

С.А. СОЛОВЬЕВ¹, Л.С. ШЕВЦОВ¹, А.А. СОЛОВЬЕВА¹

¹ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ АРМИРОВАННЫХ БАЛОК ИЗ ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА

Аннотация. В статье представлен алгоритм вероятностного анализа армированных балок из древесно-цементного композита на заданный уровень надежности. В качестве требуемого уровня надежности используются показатели индекса надежности и вероятности безотказной работы. Выполнены экспериментальные исследования балки из древесно-цементного композита со стальной арматурой. Представленный подход позволяет определить наиболее рациональное армирование, исходя из экономических факторов и уровня безопасности объекта. На основе вероятностных алгоритмов можно назначить допуски по размерам сечения балки и по расположению арматуры, исходя из обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы. Конструкции армированных балок из древесно-цементного композита могут быть использованы в качестве несущих и самонесущих перемычек, обладая более высокой паропроницаемостью и энергоэффективностью по сравнению с перемычками из тяжелого бетона. Допустимый уровень вероятности отказа может быть назначен для группы элементов объекта индивидуально, исходя из критерия допустимого риска.

Ключевые слова: надежность, вероятность отказа, древесно-цементный композит, случайная величина, арматура, легкий бетон, вероятностное проектирование, перемычка

S.A. SOLOVEV¹, L.S. SHEVCOV¹, A.A. SOLOVEVA¹

¹Vologda State University, Vologda, Russia

PROBABILISTIC RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED WOOD-CEMENT COMPOSITE BEAMS

Abstract. The article describes the algorithm for probabilistic analysis of reinforced concrete beams made of wood-cement composite for a target reliability level. The reliability index and no-failure probability are used as the indicators for required level of reliability. Experimental studies on wood-cement composite beam behavior with steel reinforcement are performed. The presented approach allows to determine the most rational reinforcement based on economic factors and safety level of the object. On the basis of probabilistic algorithms, it is possible to assign tolerances on the dimensions of the beam cross-section and on the location (distance) of reinforcement, based on ensuring the required level of no-failure probability. Reinforced wood-cement composite beam structures can be used as load-bearing and self-supporting lintels, having higher vapor permeability and energy efficiency than heavy concrete lintels. The permissible level of failure probability can be assigned for a group of elements of the objects individually, based on the criterion of acceptable risk.

Keywords: reliability, failure probability, wood-cement composite, random variable, reinforcement, lightweight concrete, probabilistic design, lintel

Введение

Надежность строительного элемента – это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В качестве количественной меры надежности может быть использована вероятность безотказной работы. Количественное выражение уровня надежности позволят выполнить анализ влияния изменчивости случайных величин в математических моделях предельных состояний на безопасность эксплуатации элементов строительных конструкций.

Древесно-цементный композит (ДЦК) – это легкий бетон, состоящий из цемента, воды, древесных отходов (например, щепы) и специальных добавок. Одним из видов древесно-цементного композита является арболит – легкий бетон на цементном вяжущем, древесной дробленке и химических добавках, в соответствии с ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него». Древесно-цементный композит используется в качестве материала для несущих и ограждающих конструкций. Его основными преимуществами являются низкая теплопроводность, высокая паропроницаемость и экологичность при сохранении достаточной прочности для использования в качестве несущих элементов.

Развитие исследований в области строительных материалов из продуктов и отходов промышленной переработки остается актуальной научной задачей. Как отмечается в [1], «Объекты промышленного и гражданского строительства генерируют до 40% годовых выбросов CO₂ во всем мире. Из этого объема выбросов, на строительство приходится 28% ежегодно, а на строительные материалы и строительство (обычно называемые воплощенным углеродом) приходится дополнительно 11% ежегодно. В свете вышесказанного имеется обоснованная потребность в производстве строительных материалов на основе местных ресурсов и отходов промышленности и сельского хозяйства. Наличие современных трендов на рециклинг отходов, комплексное использование сырья и экономии ресурсов диктует необходимость развития строительных материалов на основе органо-вяжущих композитов с высокими эксплуатационными показателями».

Сохранность арматуры в теле легкого бетона на органическом заполнителе подтверждается экспериментальными исследованиями [2], где отмечается, что «хранение балочных образцов с преднапряженной арматурой в течение шести лет при влажности 63–77 % и температуре 15–25 °С показало хорошие защитные свойства поризованного арболита класса В5 и возможности сохранения требуемых свойств конструкции на весь период эксплуатации зданий». В [3] отмечается, что «многие химические добавки, в том числе сульфат глинозема, хлористый кальций, вызывают коррозию стальной арматуры, поэтому их добавление в количестве более 2 % от общей массы цемента не рекомендуется для древесно-цементных композитов».

