



## Пути оптимизации железобетонных конструкций заводского изготовления на основе прикладных методов теории надежности

И.В. Дудина<sup>1✉</sup>, В.М. Камчаткина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Братский государственный университет, Братск, Россия

**Аннотация.** Целью данной работы является выбор направлений оптимизации железобетонных конструкций заводского изготовления на основе прикладных методов теории надежности, в частности вероятностных методов. Критерием необходимости оптимизации является существенное превышение расчетного показателя надежности над нормативным. Методы исследований включают вероятностно-статистическое компьютерное моделирование и натурные испытания на комбинате «Братскжелезобетон». В представленной работе были получены результаты оптимизации двух видов сборных железобетонных конструкций: многопустотных панелей перекрытия серии 1.141-1 и балок покрытия со смешанным армированием серии 1.462.1-1/88. Оптимизация многопустотных панелей перекрытия выполнялась по двум направлениям: снижение толщины панелей ( $h = 160$  мм) и разработка облегченных панелей для малоэтажного строительства; замена одного класса напрягаемой арматуры другим более высокопрочным, вызванная производственной необходимостью для обеспечения начальной надежности этих конструкций. Выполненные исследования показали, что проблема оптимизации многопустотных панелей перекрытия является логически обоснованной как с точки зрения экономии ресурсов, так и повышения их надежности. В результате вероятностных расчетов балок со смешанным армированием была установлена область оптимального количества ненапрягаемой рабочей арматуры при коэффициенте частичного пред напряжения в диапазоне  $K_p = 0,65 \dots 0,75$ . Моделирование по разработанным программам доказало, что учет нелинейности деформирования позволяет более точно выявить резервы снижения материалоемкости конструкций и выполнить оптимизацию ее армирования.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, снижение материалоемкости, оптимизация, надежность, вероятностные методы, расчетные модели

**Для цитирования:** Дудина И.В., Камчаткина В.М. Пути оптимизации железобетонных конструкций заводского изготовления на основе прикладных методов теории надежности// Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 4. С. 688–701. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-4-688-701>. EDN: LUBYEL.

### Original article

## Ways to optimize factory-made reinforced concrete structures based on applied methods of reliability theory

Irina V. Dudina<sup>1✉</sup>, Varvara M. Kamchatkina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Bratsk State University, Bratsk, Russia

**Abstract.** The purpose of this work is to select the areas of optimization of factory-made reinforced concrete structures based on applied methods of reliability theory, in particular probability methods. The criterion for the need for optimization is a significant excess of the calculated reliability indicator over the normative one. Research methods include probability-statistical computer modeling and field tests at the Bratskzhelezobeton plant. In the presented work, the results of optimization of two types of precast reinforced concrete structures were obtained: multi-cavity floor panels of the 1.141-1 series and coating beams with mixed reinforcement of the 1.462.1-1/88 series. Optimization of multi-cavity floor panels was carried out in two directions: reduction of panel thickness ( $h = 160$  mm) and development of light weight

---

© Дудина И.В., Камчаткина В.М., 2025

ISSN 2227-2917

(print)

ISSN 2500-154X

(online)

688

Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость  
Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate

Том 15 № 4 2025

с. 688–701

Vol. 15 No. 4 2025

pp. 688–701

panels for low-rise construction; replacement of one class of tensioned reinforcement with another more high-strength, caused by industrial necessity to ensure the initial reliability of these structures. The performed studies have shown that the problem of optimizing multi-cavity floor panels is logically justified both in terms of saving resources and increasing their reliability. As a result of probabilistic calculations of beams with mixed reinforcement, the optimal amount of non-stressed working reinforcement was determined with a partial prestressing coefficient in the range of  $K_r = 0.65...0.75$ . Modeling using the developed programs proved that taking into account the nonlinearity of deformation makes it possible to more accurately identify reserves for reducing the material consumption of structures and optimize its reinforcement.

**Keywords:** reinforced concrete structures, reduction in material consumption, optimization, reliability, probabilistic methods, calculation models

**For citation:** Dudina I.V., Kamchatkina V.M. Ways to optimize factory-made reinforced concrete structures based on applied methods of reliability theory. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2025;15(4):688-701. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-4-688-701>. EDN: LUBYEL.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сфера строительства является одной из областей народного хозяйства, которая развивается высокими темпами и в значительной степени влияет на развитие других отраслей и экономики в целом. В то же время строительство представляет собой одну из наиболее материалоемких производственных отраслей, что делает уменьшение материальноемкости строительных конструкций приоритетной задачей современной науки.

Особое значение в этом контексте приобретает выявление резервов снижения материальноемкости железобетонных конструкций (ЖБК) массового индустриального изготовления.

Основное внимание уделяется нахождению оптимального баланса между экономичностью и безопасностью конструкций в процессе их эксплуатации [1–5].

Совершенствование проектных решений, в частности путем оптимизации конструкций, может существенно способствовать решению этой проблемы, уменьшая их материальноемкость [6–9]. На основании выполненного анализа ресурсов снижения материальноемкости ЖБК заводского изготовления было установлено два ключевых уровня задач [12–13]. Первый уровень непосредственно связан с экономией стали и цемента за счет повышения прочностных характеристик конструкционных материалов и улучшения параметров химизации технологического процесса [3, 12]. Второй уровень задач предполагает совершенствование расчетного аппарата ЖБК, включая вероятностный подход, внедрение новых эффективных конструкций и технологий [1, 2, 5, 12–17]. Решение проблемы оптимизации конструкций

требует разработки ряда вопросов, среди которых ключевыми являются:

- формулирование основных критериев оптимальности конструкции [1, 2, 4, 12–15];
- выбор оптимальной расчетной модели, методов и алгоритмов решения задачи оптимизации [5, 6, 11, 14–17];
- учет реальных условий эксплуатации конструкции [18–24].

При решении оптимационных задач необходимо учитывать возможность вариантового проектирования ЖБК.

Главным критерием при этом является обеспечение требуемого уровня надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений [1–3].

