УДК 69.059.4:624.012.45
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-47-59

© *А. Н. Никулин*, канд. техн. наук, доцент
© *О. А. Яцковец*, студент
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: anikulin@lan.spbgasu.ru, yaczkovecz@bk.ru

© *A. N. Nikulin*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© *O. A. Yatskovets*, student
(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: anikulin@lan.spbgasu.ru, yaczkovecz@bk.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫМ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКОННОЙ ПЛИТЫ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ В УСЛОВИЯХ ЦЗО, С УЧЕТОМ СНИЖЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

DETERMINATION OF STRENGTHEN PARAMETERS OF A REINFORCED CONCRETE BALCONY SLAB USING HIGH-PERFORMANCE STEEL FIBER CONCRETE UNDER FREEZE-THAW EXPOSURE WITH CONSIDERATION OF TIME-DEPEND DEGRADATION

На сегодняшний день перспективным направлением развития методик расчета строительных конструкций является внедрение риск-ориентированного проектирования, при котором все параметры конструкции рассматриваются как случайные величины. В данной работе рассмотрен расчет деградации изгибаемой железобетонной плиты в условиях циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) с применением вероятностно-ориентированного подхода и расчет ее усиления с помощью высокопрочного сталефибробетона по инженерной методике. Была выявлена перспективность использования высокопрочного сталефибробетона в усилении изгибаемых железобетонных элементов.

Ключевые слова: вероятностные методы расчета, надежность строительных конструкций, усиление сталефибробетоном, железобетонные конструкции, изгиб, циклы замораживания и оттаивания.

To date, a promising direction in the development of methods for calculating building structures is the introduction of risk-based design, in which all design parameters of the structure are considered as random variables. In this paper, we consider the calculation of the degradation of a bent reinforced concrete slab under conditions of freezing and thawing cycles using a probability-based approach and the calculation of its reinforcement using high-strength steel-fiber concrete according to the engineering calculation method. The prospects of using high-strength steel-fiber concrete in strengthening bent reinforced concrete elements were revealed.

Keywords: probabilistic calculation methods, reliability of building structures, steel fiber reinforced concrete strengthening, reinforced concrete structures, flexural behavior, freeze-thaw cycles.

Введение

В современных российских нормах проектирования строительных конструкций применяется детерминированный подход, основные положения которого определены в ГОСТ 27751[1]: возможные случайные отклонения различных параметров (условия окружающей среды, значения нагрузок, прочностных и деформационных характеристик, последствия разрушения и т. д.) учитываются через коэффициенты надежности γ. Это приводит к тому, что надежность зданий и сооружений не определяется напрямую, а закладывается в сам расчет через множество различных γ в зависимости от назначения объекта, его ответственности, срока эксплуатации и т. д. При этом проводятся

[1] ГОСТ 27751. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115736?ysclid=mkieeky8k5372064783

разработки более совершенных детерминированных подходов [1–2]. Таким образом, на данный момент безопасность — это свойство конструкции, но не управляемый во времени параметр. Однако существуют вероятностные методы расчета с прямой оценкой надежности (риск-ориентированное проектирование). Одним из международных документов, регламентирующих подобную методику расчета, является ISO 2394[2]. Он предлагает при расчете по предельным состояниям основываться не на нормативных значениях с коэффициентами запаса, а рассматривать характеристики системы как случайные величины. Это дает возможность напрямую учитывать изменения свойств во времени и напрямую вводить уровни надежности конструкции в зависимости от класса последствий, а не через косвенные коэффициенты [3–5]. Это становится особенно актуальным при необходимости более точной оценки сроков эксплуатации зданий и назначении сроков проведения обследований конструкций в системе управления жизненным циклом объекта. В статьях [6–8] отмечалась необходимость дополнительных исследований в данной области и разработки соответствующих нормативных документов. Перспективность применения вероятностных методов расчета подтверждается наличием современных зарубежных исследований по данной теме [9–11]. В работе [12] было показано, что вероятностное моделирование деградации железобетонных конструкций позволяет корректно учитывать изменение свойств во времени и использовать результаты для обоснования сроков обследований и мероприятий по эксплуатации.

Методы

Цель работы — изучить возможность внедрения вероятностных методов расчета в проектирование строительных конструкций для учета жизненного цикла объекта строительства на примере изгибаемой консольной железобетонной плиты и проанализировать возможность усиления изгибаемых железобетонных элементов сталефибробетоном.

Методологию настоящей работы составляют методы теории вероятности, математической статистики и численное моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемой железобетонной консольной плиты во времени при помощи методов СП 63.13330[3] и вероятностных методов расчета строительных конструкций.

Исследование выполняется на примере консольной изгибаемой железобетонной плиты, подвергающейся в процессе эксплуатации циклам замораживания и оттаивания (ЦЗО) бетона и коррозии арматуры. Примерами таких элементов могут служить открытые балконные плиты жилых зданий, различные козырьки, элементы промышленных зданий и мостовых конструкций. Рассматривается плита размерами 3×2×0,15 м, расположенная в Санкт-Петербурге (рис. 1). Величина защитного слоя *a* была принята 30 мм, так как предполагается эксплуатация конструкции на открытом воздухе.