В исследовании НИИЖБ установлено [4], что введение в состав арболита комплексных химических добавок ННК (нитрит-нитрат кальция) и ННХК (нитрит нитрат хлорид кальция) вместо CaCl₂ или применение нитрита натрия позволяет получать бетон требуемой прочности и средней плотности, обладающий первичными защитными свойствам и по отношению к стальной арматуре. Арматуру в таком бетоне можно использовать без дополнительной поверхностной защиты при относительной влажности воздуха не более 60% . В условиях повышенной относительной влажности среды (61...75%) сохранность арматуры обеспечивается специальными антикоррозионными покрытиями – в этих случаях арматуру необходимо защищать латексно-минеральными или сланцебитумно-цементными антикоррозионными составами, разработанными НИПИ силикатобетоном для сланцезольных ячеистых бетонов.

Методы вероятностного анализа применялись для исследования неармированных элементов из древесно-цементного композита в работах [5, 6 и др.]. Так в статье [7] предложено уравнение для оценки прочности на сжатие древесно-цементного композита на основе испытаний бетона с заменой мелкого заполнителя по объему древесной щепой при различных уровнях замены: от 5% до 50%. Также была проведена корреляция между

значениями прочности на сжатие древесно-цементного композита по результатам разрушающих испытаний и испытаний склерометром.

В статье [8] описаны испытания балок из древесно-цементного композита со стальной и пластиковой арматурой. Исследование показало, что балки из древесно-цементного композита с размерами сечения 80х160 мм и пролетом 1200 мм выдерживают предельную сосредоточенную нагрузку около 500 кг (стальная арматура) и 300 кг (пластиковая арматура). Также отмечается, что по сравнению с альтернативными легкими бетонами, древесно-цементный имеет серьезное преимущество в своей дисперсно-армированной структуре, которая обеспечивает повышенную прочность на растяжение. В качестве дисперсной арматуры используется древесная щепа длиной до 30 мм и поперечным размером до 10 мм. Если прочность на растяжение обычного тяжелого и легкого бетона составляет 5-10% от прочности на сжатие, то для древесно-цементного бетона 25-30% при осевом растяжении и еще больше при изгибе.

В настоящей статье предлагается рассмотреть возможность применения методов вероятностного анализа для оценки армирования балок из древесно-цементного композита по условию прочности нормальных сечений балок.

Материалы и методы исследований

Приведенная прочность древесно-цементного композита при влажности 16% определяется в соответствии с [9] как:

$$R_{c(16)} = R_{c(W)} \cdot [1 \pm \alpha \cdot (W - 16)], \quad (1)$$

где $R_{c(W)}$ – прочность на сжатие древесно-цементного композита при содержании воды W ; α – поправочный коэффициент на влажность, полученный эмпирическим путем (для древесно-цементного композита без добавок $\alpha = 0,03$); поправочный коэффициент берется со знаком «+» при содержании влажности $W > 16$ и «-» при влажности $W < 16$.

В исследовании [9] сделан вывод, что причина снижения прочности древесно-цементного композита за счет деструктивных процессов при снижении его водосодержания ниже 15-17% подтверждается результатами исследований, которые показали, что в древесно-цементном композите, высушенном до абсолютно сухого состояния, а затем увлажненном до экстремального значения - первоначальная прочность не восстанавливается. Снижение прочности древесно-цементного композита при сушке обусловлено деструктивными процессами, происходящими на границе раздела «цементный камень – древесный наполнитель». В работе [10] отмечается, что наибольшую прочность древесно-цементный композит проявляет при естественной влажности, равной 11-13%. Этот показатель соответствует равновесному влагосодержанию, т.е. фактическому среднему влагосодержанию древесно-цементного композита по толщине стенки конструкции и сторон света в отопительный период после 3-5 лет эксплуатации. Равновесная весовая влажность в конструкциях из древесно-цементного композита в зданиях с сухим режимом эксплуатации в сухом и нормальном климатических поясах влажности и в зданиях с нормальным режимом эксплуатации в сухом климатическом поясе принимается равной 10%. В остальных конструкциях из древесно-цементного композита равновесная влажность принимается равной 15%.

Для вероятностного анализа армирования изгибаемого элемента из древесно-цементного композита необходима математическая модель предельного состояния. В соответствии с «Инструкцией по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита» СН 549-82, однослойные прямоугольные изгибаемые элементы неармированные или с монтажным армированием рассчитываются по формуле:

$$M \leq \frac{1,1 \cdot b \cdot h^2}{3,5} \cdot R_{bt}, \quad (2)$$

где R_{bt} – прочность на осевое растяжение древесно-цементного композита.