Решение подобных задач осуществляется с помощью вероятностных подходов и закономерностей, основанных на фундаментальных законах природы, что представляет теорию надежности фундаментальной наукой [1, 2, 23, 24], а исследования строительных конструкций на ее основе – прикладными [2, 4, 11–15, 25–27]. Основные направления исследований, базирующиеся на прикладных методах теории надежности, включают:

- проектирование строительных конструкций с заданным уровнем надежности и их оптимизация [1, 2, 5–9, 11–15];
- контроль качества сборных ЖБК на стадии изготовления с интегральной оценкой их надежности [1, 2, 4, 10–13];
- аналитическое прогнозирование надежности строительных конструкций, зданий и сооружений на основе многолетнего мониторинга с применением вероятностно-статистических моделей [1, 2, 5, 18–22].

Все перечисленные направления исследований строительных конструкций могут быть рассмотрены применительно к разным стадиям жизненного цикла зданий и сооружений, что позволяет с достаточной точностью оценить их долговечность [1, 2].

Целью данной работы является рассмотрение некоторых аспектов оптимизации сборных ЖБК путем совершенствования расчетного аппарата, в том числе, с использованием вероятностных подходов как прикладных методов теории надежности [2, 4, 12, 13, 15].

### **МЕТОДЫ**

В процессе решения обсуждаемых в статье проблем применялись вероятностно-статистические методы, реализованные в специально разработанных компьютерных программах, а также экспериментальные методы, основанные на натурных испытаниях исследуемых конструкций на комбинате «Братскжелезобетон» [2, 4, 11–14].

Вероятностный подход к оценке эксплуатационной пригодности сборных ЖБК на стадии изготовления заключается в определении и сравнении расчетных показателей их надежности с нормативными уровнями [1, 2, 4–7, 11–14]:

$$H \geq [H_i], \quad (1)$$

где  $H$  – показатель надежности, определенный на основе вероятностных методов в соответствии с выбранной расчетной моделью по каждому предельному состоянию;  $[H_i]$  – требуемый нормативный уровень надежности, который принимается для первой группы предельных состояний (по прочности)  $[H_1] = 0,9986$ ; для второй группы (по жесткости и трещиностойкости)  $[H_2] = [H_3] = 0,90$  [1, 2, 11–14].

Важным ключевым аспектом при разработке вероятностного алгоритма и реализации его в компьютерной программе по оценке надежности ЖБК является выбор оптимальной расчетной модели конструкции на стадии эксплуатации, которая наиболее достоверно отражает фактическое ее напряженно-деформированное состояние (НДС) [2, 4, 11–17, 25–30].

На основании выполненных исследований для оценки эксплуатационной пригодности ЖБК и, соответственно, для их оптимизации можно рассмотреть две основополагающие конкурентоспособные модели:

- на основе современных норм проектирования ЖБК (СНИП) с реализацией метода предельных состояний [1, 2, 11, 20];
- нелинейно-деформационная модель (НДМ), учитывающая физическую нелинейность конструкционных материалов за счет использования диаграммного подхода

[11, 14, 16, 17, 25–30]. Условие (1) является основой для решения оптимизационных задач исследуемых конструкций в случае, если расчетный показатель надежности  $H$  по какому-либо предельному состоянию существенно превышает нормативный уровень [2, 12, 15, 25–27]. Учитывая математический аппарат прикладной теории надежности и то обстоятельство, что изменчивость физико-механических характеристик материалов, геометрических параметров конструкций и уровня пред напряжения арматуры подчиняются закону нормального распределения, показатель надежности, представленный в общем виде (1), можно записать в виде отдельных дифференцированных показателей надежности применительно к разным группам предельных состояний изгибаемых ЖБК [1, 2, 4, 11–14]:

по 1-ой группе предельных состояний (по прочности)

$$H_1 = 0,5\Phi\left(\frac{M_u - M_o}{SM_u}\right) \geq [H_1], \quad (2)$$

по жесткости конструкций (по 2-ой группе)

$$H_2 = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{f_0 - f}{S_f}\right) \geq [H_2], \quad (3)$$

по трещиностойкости конструкций (по 2-ой группе)

$$H_3 = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{a_0 - a}{S_a}\right) \geq [H_3], \quad (4)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функция

Лапласа;  $M_u$  – предельный момент, воспринимаемый сечением элемента на основе принятой расчетной модели;  $f, a$  – расчетные значения прогиба и ширины раскрытия трещин, определяемые по выбранной расчетной модели;  $M_o$  – момент внешних сил от расчетной нагрузки;  $f_0, a_0$  – контрольные значения прогиба и раскрытия трещин, принимаемые согласно ГОСТ 8829-94;  $S_{M_u}, S_f, S_a$  – среднеквадратические отклонения соответственно величин  $M_u, f, a$ , определяемые на основании расчета по выбранной модели с учетом изменчивости технологических параметров.

Расчет ЖБК на основе НДМ дает возможность получить более точную оценку их НДС на всех этапах нагружения, вплоть до стадии разрушения, и выявить для них на этапе проектирования скрытые резервы снижения материалаемкости. Таким образом, можно получить экономический эффект (10...15) %, обусловленный совершенствованием расчетного аппарата исследуемых ЖБК за счет внедрения реальных диаграмм деформирования бетона и

арматуры, полученных на заводах ЖБИ экспериментальным путем [11–17, 25–27].

Следует отметить, что для оценки НДС и надежности сборных ЖБК на кафедре строительных конструкций и технологии строительства (СКиТС) Братского государственного университета были разработаны и зарегистрированы в Роспатенте программные комплексы по оценке эксплуатационной пригодности следующих несущих конструкций заводского изготовления: ребристых и многопустотных плит перекрытий и покрытий, ригелей, балок, ферм, стендовых панелей, колонн и др. [2, 4, 11–15, 25–27], которые прошли апробацию на комбинате «Братскжелезобетон».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе анализируются принципы и результаты оптимизации для двух типов сборных ЖБК [6, 11, 12, 25–27]:

- многопустотных панелей перекрытий и покрытий [12–15];
- балок покрытия с частично напрягаемой рабочей арматурой (совмещенным армированием) [14, 25–30].

### Анализ результатов оптимизации многопустотных панелей перекрытий

К рассмотрению предлагаются два основных направления оптимизации многопустотных панелей перекрытий [6, 8, 12, 15]:

- снижение высоты панелей перекрытия для жилых малоэтажных зданий [12, 15];
- оптимизация армирования за счет использования более высокопрочной арматуры для обеспечения надежности исследуемых панелей [6, 8, 12, 15].

Рассмотрим эти варианты оптимизации на примере типовых многопустотных панелей серии 1.141-1, для которых по проекту приняты класс бетона В15, напрягаемая арматура класса А600, способ натяжения арматуры – электротермический.