Вначале был выполнен классический подбор арматуры по методам предельных состояний с учетом коэффициентов запаса γ на 1 м плиты. Система рассматривалась как плоская консольно закрепленная балка шириной 1 м. Был выполнен сбор нагрузок, при котором учитывались постоянная нагрузка от веса самой железобетонной плиты, пирога пола (обмазочная цементно-полимерная гидроизоляция, армированная уклонообразующая стяжка, плитка с антискользящей поверхностью); кратковременные нагрузки в виде снеговой (для Санкт-Петербурга — III снеговой район) и кратковременной на-

[2] ISO 2394. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200142443?ysclid=mkiei1dzu4836753100

[3] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. URL: https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=mhu5ne05ax92510137

грузки по табл. 8.3 СП 20.13330[4] для балконов. Были применены соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке γ_f. По результатам расчета по несущей способности была подобрана рабочая арматура в нижней зоне диаметром 12 мм, шагом 160 мм (рис. 2). Вся остальная арматура принимается из конструктивных соображений, так как не учитывается в дальнейших расчетах. Также были выполнены расчеты на образование и раскрытие трещин. Ширина раскрытия трещины составила 0,277 мм при нормативном значении 0,3 мм из условия ограничения проницаемости конструкций при непродолжительном раскрытии трещин. Во всех дальнейших расчетах выполнялся расчет с принятым армированием.

Также исходными данными к расчету являлись 5000 значений прочности бетона В30 на сжатие R_b, 5000 значений прочности арматуры класса А400 на растяжение R_s и 5000 значений модуля упругости бетона E_b. Данные значения, принятые из [13], получены на основе результатов экспериментальных исследований при помощи метода Монте-Карло.

[4] СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. URL: https://docs.cntd.ru/document/456044318?ysclid=mkieldbzb5902916218

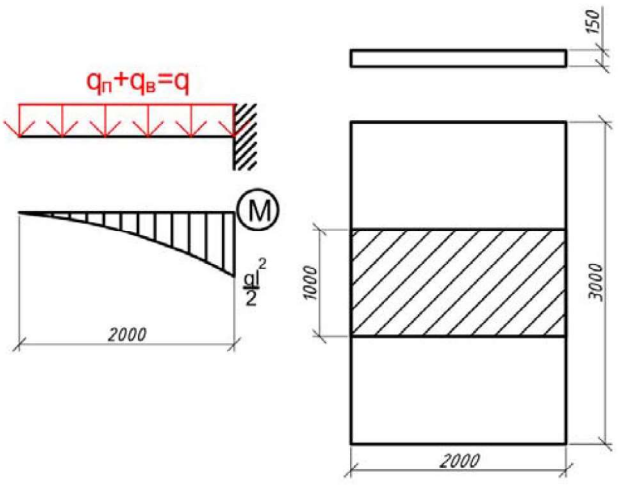


Рис. 1. Габариты рассматриваемой плиты и принятая расчетная схема

После первичного подбора армирования выполнялся расчет несущей способности (определялся индекс надежности β) и ширины раскрытия трещин по годам, начиная от момента введения в эксплуатацию (нулевой год). Рассмотрим типовой этап расчета на примере нулевого года.

Для каждой из 5000 комбинаций характеристик сечения классическим методом предельных усилий по СП 63 была рассчитана несущая способность элемента — см. ниже уравнения (1) и (2). При этом коэффициенты надежности в данном случае убираются, так как требуется получить действительные значения несущей способности при изгибе M_{ult} для дальнейшей статистической обработки. В этом случае пренебрегаем изменчивостью деформационных характеристик бетона и арматуры: в работах [14–15] было показано, что до и после ЦЗО при небольшом коэффициенте армирования (у рассматриваемой плиты μ_s = 0,57 %) это влияние невелико для изгибаемого элемента, и им можно пренебречь.

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b}; \quad (1)$$

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}), \quad (2)$$

где x — рабочая высота сжатой зоны бетона; b — ширина сечения (b = 1 м); h_0 — рабочая высота сечения.

Согласно ISO 2394 критерием надежности конструкции при вероятностном расчете является индекс надежности β. В самом нормативном документе нет прямой формулы данного коэффициента, но ее можно вывести из законов математической статистики

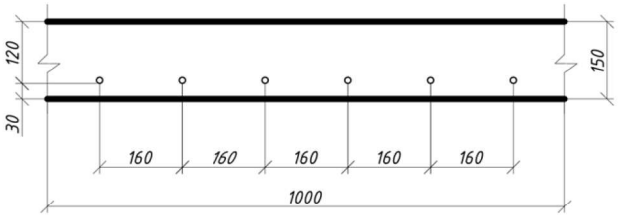


Рис. 2. Принятое армирование кусочка плиты шириной 1 м

и определений нормативного документа. Дальнейшее доказательство будет ссылаться на ГОСТ Р ИСО 2394. Согласно п. 3.1 приложения Е предполагается, что критериями отказа строительной конструкции управляет функция $g(\underline{X})$ базовых переменных $\underline{X}$ таким образом: $g(\underline{X}) > 0$ для желательного состояния (отказы отсутствуют); $g(\underline{X}) = 0$ для предельного состояния; $g(\underline{X}) < 0$ для нежелательного состояния (область отказов). При этом согласно п. 9.1 вероятность отказа задается формулой

$$p_f = p[g(\underline{X}) < 0]. \quad (3)$$

По п. 3.2.21 индекс надежности β определяется как показатель вероятности отказа p_f:

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f), \quad (4)$$

где Φ^{-1} — инверсия стандартного нормального распределения.