Взаимосвязь между прочностью древесно-цементного композита на осевое растяжение и прочностью древесно-цементного композита на сжатие представлена на рис. 1 на основании данных ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

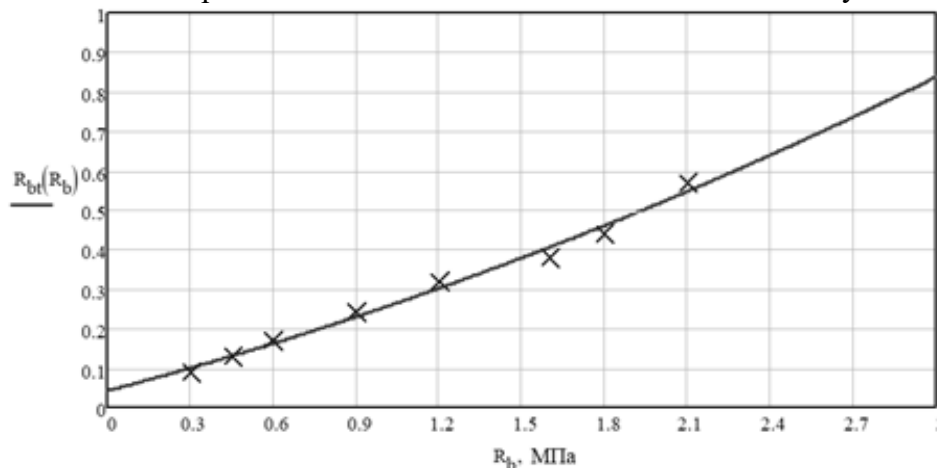


Рисунок 1 – Графическая интерпретация функциональной взаимосвязи между прочностью древесно-цементного композита на осевое растяжение и прочностью древесно-цементного композита на сжатие

Математически эта зависимость может быть выражена уравнением:

$$R_{bt}(R_b) = [0,027 \cdot R_b^2 + 0,184 \cdot R_b + 0,042] \text{ МПа}, \quad (3)$$

где параметр R_b следует подставлять в МПа.

И тогда критерий предельного состояния для прочности нормальных сечений балок из древесно-цементного композита неармированного или с монтажным армированием можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = \frac{1,1 \cdot b \cdot h^2}{3,5} \cdot [0,027 \cdot R_b^2 + 0,184 \cdot R_b + 0,042 \text{ МПа}] \quad (4)$$

где параметр R_b следует подставлять в МПа.

В [8] отмечено, что напряжение в арматуре зависит от модуля упругости древесно-цементного композита и дополнительного момента M' , который следует определять как:

$$M' = k_\alpha \cdot R_s \cdot A_s \cdot [h_0 - a'], \quad (5)$$

где параметр $k_\alpha = \frac{0,05 \cdot E_b}{1000}$, E_b – модуль упругости древесно-цементного композита

при изгибе; A_s – площадь растянутой арматуры; R_s – расчетное сопротивление арматуры растяжению.

Следует отметить, что в вероятностном анализе не используются подходы нормативных и расчетных сопротивлений. Случайные величины принято обозначать волнистыми линиями над символами. В итоге условие предельного состояния можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{M} \leq \frac{1,1 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}^2}{3,5} \cdot [0,027 \cdot \tilde{\sigma}_{b,ult}^2(\tilde{W}) + 0,184 \cdot \tilde{\sigma}_{b,ult}(\tilde{W}) + 0,042 \text{ МПа}] + \\ + \frac{0,05 \cdot \tilde{E}_b}{1000} \cdot \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A_s \cdot [\tilde{h}_0 - \tilde{a}'] \end{aligned} \quad (6)$$

Если принять коэффициент вариации прочности на сжатие древесно-цементного композита равным 20% [9], то для классов прочности по ГОСТ 19222-2019 можно получить следующие статистические параметры (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические данные прочности древесно-цементного композита при сжатии

Класс ДЦК	B0,5	B1,0	B1,5	B2,0	B2,5	B3,0
$m_{\sigma,b}$, МПа	0,581	1,162	1,744	2,325	2,906	4,100
$S_{\sigma,b}$, МПа	0,116	0,232	0,349	0,465	0,581	0,820

В ГОСТ 19222-2019 представлены данные для модуля упругости древесно-цементного композита при сжатии и растяжении. В исследовании [8] отмечается, что модуль упругости древесно-цементного композита при изгибе значительно выше, чем аналогичный модуль упругости при сжатии.

Неравенство (6) представляет математическую модель предельного состояния для вероятностного анализа надежности балки по критерию прочности нормальных сечений, где в левой части неравенства находятся базисные переменные нагрузки, а в правой части базисные переменные несущей способности. Для вычисления вероятности безотказной работы необходимо принять функции распределения случайных величин для базисных переменных.