Величина контролируемого предварительного напряжения арматуры принята 450 МПа [14].

Типовые многопустотные панели перекрытий запроектированы пролетом (4,8...6,3) м, шириной (1,2...2,4) м, высотой сечения 220 мм. Для строительства малоэтажных жилых зданий (коттеджей) на комбинате «Братскжелезобетон» и на кафедре строительных конструкций и технологии строительства Братского государственного университета в целях снижения материалоемкости выпускаемых многопустотных панелей на базе указанной типовой серии были предложены для разработки и дальнейшего применения в этих зданиях облегченные панели меньшей толщины ( $h = 160$  мм) [12, 15].

Пролеты и ширина облегченных панелей приняты по аналогии с типовыми конструкциями, диаметр отверстий был назначен соответственно меньше (108 мм). Количество отверстий и расположение преднатяженной арматуры назначали из условия минимизации затрат на переоснастку форм [12, 15]. Облегченные многопустотные панели перекрытий были запроектированы под полезную расчетную нагрузку  $q = (3...4)$  кН/м<sup>2</sup>.

Расчеты облегченных панелей выполнялись на основе норм проектирования (СНиП) и по НДМ с учетом реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры. Для обеспечения их эксплуатационной пригодности также были выполнены вероятностные расчеты с помощью разработанного программного комплекса [12, 15]. В табл. 1 представлены геометрические и расчетные параметры преднатяженных облегченных панелей для расчетной полезной нагрузки  $q = 4$  кН/м<sup>2</sup>. Расчетный прогиб и раскрытие трещин в панелях получается меньше предельно допустимых значений. Уровень начальной надежности по прочности превышает нормативно-обеспеченный показатель надежности 0,9986, а по жесткости и трещиностойкости значительно выше нормативного уровня равного 0,90 [11, 12]. Анализ выполненных оптимизационных исследований показал, что снижение высоты панелей на 60 мм приводит к уменьшению расхода бетона и ее массы на 20 %. При этом несущая способность облегченной панели компенсируется увеличением расхода рабочей арматуры (в среднем на 13,8 %) согласно выполненному расчету и повышением прочностных характеристик бетона и напрягаемой арматуры. Исходя из этого обоснования рекомендуется назначить класс бетона для этих конструкций В20, а напрягаемую арматуру – более высокопрочную класса Ат800 [12, 15]. При определении экономического эффекта важно учесть следующие факторы. Во-первых, повышение класса бетона не будет сопровождаться увеличением расхода цемента, поскольку фактическая прочность бетона многопустотных панелей принимается в любом случае выше проектной из-за необходимости немедленной распалубки конструкций, которые изготавливаются по конвейерной технологии [12]. Во-вторых, с точки зрения экономической целесообразности замена класса арматуры также является логически обоснованной, поскольку арматура класса А600 изготавливается из низколегированной стали, стоимость которой несколько выше ( $\approx$  на 20 %), чем арматуры класса Ат800.

**Таблица 1.** Геометрические и расчетные параметры преднапряженных облегченных панелей перекрытия разных пролетов

**Table 1.** Geometrical and design parameters of prestressed lightweight floor panels of different spans

Расчетная полезная нагрузка $q$ , кН/м <sup>2</sup>	Пролет панели, м	Ширина панели, м	Количество стержней, диаметр и класс напрягаемой арматуры	Величина преднапряжения, МПа	Теоретическая предельная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>
4,0	4,8	1,2	4Ø10 At800	600	8,3
		1,5	4Ø12A600	450	8,2
		2,4	8Ø10 At800	600	8,5
	5,6	1,2	(2Ø10+2Ø12) At800	600	8,4
		1,5	4Ø12 At800	600	7,9
		2,4	(6Ø10+2Ø12) At800	600	7,7
	6,0	1,2	4Ø12 At800	650	8,4
		1,5	(4Ø10+2Ø12) At800	650	8,2
		2,4	(2Ø10+6Ø12) At800	650	7,9
	6,3	1,2	(2Ø12+2Ø14) At800	650	8,8
		1,5	(2Ø10+4Ø12) At800	650	8,2
		2,4	(6Ø12+2Ø14) At800	650	8,2

Таким образом, по обобщенным показателям стоимость одной облегченной многопустотной панели для малоэтажных зданий получается в среднем на 15,2 % меньше стоимости типовых конструкций [12, 15]. На кафедре строительных конструкций и технологии строительства Братского государственного университета были разработаны все рабочие чертежи облегченных многопустотных панелей перекрытий и выпущен альбом экспериментальной серии, который принят к внедрению для производственного применения на комбинате «Братскжелезобетон» [12]. Рассмотрим второй аспект оптимизации типовых многопустотных преднапряженных панелей перекрытий серии 1.141-1, обусловленный необходимостью замены напрягаемой арматуры одного класса арматуры другим, более высокопрочным с целью повышения недостаточной начальной надежности некоторых исследованных конструкций, обнаруженной в результате заводского контроля качества [15]. Следует отметить, что заводской контроль качества сборных ЖБК осуществляется на основании ГОСТ 8829–94, т. е. путем натурных испытаний, которые носят выборочный характер. В соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [2, 4, 11, 15, 25–27] целесообразно использовать автоматизированный контроль качества выпускаемой продукции с помощью программ по оценке начальной надежности исследуемых конструкций, реализующих вероятностные методы. Опыт натурных испытаний многопустотных панелей этой серии (более 50 шт.) на ком-

бинате «Братскжелезобетон» показал, что некоторые из них ( $\approx 20\%$ ) не соответствуют требованиям прочности и жесткости [12]. Для установления причин отрицательных результатов, полученных при натурных испытаниях панелей, были выполнены вероятностные расчеты оценки эксплуатационной пригодности исследуемых конструкций с помощью разработанного программного комплекса [2, 4, 11–13]. Полученные показатели начальной надежности многопустотных типовых панелей при проектном армировании, которые не выдержали контрольные испытания, представлены в табл. 2 [12]. Они также свидетельствуют о недостаточной надежности рассмотренных панелей по прочности ( $H_1 < 0,9986$ ) и некоторых по жесткости ( $H_2 < 0,90$ ). Показатель надежности по трещиностойкости  $H_3$  получается значительно выше нормативного уровня и в табл. 2 не представлен [12]. В качестве одного из вариантов выхода из сложившейся ситуации было принято решение в соответствии с производственной необходимостью заменить преднапряженную арматуру класса А600 на более высокопрочную класса At800, тем самым повысить уровень ее преднапряжения до 600–650 МПа и обеспечить надежность конструкций по первой и второй группам предельных состояний. Замена осуществлялась на основании вероятностных расчетов в соответствии с контрольными нормативами (контрольные значения нагрузки, прогиба и ширины раскрытия трещин). Класс бетона был принят В20 (по проекту В15) [12, 15].