Согласно п. Е.7.1

$$g(\underline{X}) = R - S \geq 0, \quad (5)$$

где S — нагрузочный коэффициент (приложенная нагрузка); R — соответствующее сопротивление (несущая способность); R и S — независимые случайные величины. Примем в данной работе их нормальными, тогда $g(\underline{X})$ имеет также нормальное распределение, параметры которого определяются по формулам (6) и (7), и поэтому вероятность отказа определяется по формуле (8).

$$\mu_g = \mu_R - \mu_S; \quad (6)$$

$$\sigma_g^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2, \quad (7)$$

где μ_g, μ_R, μ_S — средние значения g, R и S соответственно; σ_g, σ_R, σ_S — стандартные отклонения g, R и S соответственно.

$$p_f = P\{g \leq 0\} = P\left\{\frac{g-\mu_g}{\sigma_g} \leq -\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right\} =$$

$$= \Phi\left(-\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right). \quad (8)$$

Подставляя в (3) выражение (8), получим

$$\beta = -\Phi^{-1}\left(\Phi\left(-\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right)\right) = \frac{\mu_g}{\sigma_g}, \quad (9)$$

Подставив в (9) выражения (6) и (7), окончательно получим

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}. \quad (10)$$

При этом стандартные отклонения равны произведению средних значений на коэффициенты вариаций ν соответствующих величин:

$$\begin{cases} \sigma_R = \nu_R \cdot \mu_R \\ \sigma_S = \nu_S \cdot \mu_S \end{cases}. \quad (11)$$

Имея 5000 значений несущей способности (в данном случае M_{ult} эквивалентно R), можно рассчитать средние значения μ_R и стандартное отклонение σ_R. С нагрузкой все сложнее. В связи с отсутствием выборки данных по значениям нагрузки, ее коэффициенты вариации принимались отдельно для кратковременной нагрузки $\nu_{Sk} = 0{,}35$ [16], для постоянных нагрузок — $\nu_{Sc} = 0{,}1$ [17]. Постоянные нагрузки принимались как средние величины, а для кратковременных нагрузок характеристическое значение Q_{sk} принималось как нормативное значение нагрузки по СП 20.13330. Предполагая нормальное распределение кратковременной нагрузки, ее среднее значение определялось по формуле

$$\mu_{sk} = \frac{Q_{sk}}{1 + z_p \cdot \nu_{sk}}, \quad (12)$$

где z_p — квантиль, для 0,98 равен 2,054.

Общее значение средней нагрузки определялось как сумма средних значений ее составляющих. А так как нагрузки независимы, коэффициент вариации общей нагрузки определялся по формуле

$$\nu_S = \frac{\sqrt{(\nu_{Sk} \cdot \mu_{Sk})^2 + (\nu_{Sc} \cdot \mu_{Sc})^2}}{\mu_S}. \quad (13)$$

Таким образом получаются все данные для формулы (10). Целевой индекс надежности по ISO 2394 определяется согласно табл. Е.2 в зависимости от относительной стоимости мер безопасности и последствий отказа. В данной работе он был принят равным 3,1 (умеренная стоимость мер безопасности и умеренные последствия отказа).

Затем выполнялся расчет момента образования трещины и ширины раскрытия трещин по стандартной методике СП 63.

После нулевого года перед началом следующего производилось уменьшение прочности бетона на сжатие R_b и модуля упругости бетона E_b в связи с воздействием циклов замораживания и оттаивания. Была использована эмпирическая методика для бетона на обычном портландцементе, предложенная С. Н. Леоновичем [18], учитывающая снижение этих характеристик путем, указанным ниже в формулах (14) и (15), и уменьшением высоты сечения в зависимости от количества ЦЗО (потеря сечения образцов определялась по графикам, представленным в его статье) в связи с выключением из работы части бетона из-за воздействия ЦЗО, количество которого в год было принято $N = 7$. Для Санкт-Петербурга этого может быть недостаточно, однако выбранная методика распространяется на количество циклов не более 350.

$$\frac{R_{(n)}}{-R_{(0)}} = -1 \cdot 10^{-5} (N \cdot T)^2 + \\ +0,0012(N \cdot T) + 1,0143; \qquad (14)$$

$$\frac{E_{b(n)}}{-E_{b(0)}} = -9 \cdot 10^{-6} (N \cdot T)^2 + \\ +0,0016(N \cdot T) + 0,9774, \qquad (15)$$

где T — число лет, прошедшее после начала эксплуатации.