Равномерное распределение принято для размеров поперечного сечения b и h , поскольку всегда известны технические допуски на размеры сечения, которые легко контролировать на заводе или строительной площадке [11]. Однако распределение вероятностей в этих пределах трудно оценить. Для общего случая можно принять гипотезу, что любое значение в этих границах будет иметь одинаковую вероятность. Расстояние от нижнего края балки до центра растянутой арматуры a' предполагается нормально-распределенным, поскольку его трудно контролировать в процессе производства балки.

Содержание воды в древесно-цементном композите (влажность) меняется в течение года под воздействием влажности воздуха, отопления, природных явлений и т.д. Наиболее рационально собирать статистику по годовым максимумам влагосодержания материала, которые обычно моделируются распределением Гумбеля. Это позволяет, в том числе, прогнозировать вероятность отказа с учетом планируемого срока службы объекта.

Предел текучести стали арматуры описан нормальным распределением вероятностей, в соответствии с указаниями стандарта JCSS Probabilistic Model Code. Хотя зачастую наблюдается отклонение действительного распределения вероятностей от нормального распределения для предела текучести стали арматуры [12]. Например, используется логнормальное [13] или лог-логистическое распределение вероятностей [14].

Вероятность отказа P_f можно вычислить, используя генерацию данных методом Монте-Карло, в виде:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(X_j) > 0], \quad (7)$$

где $I[.]$ функция индикатора, которая принимает значение 1, если условие $I[.]$ равно «правда» и 0, если условие $I[.]$ равно «ложь»; N – число генераций исходных данных.

Моделирование случайных величин в соответствии с основными распределениями вероятностей (нормальным, равномерным и т.д.) может быть выполнено, например, в программе MathCAD. Однако зачастую функция распределения вероятностей может отличаться от известных распределений или представлять собой модель непараметрического р-блока [15]. В этом случае можно использовать метод обратного преобразования Н.В.

Смирнова: генерируются N значений равномерно-распределенной случайной величины u_i в пределах $[0; 1]$. Значения случайной величины в виде $x_i = F^{-1}(u_i)$ получают методом обратного преобразования. Более подробную информацию можно найти в исследовании [16].

Следует отметить, что на первом этапе разработки представленного алгоритма не учитывается неопределенность модели несущей способности. Например, в JCSS Probabilistic Model Code предлагается для модели несущей способности железобетонного элемента при изгибе использовать логнормальное распределение с математическим ожиданием 1,2 и коэффициентом вариации 15%. Это показывает наличие среднего ожидаемого запаса в 20% в базовой модели несущей способности вследствие того, что она, как правило, является эмпирической. Оценка неопределенности модели несущей способности для армированных балок из древесно-цементного композита является задачей отдельного исследования.

Результаты исследования и их анализ

На первом этапе исследования выполнены лабораторные испытания армированной балки из древесно-цементного композита с определением статистических характеристик случайных параметров в неравенстве (6). Необходимо установить, при каком индексе надежности балка фактически исчерпает несущую способность по критерию прочности нормальных сечений. Это позволит верифицировать принятую математическую модель предельного состояния для вероятностного анализа надежности и описания напряженно-деформированного состояния балки.

Для вероятностного анализа балки из древесно-цементного композита установлены следующие распределения случайных величин (табл. 2).

Таблица 2 – Случайные величины и параметры

Случайная величина	Распределение вероятностей	Параметры
Ширина балки, b	Равномерное	$\underline{b} = 290$ мм, $\bar{b} = 310$ мм
Высота балки, h	Равномерное	$\underline{h} = 290$ мм, $\bar{h} = 310$ мм
Пролет балки, l	Постоянная (детерминированная) величина	$l = 1500$ мм
Площадь растянутой арматуры, A_s	Постоянная (детерминированная) величина	$A_s = 150,7$ мм ² (3 стержня Ø8)
Предельное напряжение в арматуре, $\sigma_{s,ult}$	Нормальное	$m_{\sigma,s} = 275$ МПа, $S_{\sigma,s} = 10$ МПа
Предельное напряжение в бетоне, $\sigma_{b,ult}$	Нормальное	$m_{\sigma,b} = 1,162$ МПа, $S_{\sigma,b} = 0,232$ МПа
Максимальная влажность материала, W	Гумбеля	$\alpha_W = 16\%$, $\beta_W = 1\%$
Расстояние, a'	Нормальное	$m_a = 45$ мм, $S_a = 2$ мм
Расстояние, h_0	Нормальное	$m_{h0} = 270$ мм, $S_{h0} = 3$ мм
Модуль упругости, E	Нормальное	$m_E = 1200$ МПа, $S_E = 70$ МПа
Испытательная нагрузка, F	Постоянная (детерминированная) величина	От 0 кН до 15 кН

Исследуемый прототип армированной балки из древесно-цементного композита представлен на рис. 2.