**Таблица 2.** Параметры типовых многопустотных панелей, не выдержавших контрольные испытания, при проектном и измененном армировании

**Table2.** Parameters of typical hollow-core panels that failed control tests, with design and modified reinforcement

Марка исследуемых панелей	Теоретическая предельная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>			Показатели начальной надежности			
	по проекту	при оптимизации армирования	увеличение, %	при проектном армировании		при оптимизации армирования	
				по прочности $H_1$	по жесткости $H_2$	по прочности $H_1$	по жесткости $H_2$
ПК48-15-8А-IVт	13,35	15,34	19,2	0,9630	0,9100	0,9996	0,9999
ПК60-15-8А-IVт	13,19	15,11	18,8	0,9533	0,6910	0,9994	0,9790
ПК63-15-8А-IVт	13,53	15,22	16,0	0,9838	0,6170	0,9996	0,9160
ПК48-12-8А-IVт	13,65	16,44	26,2	0,9620	0,9790	0,9999	0,9975
ПК60-15-6А-IVт	11,11	13,53	29,8	0,9790	0,5310	0,9999	0,9570
ПК63-12-8А-IVт	14,58	15,88	11,2	0,9973	0,9300	0,9999	0,9660

На основании анализа показателей видно, что теоретическая разрушающая нагрузка для исследуемых панелей при измененном армировании в среднем увеличилась на 15,5 %, что дает значительное увеличение показателя начальной надежности по прочности ( $H_1 > 0,9986$ ) [12]. Также показатель начальной надежности по жесткости для всех рассмотренных плит стал выше нормативного уровня ( $H_2 > 0,90$ ) [12]. Результаты изменения армирования при оптимизации многопустотных панелей представлены в табл. 3 [12]. За счет повышения класса расход преднатяженной арматуры в многопустотных типовых панелях перекрытия в среднем снижается на 18,5 % (табл. 3).

Таким образом, проблема оптимизации многопустотных панелей является актуальной как с точки зрения экономии ресурсов, так и для повышения в целом надежности этих конструкций [12].

**Оптимизация армирования предварительно напряженных балок покрытия с совмещенным армированием**

Анализ результатов оптимизации балок с совмещенным армированием выполнялся на трех видах типовых балок серии 1.462.1-1/88. Балки пролетом 12 м имеют двутавровое сечение высотой 890 мм.

Основная задача оптимизации исследуемых балок заключалась в выборе оптимального баланса напрягаемой и ненапрягаемой

арматуры, расположенной в нижнем поясе. При этом для всех типовых выбранных балок трех марок были рассмотрены разные варианты их армирования (модели I, II, III) в зависимости от коэффициента частичного преднатяжения арматуры  $K_p$ , учитывающего долю напрягаемой арматуры в составе всей рабочей арматуры балки. Основная зависимость для определения коэффициента  $K_p$  при совмещенной арматуре одного класса имеет вид [25–28]:

$$K_p = \frac{A_{sp}}{\sum A_s} \quad (5)$$

Каждый тип трех основных исследуемых балок совместно с моделями их армирования (моделируемые балки) включен в экспериментальные серии I–III, которые представлены в табл. 4 [25–27]. Геометрические параметры и схемы армирования моделируемых балок, величины нагрузок принимаются такими же, как для основных балок. При этом необходимо учитывать, что количество напрягаемой и ненапрягаемой арматуры моделируемых балок должно приниматься из расчета обеспечения их прочности по нормальному сечению равной прочности основных балок из данной экспериментальной серии [25–27].

В табл. 5 приведены схемы армирования основных и моделируемых балок в зависимости от коэффициента  $K_p$  для соответствующих экспериментальных серий I–III.

**Таблица 3.** Показатели армирования многопустотных панелей перекрытий по проекту и после их оптимизации

**Table3.** Reinforcement indicators of multi-cavity floor panels according to the project and after their optimization

Марка исследуемых панелей	Количество, диаметр и класс напрягаемой арматуры		Снижение расхода напрягаемой арматуры, %
	по проекту	при оптимизации	
ПК48-15-8А-IVт	4Ø12 A600	(2Ø10+2Ø12) At800	15,3
ПК60-15-8А-IVт	(4Ø14+1Ø12) A600	(4Ø12+1Ø14) At800	16,9
ПК63-15-8А-IVт	(4Ø14+2Ø12) A600	6Ø12 At800	19,4
ПК48-12-8А-IVт	(1Ø12+3Ø10) A600	4Ø10 At800	10,0
ПК60-15-6А-IVт	(1Ø14+4Ø12) A600	(4Ø10+2Ø12) At800	10,9
ПК63-12-8А-IVт	6Ø12 A600	(4Ø10+2Ø12) At800	20,5

**Таблица 4.** Параметры рабочей арматуры основных (типовых) и моделируемых балок

**Table4.** Parameters of the working fittings of the main (standard) and simulated beams

Экспериментальные серии исследуемых балок	Марка основной балки и моделей ее армирования	Коэффициент частичного преднапряжения арматуры $K_p$	Количество, диаметр и класс арматурных стержней		Класс бетона
			напрягаемая арматура	ненапрягаемая арматура	
Серия I	2БСП12-5АтVIк-н	0,75	6Ø18 At1000	2Ø18 At1000	B40
	Модель I	1,00	8Ø18 At1000	—	
	Модель II	0,50	4Ø18 At1000	4Ø18 At1000	
	Модель III	0,00	—	8Ø18 At1000	
Серия II	2БСП12-6АтVIк-н	0,78	7Ø18 At1000	2Ø18 At1000	B40
	Модель I	1,00	9Ø18 At1000	—	
	Модель II	0,55	5Ø18 At1000	4Ø18 At1000	
	Модель III	0,22	2Ø18 At1000	7Ø18 At1000	
Серия III	2БСП12-4AIIlb	0,83	5Ø22 A500	1Ø22 A500	B35
	Модель I	1,00	6Ø22 A500	—	
	Модель II	0,50	3Ø22 A500	3Ø22 A500	
	Модель III	0,33	2Ø22 A500	4Ø22 A500	

Как показывают выполненные исследования по оценке НДС ЖБК с совмещенным армированием для предварительных расчетов целесообразно использовать методы расчета на основе СНиП [1, 2, 11, 14].