При этом при достижении ширины раскрытия трещины более чем 0,3 мм считаем, что нарушается условие ограничения проницаемости конструкции, что приводит к началу коррозии арматуры. Коррозию арматуры учитываем путем уменьшения ее диаметра по закону (16) каждый год после начала коррозии. Скорость развития коррозии в 0,0116 мм/год принята исходя из статьи [19]:

$$d_s = d_0 - 2 \cdot 0,0116 \cdot (N \cdot t), \qquad (16)$$

где t — число лет после начала коррозии.

Необходимо понимать, что использованный метод расчета не претендует на высокую точность полученных результатов. Целью исследования не является разработка методики, позволяющей рассчитывать с высокой точностью поведение железобетонных плит во времени с учетом процессов коррозии арматуры и влияния ЦЗО на бетон. Основная задача — показать перспективность внедрения вероятностных методов расчета в проектирование строительных конструкций.

Результаты

Вначале был выполнен расчет срока эксплуатации по действующим российским нормам. Он был просто назначен — 50 лет, нормальный уровень ответственности (γ_n = 1,0, ГОСТ 27751).

Затем был выполнен расчет по ISO 2394 индекса надежности и ширины раскрытия трещин в течение 50 лет эксплуатации. Результаты представлены в таблице.

Было определено, что значение ширины раскрытия трещины до 29-го года остается с небольшими колебаниями на уровне 0,3 мм, а затем происходит резкий скачок до 0,33 мм, и трещина раскрывается выше нормативных значений, доходя до значения 0,396 мм в 50-й год эксплуатации (рис. 3). Это связано с тем, что в заложенной зависимости прочности бетона на сжатие от количества ЦЗО высота сечения уменьшается, но при этом какое-то время прочность бетона растет. После начала коррозии арматуры ширина раскрытия трещины растет линейно, что соответствует заложенной линейной зависимости коррозии арматуры от времени.

Было установлено, что в 29-й год также происходит скачок снижения среднего значения несущей способности — с 3454,46 до 3117,02 кН · см (на 10 %) и индекса надежности — с 5,19 до 4,48 (на 14 %) (рис. 4, 5). После начала коррозии идет снижение индекса надежности, и после 45-го года он становится равным предельно допустимому значению в 3,1 (снизился на 40 % по сравнению с началом эксплуатации). При этом среднее значение несущей способности в 45-й год соста-

Результаты расчета по ISO 2394

№ года	Параметры несущей способности			Трещины	
	μ_g, кН · см	β	ν_g	Средние значения ширины раскрытия трещин, мм	Коэффициент вариации ширины раскрытия трещин
0	3480,20	5,22	0,0766	0,2979	0,00473
1	3477,95	5,21	0,0766	0,2983	0,00480
2	3473,19	5,20	0,0766	0,2990	0,00477
3	3468,26	5,19	0,0767	0,2997	0,00475
4	3463,18	5,18	0,0767	0,3003	0,00473
5	3457,94	5,17	0,0767	0,3010	0,00471
6	3452,55	5,16	0,0767	0,3016	0,00470
7	3447,00	5,15	0,0767	0,3022	0,00470
8	3441,31	5,14	0,0767	0,3028	0,00469
9	3477,95	5,21	0,0766	0,2983	0,00480
10	3429,49	5,11	0,0767	0,3040	0,00470
11	3423,36	5,10	0,0767	0,3046	0,00471
12	3487,25	5,23	0,0767	0,2986	0,00452
13	3486,67	5,23	0,0767	0,2986	0,00452
14	3485,93	5,22	0,0767	0,2986	0,00452
15	3485,03	5,22	0,0767	0,2986	0,00453
16	3483,96	5,22	0,0766	0,2986	0,00454
17	3482,72	5,22	0,0766	0,2985	0,00455
18	3481,31	5,22	0,0766	0,2985	0,00457
19	3479,71	5,22	0,0766	0,2984	0,00459
20	3477,90	5,21	0,0765	0,2983	0,00462
21	3475,89	5,21	0,0765	0,2982	0,00465
22	3473,66	5,21	0,0764	0,2981	0,00468
23	3471,18	5,21	0,0764	0,2980	0,00472
24	3468,45	5,20	0,0763	0,2978	0,00476
25	3465,44	5,20	0,0763	0,2977	0,00481
26	3462,12	5,20	0,0762	0,2975	0,00487
27	3458,48	5,19	0,0761	0,2973	0,00492
28	3454,46	5,19	0,0761	0,2971	0,00499
29	3117,02	4,48	0,0756	0,3267	0,00625
30	3089,47	4,42	0,0755	0,3293	0,00636
31	3061,61	4,36	0,0754	0,3319	0,00635
32	3033,39	4,30	0,0753	0,3345	0,00589
33	3004,75	4,23	0,0751	0,3375	0,00471
34	2975,62	4,17	0,0750	0,3411	0,00404
35	2945,91	4,10	0,0748	0,3448	0,00408
36	2915,53	4,03	0,0746	0,3486	0,00419
37	2884,34	3,96	0,0745	0,3523	0,00431
38	2852,19	3,88	0,0742	0,3561	0,00443
39	2818,88	3,80	0,0740	0,3598	0,00457
40	2784,17	3,72	0,0737	0,3636	0,00473
41	2747,73	3,63	0,0734	0,3673	0,00490
42	2709,13	3,53	0,0731	0,3709	0,00509