Функция предельного состояния для прочности нормальных сечений в случае испытания балки в лабораторных условиях примет вид:

$$g = \frac{1,1 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}^2}{3,5} \cdot [0,027 \cdot \tilde{\sigma}_{b,ult}^2(\tilde{W}) + 0,184 \cdot \tilde{\sigma}_{b,ult}(\tilde{W}) + 0,042 \text{ МПа}] + \frac{0,05 \cdot \tilde{E}_b}{1000} \cdot \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A_s \cdot [\tilde{h}_0 - \tilde{a}'] - \frac{F \cdot l}{4} \geq 0. \quad (8)$$



Рисунок 2 – Исследования прототипа армированной балки из ДЦК при изгибе

Балка была нагружена сосредоточенной нагрузкой в середине пролета. График зависимости нагрузки от прогиба (рис. 3) строился во время нагружения.

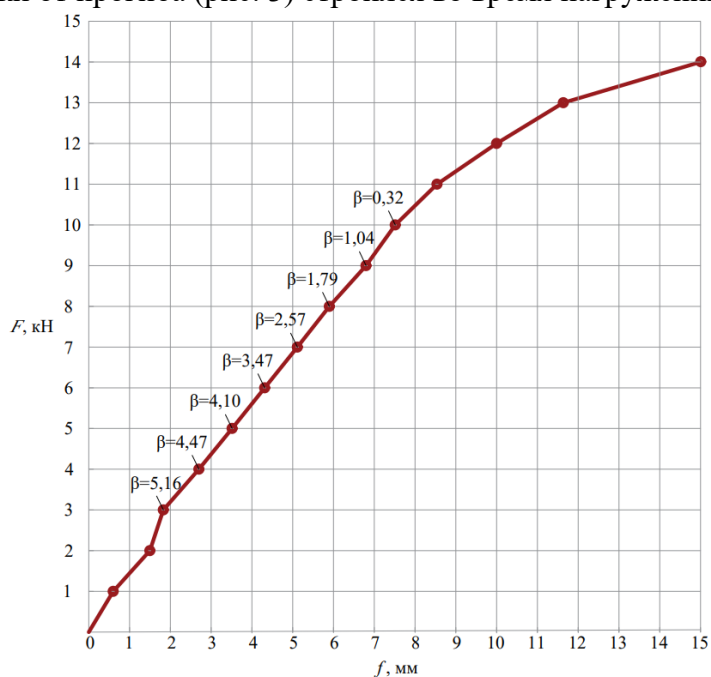


Рисунок 3 – Диаграмма «нагрузка – прогиб» исследуемого прототипа

Пусть целевой уровень вероятности безотказной работы составляет $P = 0,99993$ (целевой индекс надежности $\beta = 3,8$). Методом подбора было установлено, что при генерации случайных значений по параметрам табл. 2 произошло 7 отказов ($g < 0$) на 100000 генераций при значении нагрузки $F_\beta = 5,7$ кН. По результатам подбора распределения через Distribution Fitter App в MATLAB, для нормального распределения выявлены следующие параметры: среднее значение предельного момента $m_{M,ult} = 3,94$ кН·м, стандартное отклонение $S_{M,ult} = 0,54$ кН·м.