Для более глубокого анализа таких ЖБК, как плиты и балки со сложным напряженным состоянием, в частности с совмещенным армированием, рекомендуется применять альтернативную модель (НДМ), базирующуюся на реальных диаграммах состояния конструкционных материалов [14, 16, 17, 25–30].

Следует отметить, что расчет по НДМ позволяет более точно оценить фактическое НДС изгибаемых железобетонных балок с частично напрягаемой арматурой, чем расчет по нормативной модели [2, 4, 11–28].

Об этом свидетельствуют сопоставления результатов натурных испытаний типовых балок согласно ГОСТ 8829-94 и вероятностных расчетов по выбранным расчетным моделям [2, 4, 11–15, 25–27].

Оптимизация армирования конструкций выполнялась на основе компьютерного моделирования по разработанным программам на вероятностной основе как прикладных методов теории надежности [11, 14, 25–27].

Актуальными задачами, которые целесообразно решить для дальнейших исследований при оптимизации балок с совмещенным армированием являются [14, 25–28]:

- моделирование влияния коэффициента  $K_p$  на НДС исследуемых балок (жесткость, трещиностойкость);

- определение величины предварительного напряжения арматуры  $\sigma_{sp}$  в зависимости от показателей надежности  $H_2, H_3$ ;
- установление оптимальных классов совмещенного армирования.

Анализ результатов численного моделирования с помощью разработанного программного комплекса (табл. 6) по оценке надежности исследуемых конструкций дает возможность оценить влияние коэффициента  $K_p$  на показатели второй группы предельных состояний [25–28].

В табл. 6 представлены результаты анализа контрольных и расчетных значений прогиба и раскрытия нормальных трещин исследуемых балок в зависимости от коэффициента  $K_p$ . Оценка эксплуатационной пригодности изгибаемых ЖБК с частично напрягаемой рабочей арматурой под заданную проектную нагрузку должна выполняться из условия обеспечения надежности по второй группе предельных состояний при соответствующем значении коэффициента  $K_p$  [27].

**Таблица 5.** Схемы армирования типовых и моделируемых балок экспериментальных серий I–III  
**Table 5.** Reinforcement schemes for typical and simulated beams of experimental series I–III

Эксперимен- тальные серии исследуемых балок	Марка типовой балки	Моделируемые балки		
		Модель I	Модель II	Модель III
Серия I	2БСП12-5АтVlc-n			
Серия II	2БСП12-6АтVlc-n			
Серия III	2БСП12-4AIIlb			
Условные обозначения: - напрягаемая арматура; - ненапрягаемая арматура				

При этом следует отметить, что изгибающие ЖБК с большим содержанием ненапрягаемой арматуры ( $K_p \leq 0,5$ ) становятся неэффективными с точки зрения пониженной деформативности и трещиностойкости, которые

по характеру своей работы приближаются к непреднапряженным конструкциям [27].

Таким образом, их нецелесообразно использовать в конструкциях со смешанным армированием. Об их низкой неэффективности свидетельствуют результаты оценки показате-

лей начальной надежности  $H_2, H_3$  (табл. 7), полученные на основании вероятностных алгоритмов с использованием разных расчетных моделей (СНиП и НДМ) [27].

Анализ результатов численного моделирования влияния  $K_p$  на показатели жесткости, трещиностойкости и надежности по второй группе предельных состояний (табл. 6, 7) показал, что наиболее эффективными конструкциями с совмещенным армированием являются балки со средним оптимальным содержанием  $K_p \approx 0,67$  [27].

Для выбранных типовых балок (серия 1.462.1-1/88) этот коэффициент  $K_p$  находится в диапазоне от 0,75 до 0,83. Показатель начальной надежности по прочности получается вы-

соким при использовании вероятностных методов по каждой расчетной модели  $H_1 > 0,9986$  (табл. 7). Вероятностный расчет на основе НДМ из-за полного учета пластических свойств конструкционных материалов дает возможность выявить скрытые резервы снижения материаломкости исследуемых конструкции и перейти к вероятностно-оптимизационному их анализу [14, 25–28]. Также на основании результатов численного моделирования для исследуемых балок можно подобрать величину оптимального значения контролируемого пред напряжения арматуры  $\sigma_{sp}$  исходя из требований жесткости, трещиностойкости и обеспечения их надежности по второй группе предельных состояний [14, 25–28].

**Таблица 6.** Контрольные и расчетные значения прогибов и раскрытия нормальных трещин исследуемых балок экспериментальных серий I–III

**Table 6.** Control and calculated values of deflections and opening of normal cracks of the studied beams of experimental series I–III

Экспериментальные серии исследуемых балок	Марка основных и моделируемых балок	$K_p$	Прогиб		Ширина раскрытия трещин	
			$f_{кон},$ мм	$f$ , мм	$a_{кон},$ мм	$a$ , мм
Серия I	2БСП12-5АтVІк-н	0,75	38	23,20	0,2	0,038
	Модель I	1,00		20,22		0
	Модель II	0,50		36,54		0,284
	Модель III	0,00		65,20		0,888
Серия II	2БСП12-6АтVІк-н	0,78	40	27,20	0,2	0,080
	Модель I	1,00		23,20		0
	Модель II	0,55		42,39		0,323
	Модель III	0,22		83,10		0,661
Серия III	2БСП12-4AIIІв	0,83	36	34,70	0,2	0,065
	Модель I	1,00		30,67		0
	Модель II	0,50		53,60		0,320
	Модель III	0,33		79,90		0,817

Использование реальных диаграмм состояния бетона и арматуры при расчете по НДМ дает возможность подобрать оптимальный класс ненапрягаемой арматуры в зависимости от напрягаемой [14, 25–28].

С точки зрения экономичности целесообразно в качестве ненапрягаемой арматуры использовать арматуру класса А400, которая к моменту разрушения достигает предела текучести [14, 25–27].