Окончание таблицы

№ года	Параметры несущей способности			Трещины	
	μ_g, кН · см	β	ν_g	Средние значения ширины раскрытия трещин, мм	Коэффициент вариации ширины раскрытия трещин
43	2667,82	3,42	0,0727	0,3746	0,00530
44	2623,02	3,31	0,0723	0,3781	0,00553
45	2573,65	3,18	0,0718	0,3816	0,00580
46	2518,12	3,02	0,0713	0,3849	0,00610
47	2454,06	2,84	0,0708	0,3882	0,00644
48	2377,70	2,62	0,0704	0,3912	0,00683
49	2282,72	2,32	0,0703	0,3939	0,00729
50	2157,57	1,91	0,0715	0,3963	0,00783

вило 2573 кН · см (снизилось на 26 % по сравнению с нулевым годом). После 45-го года индекс надежности снижается и становится меньше целевого индекса надежности, и в 50-й год становится равным 1,91. Это означает, что после 45-го года может произойти отказ рассматриваемой конструкции с вероятностью больше допустимой. За 50 лет индекс надежности уменьшился на 63 %, а среднее значение несущей способности — на 38 % (в 50-й год составило 2157,57 кН · см).

Обсуждение

Но что же будет с рассматриваемой плитой через 50 лет? Согласно ГОСТ 31937 первое обследование необходимо проводить через два года после ввода в эксплуатацию, а затем не реже раза в десять лет для обычных зданий и раза в пять лет для зданий и сооружений, а также их частей, работающих в неблагоприятных условиях, в том числе в условиях агрессивных сред. И это без учета необходимости плановых осмотров, которые

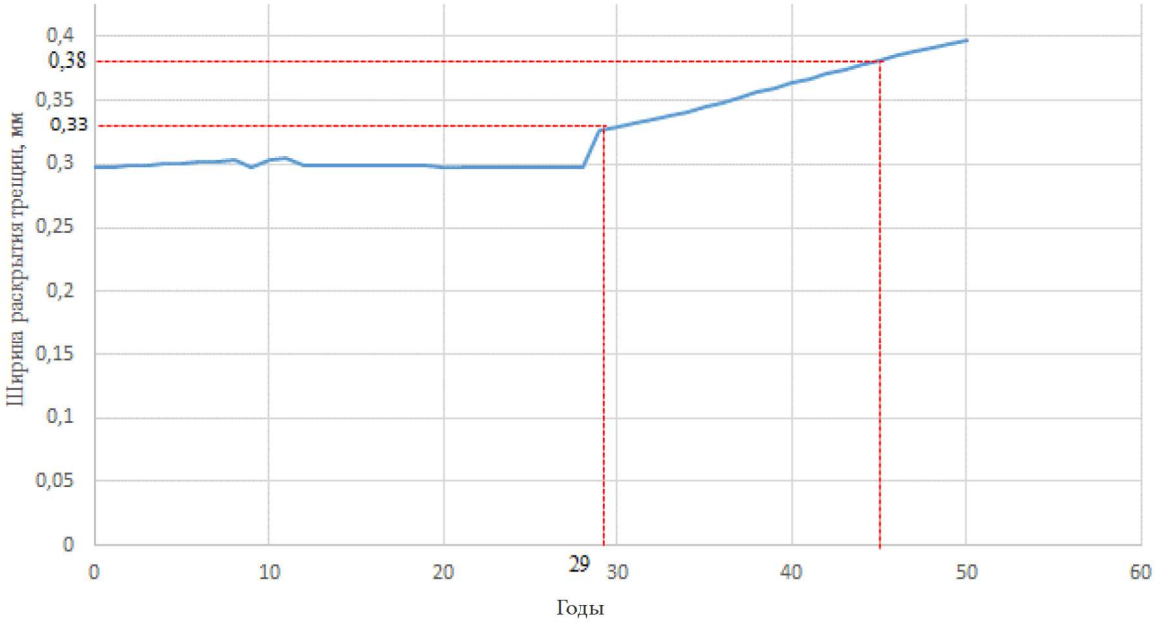


Рис. 3. Ширина раскрытия трещин

проводятся гораздо чаще. Однако зачастую обслуживающие компании проводят обследования только при наличии серьезных проблем, когда может быть уже поздно, а в рамках планового осмотра можно просто не заметить трещину в балконной плите, располагающуюся на высоте. Поэтому рассмотрим наихудший случай: плиту никак не ремонтировали в течение 50 лет. В этом случае при необходимости продолжения эксплуатации здания однозначно потребуется ее усиление. Одним из наиболее эффективных способов усиления изгибаемых железобетонных элементов по соотношению «цена–эффективность» является усиление сталефибробетоном [20] — именно он и будет применен в рамках данного исследования.