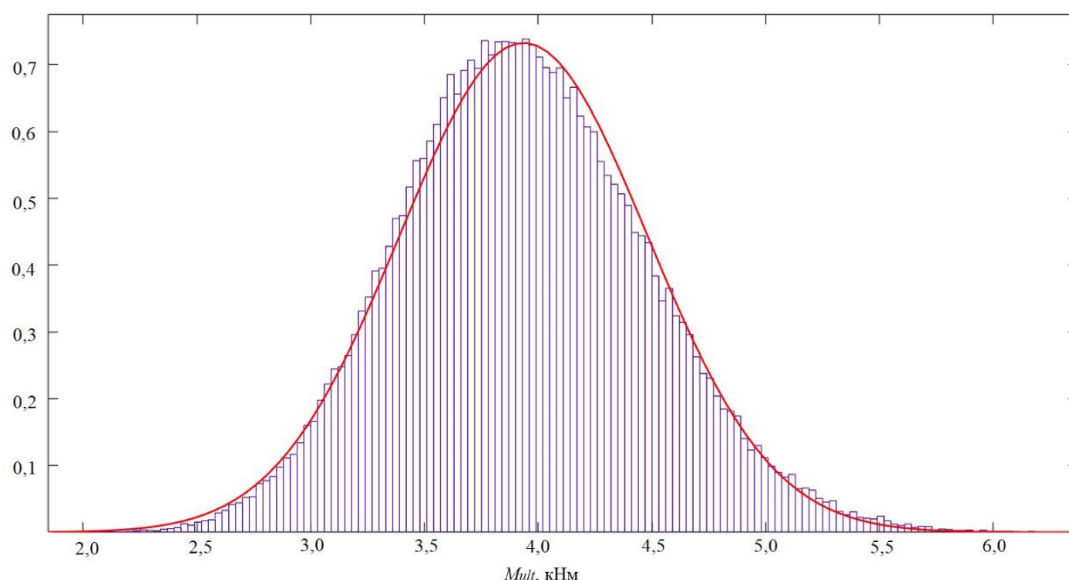


Рисунок 4 – Гистограмма и график функции плотности вероятностей (красная кривая) для предельного изгибающего момента по данным таблицы 2 и формулы (6)

По описанному выше алгоритму были рассчитаны вероятности безотказной работы и показатели надежности для балок с различными классами прочности арматуры и древесно-цементного композита при нагрузке $F=600$ кг (табл. 3). Для класса арматуры A400 принято $m_{\sigma,s} = 400$ МПа, $S_{\sigma,s} = 20$ МПа.

Таблица 3 – Параметры армирования и показатели надежности

Класс арматуры	Армирование	Вероятность безотказной работы	Индекс надежности
A240	3Ø8	0,99974	3,47
A240	4Ø8	0,99995	3,90
A240	5Ø6	0,99985	3,61
A400	2Ø8	0,99969	3,42
A400	3Ø8	0,99999	4,18
A400	5Ø6	0,99997	4,00

Необходимо проверить критерий относительной высоты сжатой зоны бетона (глубины нейтральной оси), чтобы избежать переармирования балки при анализе:

$$\frac{x}{h_0} \leq \frac{0,8}{1 + \frac{R_s}{E_s \cdot \varepsilon_{b2}}}, \quad (9)$$

где ε_{b2} принимается по таблице 6.10 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» с понижающим коэффициентом $0,4 + \frac{0,6 \cdot \rho}{2200} \geq 0,7$, где ρ – плотность древесно-цементного композита в кг/м³.

На основе полученной информации о вероятностной модели предельного изгибающего момента M_{ult} , полученной выше, можно также рассчитать индекс надежности и вероятность безотказной работы для случая действительных эксплуатационных нагрузок. Пусть армированная балка из древесно-цементного композита является перемычкой, на которую действуют нагрузки от собственного веса и веса вышележащих конструкций. В п. С6 Eurocode 0 “Basis of structural design” отмечается, что нагрузка от собственного веса конструкций может быть принята нормально-распределенной. Таким образом, если функции распределения изгибающего момента от нагрузки и предельного изгибающего момента принять как нормально-распределенные, то вероятность безотказной работы P_s можно вычислить в аналитическом виде как:

$$P_s = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{m_{M_{ult}} - m_M}{\sqrt{S_{M_{ult}}^2 + S_M^2}}\right), \quad (10)$$

где m_M – математическое ожидание максимального изгибающего момента от внешней нагрузки; S_M – среднеквадратическое отклонение максимального изгибающего момента от внешней нагрузки; $\Phi(\cdot)$ – значение функции Лапласа.

Предельные значения вероятности разрушения (табл. 5) для зданий и сооружений предложены в [17].

Таблица 4 – Параметры армирования и показатели надежности

Класс надежности	Вероятность отказа (1 группа ПС)	Вероятность отказа (2 группа ПС)
Низкий	0,000500 ($\beta=3,29$)	0,160 ($\beta=1,00$)
Средний	0,000070 ($\beta=3,80$)	0,070 ($\beta=1,48$)
Высокий	0,000008 ($\beta=4,60$)	0,023 ($\beta=2,00$)

Производитель балок из древесно-цементного композита может провести более детальные исследования, чтобы определить функцию распределения вероятностей для прочности изделия. Если статистические данные ограничены, можно использовать специальные теории анализа данных [18]. На основе представленного алгоритма можно проводить RBDO (reliability based design optimization) [19, 20]. Развитие понимания влияния изменчивости случайных величин на надежность балки позволяет повысить качество выпускаемых балок.

Выводы

1. В статье предложен новый подход к анализу армирования балок из древесно-цементного композита на основе вероятностно-статистических алгоритмов оценки надежности, что позволяет исследовать влияние изменчивости расчетных параметров на общий уровень надежности балки. Установлено, что в математической модели предельного состояния присутствуют случайные величины с различными функциями распределения вероятностей, что делает аналитический расчет индекса надежности и вероятности

безотказной работы затруднительным. В связи с этим, разработан алгоритм расчета надежности на основе численного подхода – метода Монте-Карло.