При использовании высокопрочной арматуры в качестве ненапрягаемой напряжение в ней к моменту разрушения конструкции составляет 60–70 % от предела прочности [14, 25–27], т. е. ее прочностные возможности до конца не реализуются. Актуальное практическое зна-

чение по повышению эксплуатационной пригодности, безопасности и долговечности ЖБК заводского изготовления имеет установление функциональной зависимости их надежности от различных производственных факторов, с помощью которой можно управлять технологическими процессами по изготовлению конструкций и обеспечивать выпуск продукции с заданным уровнем надежности [1–5, 12–15, 25–28]. При этом важную роль для обеспечения надежности, безопасности и долговечности строительных конструкций играют вопросы, связанные с их оптимизацией на стадии проектирования и изготовления для снижения материаломкости и повышения экономической эффективности [1, 2, 4, 7, 8, 25].

**Таблица 7.** Влияние коэффициента  $K_p$  на показатели начальной надежности исследуемых балок экспериментальной серии I, полученные по разным вероятностным моделям  
**Table7.** The influence of the coefficient  $K_p$  on the initial reliability indicators of the studied beams of the experimental series I, obtained using different probabilistic models

Марка типовой балки и моделей ее армирования для экспериментальной серии I	Показатели начальной надежности					
	Вероятностный расчет на основе СНиП			Вероятностный расчет на основе НДМ		
	по прочности $H_1$	по жесткости $H_2$	по трещиностойкости $H_3$	по прочности $H_1$	по жесткости $H_2$	по трещиностойкости $H_3$
2БСП12-5АТVIк-н ( $K_p=0,75$ ) (типовая)	0,9999	0,9989	0,9988	0,9999	0,9987	0,9986
Модель I ( $K_p=1,00$ )	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
Модель II ( $K_p=0,50$ )	0,9999	0,8908	0,9051	0,9999	0,9166	0,8965
Модель III ( $K_p=0,00$ ) (непреднапряженная)	0,9999	0,7223	0,8263	0,9999	0,7088	0,7125

Примечание: нормативные уровни начальной надежности для основных несущих конструкций: по прочности  $[H_1] = 0,9986$ , по жесткости и трещиностойкости  $[H_2] = [H_3] = 0,90$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа выполненных исследований с использованием прикладных методов теории надежности рассмотренных многопустотных панелей перекрытий и предварительно напряженных балок с совмещенным армированием были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что для решения задач по оптимизации сборных ЖБК на вероятностной основе необходимым является условие существенного превышения их расчетного показателя надежности над нормативным уровнем.

2. Разработана для применения на комбинате «Братскжелезобетон» экспериментальная серия облегченных многопустотных панелей перекрытий уменьшенной толщины ( $h = 160$  мм) для малоэтажного строительства на основании типовой серии 1.141-1. Расчеты для обеспечения точности и достоверности полученных результатов проводились по разным расчетным моделям и на вероятностной основе. Стоимость одной облегченной панели снизилась в среднем на 15,2 % по сравнению со стоимостью типовых конструкций.

3. Рекомендована, в качестве другого направления оптимизации типовых многопустотных панелей перекрытий серии 1.141-1 в виду недостаточной начальной надежности некоторых из них, замена напрягаемой арматуры одного класса А600 на более высокопрочную Ат800 с повышением уровня ее натяжения.

В результате показатели надежности по прочности и жесткости  $H_1$  и  $H_2$  существенно

увеличились и превысили нормативные уровни. За счет изменения класса напрягаемой арматуры ее расход в панелях в среднем снизился на 18,5 %, что позволяет достичь как экономии ресурсов, так и повышения надежности конструкций.

4. Установлен диапазон оптимальных значений коэффициента частичного преднапряжения  $K_p$  для железобетонных балок с совмещенным армированием из условия обеспечения их надежности по второй группе предельных состояний:  $K_p = 0,65 \dots 0,75$ . Конструкции с более низким содержанием напрягаемой арматуры ( $K_p < 0,5$ ) являются малоэффективными по своей повышенной деформативности и по характеру работы приближаются к непреднапряженным конструкциям.

