroyizdat. 767 (in Russian).

11. *Dubois, D., Prade, H.* (2001). Possibility Theory, Probability Theory and Multiple-valued Logics: A Clarification. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, No, 32. 35—66.

12. *Zadeh, L. A.* (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, No 3, 338—353.

13. *Utkin, V.S., Solov'ev, S.A*. (2016). Raschet nadezhnosti zhelezobetonnoj balki po kriteriyu dliny treshchiny v betone. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No 5, 24—33 (in Russian).

14. *Utkin, V.S., Solov'ev, S.A., Kaberova, A.A*. (2015). Znachenie urovnja sreza (riska) pri raschete nadezhnosti nesushchih elementov vozmozhnostnym metodom. *Stroitel'naja Mehanika i Raschet Sooruzhenij,* No 6, 63—67 (in Russian).

15. *Augusti, G., Baratta, A., Kashiati, F*. (1988). *Veroyatnostnye Metody v Stroitel'nom Proektirovanii* [*Variational Methods in Building Design*], Moscow: Stroyizdat, 584 (in Russian).

16. *Kozachek, V.G., Nechaev, N.V., Notenko, S.N. etc*. (2004). *Obsledovanie i Ispytanie Zdanij i Sooruzhenij*. Moscow: Vysshaya shkola, 447 (in Russian).

RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SHEAR CRACKS ON REBAR STRENGTH

Utkin V.S., Solov’ev S.A.

Vologda State University, Vologda, Russian Federation

The article describes methods for reliability analysis of reinforced concrete beams with shear cracks by the criterion of the rebar strength. Reliability analysis is conducted on the basis of the provisions of reliability theory and fuzzy set theory to account for the limited statistical information on controlled parameters. We considered two design cases with different numbers of fuzzy variables in the design mathematical models of a limit state. Numerical examples of reliability analysis are given. The proposed methods may in some cases contribute to accidents prevention in reinforced concrete beams, and in other cases get the economic effect from the rejection of strengthening or replacement of beams, even when the crack width exceeds the ultimate value.

KEY WORDS: reliability, safety, reinforced concrete beam, shear cracks, strength criterion, possibility theory, fuzzy sets

Article history: *Received: February 6, 2017. Revised: April 26, 2017. Accepted: May 12, 2017.*

About the authors:

UTKIN V.S., Doctor of science in engineering, Professor of civil engineering department of Vologda State University, email: utkinvogtu@mail.ru, tel. 8(8172)518396

SOLOVYEV S.A., post-graduate student of civil engineering department of Vologda State University, email: ser6sol@yandex.ru , tel. 8(8172)518396

For citation: *Utkin V.S., Solov’ev S.A.* (2017*)* Reliability analysis of reinforced concrete beams with shear cracks on rebar strength. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* No 5. 34—42 (DOI: 10.22363/1815-5235-2017-5-34-42).