2. По результатам экспериментальных исследований установлено, что армированная балка из древесно-цементного композита может выдерживать до 1000 кг эксплуатационной нагрузки при пролете 1,5 м (по критерию прочности нормальных сечений и жесткости (прогибу)), что позволяет рассмотреть возможность ее использования в качестве отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений, например, перемычек. Допустимая нагрузка на экспериментальный образец для обеспечения индекса надежности выше $\beta = 3,0$ составила 600 кг.

3. Предложена методика оценки вероятности безотказной работы для задач со случайными нагрузками на армированные балки из древесно-цементного композита. На ее основе можно выполнить расчет конструкции на заданный уровень надежности, выявить наиболее безопасное решение среди различных технических исполнений армированных балок из древесно-цементного композита.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-01035, <https://rscf.ru/project/23-79-01035/>

The research was founded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035. <https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долматов С. Н., Колесников П. Г. Исследование влияния стальных теплопроводных включений на теплотехнические свойства ограждающей конструкции из древесно-цементного композита // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 1. С. 76-83.
2. Обрезкова, В. А. Исследование изгибаемых предварительно напряженных конструкций из поризованного арболита: специальность. 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения: автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Обрезкова. Самара: СГАСУ, 2005. 20 с.
3. Dolmatov S. N., Kolesnikov P. G. Wood-Cement Composite and its Reinforcement with Wooden Bars // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910. Pp. 982-987.
4. Егорова Е.М., Липей О.А. Коррозионная стойкость арматуры в поризованном арболите // Бетон и железобетон. № 10. 1988. С. 39-40.
5. Andre N., Cho H. W., Baek S. H., Jeong M. K., Young, T. M. Prediction of internal bond strength in a medium density fiberboard process using multivariate statistical methods and variable selection // Wood Science and Technology. 2008. No. 42. Pp. 521-534.
6. Sanaev V. G., Zaprudnov V. I., Gorbacheva G. A., Oblivin A. N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2016. Vol. 9. No.2. Pp. 63-70.
7. Fadiel A.A.M., AbuLebdeh, T., Petrescu, F.I.T. Assessment of Woodcrete Using Destructive and Non-Destructive Test Methods // Materials. 2022. No. 15. Pp. 3066.
8. Korolev A., Koroleva Y., Gusev D. Wood (arbolit) concrete for bearing span structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. No. 107. Article No 10705.
9. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Ленинград: Стройиздат, 1990. 415 с.
10. Ягубкин А. Н. Влияние влажности на водостойкость и долговечность арболитовых изделий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2012. С. 60-63.
11. Jiang C., Lu G. Y., Han X., Liu L. X. A new reliability analysis method for uncertain structures with random and interval variables // International Journal of Mechanics and Materials in Design. 2012. No. 8. Pp. 169-182.
12. Харитонов В. А., Николаев И. Н., Петров И. М. Анализ уровня качества арматурной стали А400С и А500С на основе методов математической статистики // Качество в обработке материалов. 2016. №. 1(5). С. 18-22.
13. Zeng C., Zhu J. H., Xiong C., Li Y., Li D., Walraven J. Analytical model for the prediction of the tensile behaviour of corroded steel bars // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 258. Pp. 120290.
14. Djavanroodi F., Salman A. Variability of mechanical properties and weight for reinforcing bar produced in Saudi Arabia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 230. No. 1. Pp. 012002.
15. Соловьев С. А., Соловьева А.А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1545-1555.

16. Zhang H., Mullen R. L., Muhanna R. L. Interval Monte Carlo methods for structural reliability // *Structural Safety*. 2010. Vol. 32. No. 3. Pp. 183-190.
17. Marek P., Brozzetti J., Guštar M. Probabilistic Assessment of Structures Using Monte Carlo Simulation. Czech Republic, Prague: CAS, 2003. 471 p.
18. Solovyev S., Solovyeva A. Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 7(107).
19. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 366. Pp. 113018.
20. Meng Z., Li G., Wang X., Sait S. M., Yildiz, A. R. A comparative study of metaheuristic algorithms for reliability-based design optimization problems // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. No. 28. Pp. 1853-1869.