5. Доказано, что для более точного определения оптимальных конструктивных параметров совмещенного армирования железобетонных балок (коэффициента  $K_p$ , уровня преднапряжения  $\sigma_{sp}$ , рационального выбора класса и схемы совмещенного армирования) рекомендуется выполнить вероятностную оценку их предельных состояний с учетом физической нелинейности конструкционных материалов. На основании результатов моделирования по разработанному программному комплексу, используя показатели начальной надежности, можно с достаточной степенью достоверности выявить скрытые резервы снижения материальноемкости ЖБК заводского изготовления и перейти к вероятностно-оптимизационному их анализу.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Райзэр В.Д. Теория надежности сооружений: научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2010. 383 с.
2. Тамразян А.Г., Дудина И.В. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления // Жилищное строительство. 2001. № 3. С. 8–10. EDN: UIZQDH.
3. Spaethe G. Die Sicherheitstragender Baukonstruktionen. Wien: Springer Vienna. 1992. 303 р.
4. Kaverzina L., Kovalenko G., Dudina I., Belskii O. Cost Efficiency Assessment of Automated Quality Control of Precast Structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 143. P. 1–7. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814304006>.
5. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18. EDN: MGOLLW.
6. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary Optimization of Reinforced Concrete Beams, Taking Into Account Design Reliability, Safety and Risks During The Emergency Loss Of Supports // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704005>.
7. Тамразян А.Г., Алексеев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12–30. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.1.12-30>. EDN: WVLCDG.
8. Квасников А.А., Сумароков Е.В. Оптимизация армирования железобетонных конструкций зданий и сооружений при автоматизации процессов проектирования // Вестник НИЦ «Строительство». 2023. № 2. С. 136–150. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-136-150](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-136-150). EDN: YDILFM.
9. Seify Asghshahr M. Reliability Based Design Optimization of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithm // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. Vol. 65. Iss. 2. P. 566–576. <https://doi.org/10.3311/PPci.17150>.
10. Rubaratuka I.A. Challenges of the Quality of Reinforced Concrete Buildings in Dar es Salaam // International Journal of Engineering Research & Technology. 2013. Vol. 2. Iss. 12. P. 820–827. <https://doi.org/10.17577/IJERTV2IS120282>.
11. Коваленко Г.В., Дудина И.В., Жердева С.А. Практические методы оценки надежности сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления. Монография. Братск: Изд-во Братского государственного университета, 2013. 123 с. EDN: UYKMQR.
12. Дудина И.В., Назарова Н.О. Повышение экономической эффективности конструкций заводского изготовления при оптимизации // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития. Материалы пятой Междунар. науч.-практ. онлайн-конф. (г. Томск, 12–13 апреля 2018 г.). Томск, 2018. С. 154–159. EDN: YQYNSh.
13. Коваленко Г.В., Дудина И.В., Нестер Е.В. Вероятностный подход к контролю качества и оценке начальной надежности сборных железобетонных конструкций // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 2. С. 274–283. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-274-283>. EDN: WPEWVM.
14. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nester E.V. Chance Models and Estimators of Primary Reliability of Constructions with Mixed Reinforcement // European Science and Technology: Materials of the International Research and Practice Conference (Wiesbaden, 31<sup>st</sup>January, 2012). Wiesbaden, 2012. P. 237–243.
15. Коваленко Г.В., Дудина И.В., Назарова Н.О. Оптимизация железобетонных конструкций заводского изготовления на вероятностной основе как фактор снижения их материалоемкости // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. 2018. Т. 1. С. 156–160. EDN: YURQNV.
16. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат. 1996. 416 с.
17. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М.: Стройиздат. 1982. 287 с.
18. Jian-Ping Lin, Guannan Wang, Rongqiao Xu Particle Swarm Optimization-Based Finite-Element Analyses and Designs of Shear Connector Distributions for Partial-Interaction Composite Beams // Journal of Bridge Engineering. 2019. Vol. 24. Iss. 4. P. 1–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001371](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371).
19. El Abdelouafi G., Benissa K., Abdellatif K. Reliability Analysis of Reinforced Concrete Buildings: Comparison between FORM and ISM // Procedia Engineering. 2015. Vol. 114. P. 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.006>.
20. Youbao Jiang, Suixiang Peng, Beer M., Lei Wang, Jianren Zhang Reliability Evaluation of Reinforced Concrete Columns Designed By Eurocode for Wind-Dominated Combination Considering Random Loads Eccentricity // Advances in Structural Engineering. 2019. Vol. 23. Iss. 1. P. 146–159. <https://doi.org/10.1177/1369433219866089>.
21. Szep J., Habashneh M., Logo J., Rad M.M. Reliability Assessment of Reinforced Concrete Beams under Elevated Temperatures: A Probabilistic Approach Using Finite Element and Physical Models // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 7. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/su15076077>.

22. Qiang Zhang, Yan-Gang Zhao, Kristijan Kolozvari, Lei Xu Reliability Analysis of Reinforced Concrete Structure Against Progressive Collapse // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 228. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108831>.
23. Voss J. An Introduction to Statistical Computing: A Simulation-Based Approach. Chichester: Wiley, 2013. 396 p.
24. Ditlevsen O. Stochastic Model of Self-Weight Load // Journal of Structural Engineering. 1988. Vol. 114. Iss. 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:1\(222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:1(222)).
25. Коваленко Г.В., Меньщикова Н.С. Анализ результатов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок со смешанным армированием и оценка их надежности на основе нелинейно-деформационной модели // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 4. С. 93–96. EDN: KWWDBV.
26. Тамразян А.Г., Дудина И.В. Учет нелинейных свойств материалов при расчете конструкций со смешанным армированием // Бетон и железобетон. 2003. № 2. С. 11–12.
27. Дудина И.В., Рамазанова Г.А., Нестер Е.В. Влияние некоторых конструктивных параметров совмещенного армирования железобетонных балок при оценке их предельных состояний // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2. С. 139–145. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-139-145>. EDN: XYMYZN.
28. Байрамуков С.Х., Долаева З.Н. Оценка прочности и деформативности частично предварительно напряженных элементов по деформационной модели // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. С. 1–12. EDN: YATGLR.
29. Залесов А.С., Чистяков Е.А., Ларичева И.Ю. Деформационная расчетная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил // Бетон и железобетон. 1996. № 5. С. 16–18.
30. Плевков В.С., Балдин И.В., Балдин С.В., Ласковенко А.Г., Ласковенко Г.А. Прочность и трещиностойкость железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Международная научная конференция, посвященная 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова (г. Москва, 19–20 апреля 2016 г.). М., 2016. С. 323–328. EDN: TSXRHW.

## REFERENCES

1. Raizer V.D. *Theory of Reliability of Structures: Scientific Publication*. Moscow: ASV Publishing House, 2010. 383 p. (In Russ.).
2. Tamrazyan A.G., Dudina I.V. Ensuring the Quality of Precast Concrete Structures at the Manufacturing Stage. *Housing Construction*. 2001. № 3. С. 8–10. (In Russ.). EDN: UIZQDH.
3. Spaethe G. *Die Sicherheittragender Baukonstruktionen*. Wien: Springer Vienna. 1992. 303 p.
4. Kaverzina L., Kovalenko G., Dudina I., Belskii O. Cost Efficiency Assessment of Automated Quality Control of Precast Structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018;143:1-7. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814304006>.
5. Tamrazian A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;1(1):5-18. (In Russ.). EDN: MGOLLW.
6. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary Optimization of Reinforced Concrete Beams, Taking Into Account Design Reliability, Safety and Risks During The Emergency Loss Of Supports. *E3S Web of Conferences*. 2019;97:1-8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704005>.
7. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Review of Modern Optimization Methods for Bearing Systems of Buildings and Structures. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2020;15(1):12-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.1.12-30>. EDN: WVLCDG.
8. Kvasnikov A.A., Sumarokov E.V. Optimizing the Reinforcement of Buildings and Structures in Automatic Design Processes. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2023;2:136-150. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-136-150](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-136-150). EDN: YDILFM.
9. Seify Asghshahr M. Reliability Based Design Optimization of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithm. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021;65(2):566-576. <https://doi.org/10.3311/PPci.17150>.
10. Rubaratuka I.A. Challenges of the Quality of Reinforced Concrete Buildings in Dar es Salaam. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013;2(12):820-827. <https://doi.org/10.17577/IJERTV2IS120282>.
11. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Zherdeva S.A. *Practical Methods for Assessing the Reliability of Precast Concrete Structures at the Manufacturing Stage*. Monograph. Bratsk: Bratsk State University Press, 2013. 123 p. (In Russ.). EDN: UYKMQR.