Одним из способов расчета усиления сталефибробетоном является применение нелинейной деформационной модели [21–22], но она довольно трудоемкая. В работах исследователей [23] отмечается, что при усилении сталефибробетоном обеспечивается совместность работы бетона и сталефибробетона при гидроструйной предварительной обработке поверхности. Исходя из этого, расчет можно произвести по аналогии с методом предельных усилий по СП 63. При этом вычисления будут произведены уже без вероятностного подхода в связи с отсутствием у авторов большого объема статистических данных по прочности сталефибробетона.

В качестве материала усиления предлагается использовать высокопрочный сталефибробетон. За счет его высокой прочности на растяжение будет выполнено проектирование усиления без дополнительных арматурных стержней. При этом наноситься он будет торкретированием. Все это значительно снизит трудозатраты и время производства работ, что особенно важно с учетом необходимости проведения работ на высоте и в условиях плотной городской застройки Санкт-Петербурга.

Расчетная схема представлена на рис. 6. В связи отсутствием дополнительной арматуры усиления необходимо решать не прямую задачу нахождения требуемой площади арматуры, а сразу проверку несущей способности сечения. Предполагается усиление конструкции с ее полной предварительной разгрузкой, за счет чего начальные деформации в дальнейшем не учитываются.

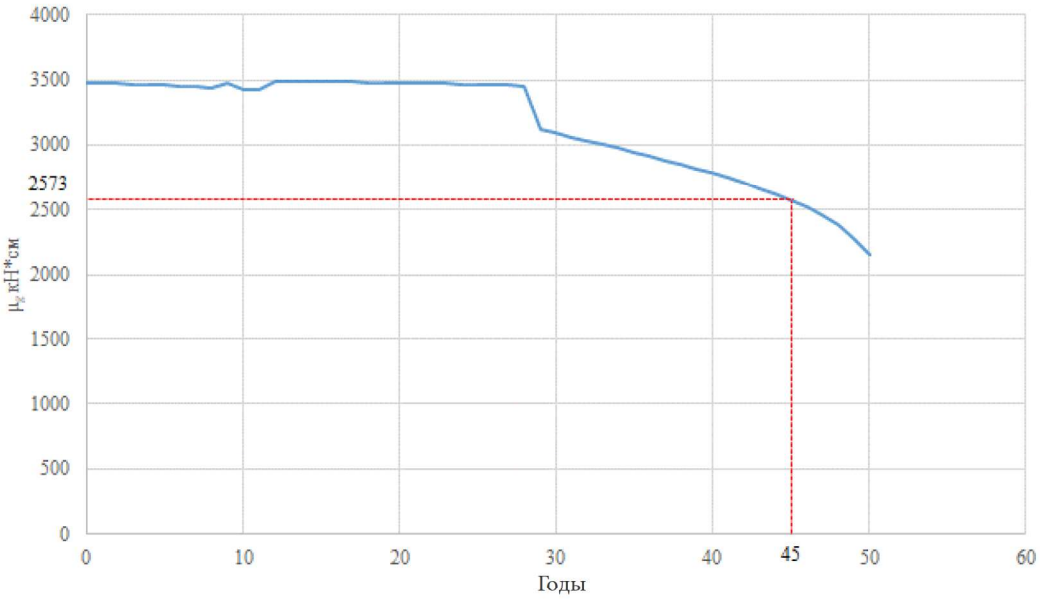


Рис. 4. Средние значения несущей способности

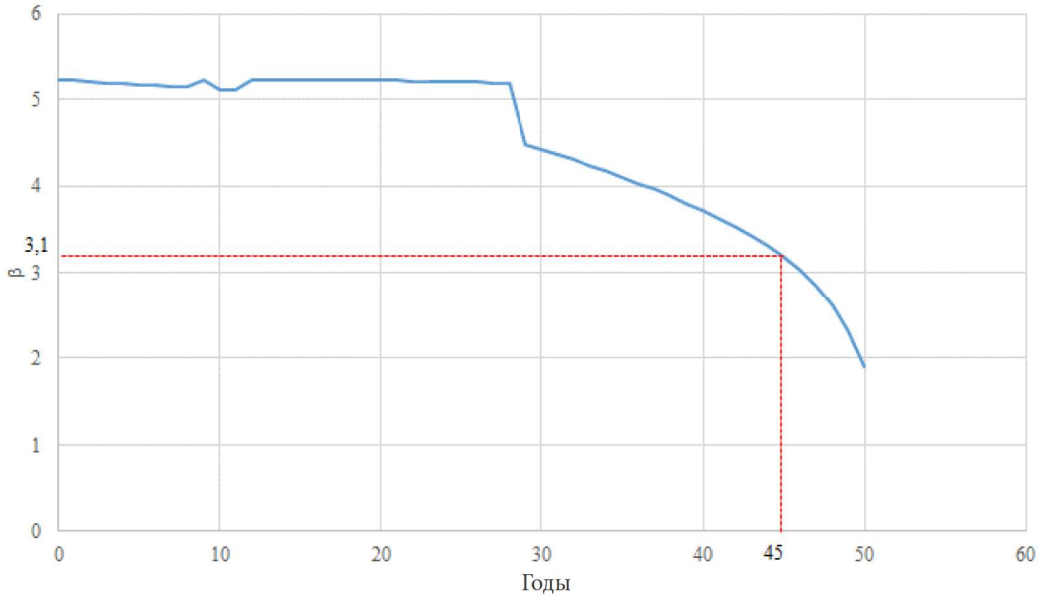