REFERENCES

1. Dolmatov S. N., Kolesnikov P. G. Issledovanie vliyaniya stal'nyh teploprovodnyh vkluyucheniij na teplotekhnicheskie svoystva ograzhdayushchej konstrukcii iz drevesno-cementnogo kompozita [Study of the Influence of Steel Heat-Conducting Inclusions on the Thermal Properties of an Enclosing Structure Made of Wood-Cement Composite]. *Conifers of the Boreal Zone*. 2022. Vol. 40. No. 1. Pp. 76–83. (rus).
2. Obrezkova V. A. Issledovanie izгибаemyh predvaritel'no napryazhennyh konstrukcij iz porizovannogo arbolita [Study of Pre-Stressed Bending Structures Made of Porous Arbolite]: Specialty 05.23.01 PhD Thesis. Samara: SGASU, 2005. 20 p. (rus)
3. Dolmatov S. N., Kolesnikov P. G. Wood-Cement Composite and its Reinforcement with Wooden Bars. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. Pp. 982-987.
4. Egorova E. M., Lipey O. A. Korroziionnaya stojkost' armatury v porizovannom arbolite [Corrosion Resistance of Reinforcement in Porous Arbolite]. *Concrete and Reinforced Concrete*. No. 10. 1988. Pp. 39–40. (rus)
5. Andre N., Cho H. W., Baek S. H., Jeong M. K., Young, T. M. Prediction of internal bond strength in a medium density fiberboard process using multivariate statistical methods and variable selection. *Wood Science and Technology*. 2008. No. 42. Pp. 521-534.
6. Sanaev V. G., Zaprudnov V. I., Gorbacheva G. A., Oblivin A. N. Factors affecting the quality of wood-cement composites. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 2016. Vol. 9. No. 2. Pp. 63-70.
7. Fadiel A.A.M., AbuLebdeh, T., Petrescu, F.I.T. Assessment of Woodcrete Using Destructive and Non-Destructive Test Methods. *Materials*. 2022. No. 15. Pp. 3066
8. Korolev A., Koroleva Y., Gusev D. Wood (arbolit) concrete for bearing span structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. No. 107. Article No 10705. (rus)
9. Nanazashvili I. H. Stroitel'nye materialy iz drevesno-cementnoj kompozicii [Building Materials Made of Wood-Cement Composite]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 415 p. (rus)
10. Yagubkin A. N. Vliyanie vlazhnosti na vodostojkost' i dolgovechnost' arbolitovyh izdelij [Influence of Moisture on Water Resistance and Durability of Arbolite Products]. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences*. 2012. Pp. 60–63. (rus)
11. Jiang C., Lu G. Y., Han X., Liu L. X. A new reliability analysis method for uncertain structures with random and interval variables. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2012. No. 8. Pp. 169-182.
12. Kharitonov V. A., Nikolaev I. N., Petrov I. M. Analiz urovnya kachestva armaturnoj stali A400S i A500S na osnove metodov matematicheskoy statistiki [Analysis of the Quality Level of Reinforcing Steel A400C and A500C Based on Methods of Mathematical Statistics]. *Quality in Material Processing*. 2016. No. 1 (5). Pp. 18–22. (rus)
13. Zeng C., Zhu J. H., Xiong C., Li Y., Li D., Walraven J. Analytical model for the prediction of the tensile behaviour of corroded steel bars. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. Pp. 120290.
14. Djavanroodi F., Salman A. Variability of mechanical properties and weight for reinforcing bar produced in Saudi Arabia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 230. No. 1. Pp. 012002.
15. Solovyev S. A., Solovyeva A. A. Method of Probabilistic Analysis of Structural Element Reliability Based on Boundary Distribution Functions. *Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering*. 2023. Vol. 18. No. 10. Pp. 1545–1555. (rus)
16. Zhang H., Mullen R. L., Muhanna R. L. Interval Monte Carlo methods for structural reliability. *Structural Safety*. 2010. Vol. 32. No. 3. Pp. 183-190.
17. Marek P., Brozzetti J., Guštar M. Probabilistic Assessment of Structures Using Monte Carlo Simulation. Czech Republic, Prague: CAS, 2003. 471 p.
18. Solovyev S., Solovyeva A. Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 7(107)
19. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 366. Pp. 113018.

20. Meng Z., Li G., Wang X., Sait S. M., Yıldız, A. R. A comparative study of metaheuristic algorithms for reliability-based design optimization problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. No. 28. Pp. 1853-1869.

Информация об авторах

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Шевцов Леонид Сергеевич

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия
аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: shetcovls@vogu35.ru

Соловьева Анастасия Андреевна

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия
старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

Information about the authors

Solovyev Sergey Alexandrovich

Vologda State University, Vologda, Russia
Candidate of tech, sciences, associate professor of the industrial and civil construction department
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Shevcov Leonid Sergeevich

Vologda State University, Vologda, Russia
lecturer, post-graduate student the industrial and civil construction department
E-mail: shetcovls@vogu35.ru

Solovyeva Anastasia Andreevna

Vologda State University, Vologda, Russia
lecturer, post-graduate student the industrial and civil construction department
E-mail: solovevsa@vogu35.ru