12. Dudina I.V., Nazarova N.O. Increase in Economic Efficiency of Designs of Factory Production by Their Optimization. In: Problemy ekonomiki i upravleniya stroitel'stvom v usloviyakh ekologicheski orientirovannogo razvitiya. Materialy pyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi onlain-konferentsii = *Problems of Construction Economics and Management in the Context of Environmentally-Oriented Development. Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Online Conference*. 12–13 April 2018, Tomsk. Tomsk; 2018. P. 154–159. (In Russ.). EDN: YQYNSH.
13. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nester E.V. A Probabilistic Approach to Quality Control and Assessing Initial Reliability Precast Reinforced Constructions. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):274–283. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-274-283>. EDN: WPEWVM.
14. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nester E.V. Chance Models and Estimators of Primary Reliability of Constructions with Mixed Reinforcement. In: *European Science and Technology: Materials of the International Research and Practice Conference*. 31<sup>st</sup>January 2012, Wiesbaden. Wiesbaden; 2012. P. 237–243.
15. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nazarova N.O. Optimization of Prefabricated Reinforced Concrete Structures on a Probabilistic Basis as a Factor in Reducing Their Material Consumption. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i inzhenernye nauki*. 2018;1:156–160. (In Russ.). EDN: YURQNV.
16. Karpenko N.I. *General Models of Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow: Stroyizdat. 1996. 416 p. (In Russ.).
17. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering Methods of Nonlinear Theory of Reinforced Concrete*. Moscow: Stroyizdat. 1982. 287 p. (In Russ.).
18. Jian-Ping Lin, Guannan Wang, Rongqiao Xu Particle Swarm Optimization-Based Finite-Element Analyses and Designs of Shear Connector Distributions for Partial-Interaction Composite Beams. *Journal of Bridge Engineering*. 2019;24(4):1-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001371](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371).
19. El Abdelouafi G., Benissa K., Abdellatif K. Reliability Analysis of Reinforced Concrete Buildings: Comparison between FORM and ISM. *Procedia Engineering*. 2015;114:650–657. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.006>.
20. Youbao Jiang, Suixiang Peng, Beer M., Lei Wang, Jianren Zhang Reliability Evaluation of Reinforced Concrete Columns Designed By Eurocode for Wind-Dominated Combination Considering Random Loads Eccentricity. *Advances in Structural Engineering*. 2019;23(1):146–159. <https://doi.org/10.1177/1369433219866089>.
21. Szep J., Habashneh M., Logo J., Rad M.M. Reliability Assessment of Reinforced Concrete Beams under Elevated Temperatures: A Probabilistic Approach Using Finite Element and Physical Models. *Sustainability*. 2023;15(7):1-20. <https://doi.org/10.3390/su15076077>.
22. Qiang Zhang, Yan-Gang Zhao, Kristijan Kolozvari, Lei Xu Reliability Analysis of Reinforced Concrete Structure Against Progressive Collapse. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022;228:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108831>.
23. Voss J. *An Introduction to Statistical Computing: A Simulation-Based Approach*. Chichester: Wiley, 2013. 396 p.
24. Ditlevsen O. Stochastic Model of Self-Weight Load. *Journal of Structural Engineering*. 1988;114(1):1-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:1\(222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:1(222)).
25. Kovalenko G.V., Menshchikova N.S. Analysis of The Results of Computer Modeling of The Stress-Strain State of Reinforced Concrete Beams with Mixed Reinforcement and Assessment of Their Reliability Based on A Nonlinear Deformation Model. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2009;4:93–96. (In Russ.). EDN: KWWDBV.
26. Tamrazyan A.G., Dudina I.V. Taking into Account Nonlinear Properties of Materials When Calculating Structures with Mixed Reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2003;2:11–12. (In Russ.).
27. Dudina I.V., Ramazanova G.A., Nester E.V. Influence of Some Design Parameters of the Combined Reinforcement of Concrete Beams in Assessing Their Limit States. *Systems. Methods. Technologies*. 2018;2:139–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-139-145>. EDN: XYMYZN.
28. Bayramukov S.H., Dolaeva Z.N. Evaluation of the Strength and Deformation of Partially Prestressed Elements by the Deformation Model. *Engineering Journal of Don*. 2018;2:1-12. (In Russ.). EDN: YATGLR.
29. Zalesov A.S., Chistyakov E.A., Laricheva I.Yu. Deformation Calculation Model of Reinforced Concrete Elements under the Action of Bending Moments and Longitudinal Forces. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1996;5:16–18. (In Russ.).
30. Plevkov V.S., Baldin I.V., Baldin S.V., Laskovenko A.G., Laskovenko G.A. Strength and Crack Resistance of Reinforced Concrete Elements under the Combined Action of Bending Moments, Longitudinal and Transverse Forces. In: Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstruktii, zdani i sooruzhenii na avariiye vozdeistviya. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennaya 85-letiyu kafedry zhelezobetonnykh i kamennykh konstruktii i 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Popova = *Current Problems of Calculating Reinforced Concrete Structures, Buildings, and Facilities for Accident Impacts*.

## Информация об авторах

**Дудина Ирина Васильевна,**  
к.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой строительных  
конструкций и технологии строительства,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,  
✉ e-mail: dydina\_irina@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6047-4839>  
Author ID: 315594

**Камчаткина Варвара Михайловна,**  
к.пед.н., доцент кафедры строительных  
конструкций и технологии строительства,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,  
Россия,  
e-mail: varvara@kamchatkina.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2687-3603>  
Author ID: 651157

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в  
подготовку публикации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.

## Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.09.2025.  
Одобрена после рецензирования 12.10.2025.  
Принята к публикации 21.10.2025.

## Information about the authors

**Irina V. Dudina,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Building Structures  
and Construction Technology,  
Bratsk State University,  
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,  
✉ e-mail: dydina\_irina@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6047-4839>  
Author ID: 315594

**Varvara M. Kamchatkina,**  
Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor  
of Departments of Building structures  
and construction technologies,  
Bratsk State University,  
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,  
e-mail: varvara@kamchatkina.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2687-3603>  
Author ID: 651157

## Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests  
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved  
by all the co-authors.

## Information about the article

The article was submitted 05.09.2025.  
Approved after reviewing 12.10.2025.  
Accepted for publication 21.10.2025.