Рис. 5. Индексы надежности

Сначала определим граничную относительную высоту сжатой зоны бетона:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1+\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{fb2}}}. \quad (17)$$

Затем определим примерное положение высоты сжатой зоны бетона. Предположим, что $x = h_1$, тогда граница высоты сжатой зоны проходит в зоне усиливаемой балки, если

$$N_b \geq N_s + N_{fbt}; \quad (18)$$

$$R_b bx \geq R_s A_s + R_{fbt3} bc. \quad (19)$$

Уравнение равновесия продольных усилий в общем виде:

$$N_b = N_s + N_{fbt}. \quad (20)$$

Откуда

$$x = \frac{R_s A_s + R_{fbt3} bc}{R_b b}. \quad (21)$$

Проверяется условие

$$\xi \leq \xi_R. \quad (22)$$

Если оно выполняется, то разрушение происходит по сжатому бетону.

Условие прочности относительно центра тяжести растянутой арматуры (уравнение равновесия моментов) в общем виде:

$$M \leq R_b bx(h_0 - \frac{x}{2}) - R_{fbt3} bc(a + \frac{c}{2}). \quad (23)$$

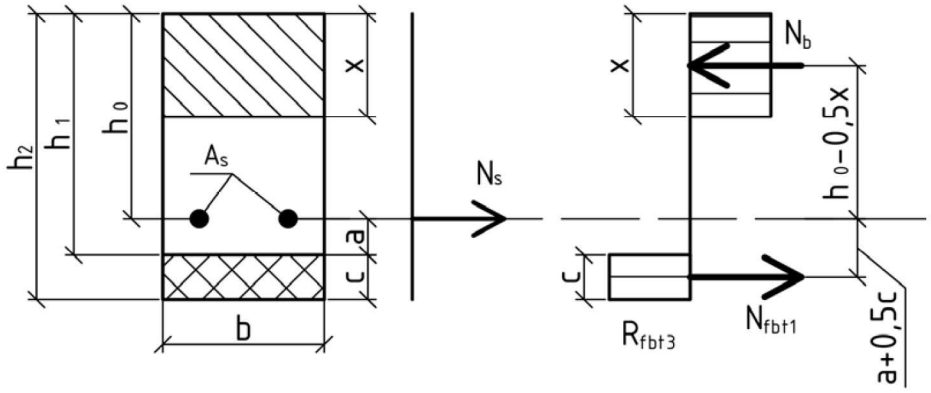


Рис. 6. Расчетная схема

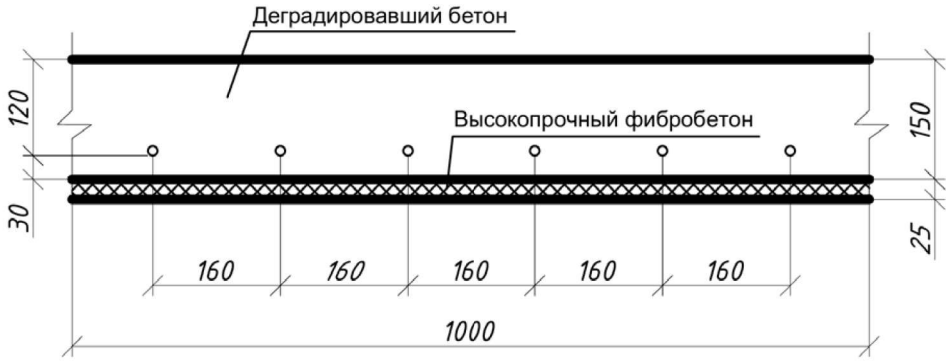


Рис. 7. Усиленное сечение

Согласно вероятностным расчетам, спустя 50 лет среднее значение прочности бетона составит 5,99 МПа (при начальном среднем значении 28,6 МПа), а площадь арматуры — 6,25 см^2 (при начальной 6,79 см^2). Примем в качестве усиления слой высокопрочного сталефибробетона, характеристики которого взяты из [24], содержание фибры 10 %, тогда R_{fbt3} = 18,4 МПа. Согласно СП 360.1325800[5] коэффициент запаса следует принять γ_{ft} = 1,3 для R_{fbt3}.

С помощью приведенного алгоритма итерационно подбиралась минимальная толщина сталефибробетона, при которой сечение выдержит действующий момент. В результате расчета получилось, что при c = 0,5 см высота сжатой зоны действительно находится в бетоне (x = 5,37 см), $\xi < \xi_R$ (0,447 < 0,467), максимально допустимый момент — 24,67 кН · м (при действующем моменте 24,57 кН · м). Слоя в 5 мм высокопрочного сталефибробетона уже достаточно для усиления сечения. Однако исходя из технологических и эксплуатационных особенностей был назначен слой усиления толщиной 25 мм. Чертеж усиленного сечения приведен на рис. 7.

Выводы

1. В результате расчетов установлено, что в рассмотренном примере деградация прочностных характеристик железобетонной плиты в условиях циклов попеременного замораживания и оттаивания характеризуется наличием критического временного рубежа, начиная с которого происходит резкое снижение средних значений несущей способности и индекса надежности (на 38 и 63 % соответственно к концу срока эксплуатации). Коррозионные процессы приводят к одновременному превышению нормативных требований по ширине раскрытия трещин и резкому снижению показателей надежности, что в дальнейшем сопровождается переходом конструкции в область недопустимых значений индекса надежности, а значит, к вероятности разрушения выше допустимой.

2. На конкретном примере была показана перспективность применения высокопрочного сталефибробетона при усилении изгибаемых железобетонных элементов и возможность внедрения вероятностных методов расчета в проектирование строительных конструкций для учета жизненного цикла объекта строительства.

3. Инженерным методом расчета было спроектировано усиление высокопрочным сталефибробетоном железобетонной плиты, эксплуатировавшейся 50 лет в условиях ЦЗО.

Библиографический список

1. *Трекин Н. Н., Кодыш Э. Н., Терехов И. А., Шмаков С. Д., Щедрин О. С.* Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций //

[5] СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. URL: https://docs.cntd.ru/document/550566433?ysclid=mn1nv4gvu9837036777

Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 4. С 152–159.

2. *Перельмутер А. В.* Развитие требований к безотказности сооружений // Вестник ТГАСУ. 2015. № 1 (48). С. 81–101.

3. *Краснощеков Ю. В.* Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 5 (75). С. 636–650. URL: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650

4. *Надольский В. В., Мартынов Ю. С.* Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2014. № 8. С. 27–34.

5. *Лебедева И. В., Петрова Т. А.* Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2023. № 3 (38). С. 20–36. URL: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36

6. *Соколов Б. С., Зенин С. А.* Анализ нормативной базы проектирования железобетонных конструкций // Строительные материалы. 2018. № 3. С. 4–12.

7. *Лазовский Д. Н., Глухов Д. О., Глухова Т. М.* Оценка вероятностных характеристик распределения эффектов от внешнего воздействия и функции предельного состояния в расчетах железобетонных элементов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2009. № 6. С. 35–40.

8. *Зенин С. А.* Анализ нормативных документов по проблеме установления данных для выполнения вероятностных расчетов железобетонных конструкций // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 33, № 2. С. 83–96. URL: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-83-96

9. *Høj N. P., Kroon I. K., Nielsen J. S., Schubert M.* System risk modelling and decision-making — Reflections and common pitfalls // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102469. URL: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102469

10. *Thöns S., Caprani C., Faber M. H., Frangopol D. M., Gardoni P., Giordano P. F., Honfi D., Iannacone L., Khan M. S., Köhler J., Kim S., Koker N., Limongelli M. P., Miraglia S., Nielsen J. S., Pandey M., Viljoen C.* On information value and decision analyses // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102481. URL: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102481

11. *Pandey M., Viljoen C., Way A., Fischer K., Sýkora M., Diamantidis D., Steenbergen R. D. J. M., Lind N., Frangopol D. M., Yang D. Y., Retief J. V., André J., Nathwani J., Lenner R.* Life safety in the Reliability-Based design and assessment of structures // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102453. URL: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102453

12. *Val D. V., Andrade C., Sykora M., Stewart M. G., Bastidas-Arteaga E., Mlcoch J., Truong Q. C., El Soueidy C.-P.* Probabilistic modelling of deterioration of reinforced concrete structures // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102454. URL: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102454.

13. *Попов В. М., Пинус Б. И., Плюснин М. Г., Кондратьева Л. Н.* Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на надежность сжатых железобетонных конструкций // Жилищное строительство. 2025. № 1–2. С. 91–95.

14. *Попов В. М., Яцковец О. А.* Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов в условиях низких температур // Инженерный вестник Дона. 2025. № 11 (131). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495 (дата обращения: 17.01.2026).

15. *Попов В. М., Яцковец О. А.* Статистические закономерности конструктивных характеристик изгибаемых железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур // Инженерный вестник Дона. 2025. № 11 (131). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10504 (дата обращения: 17.01.2026).

16. *Емельянов О. В., Мухамбетов Т. Б., Шувалов А. Н.* Статистические характеристики снеговых нагрузок // Вестник ЮУрГУ. Строительство и архитектура. 2024. Т. 24, № 2. С. 35–41. URL: https://doi.org/10.14529/build240205

17. *Краснощеков Ю. В.* Учет изменчивости постоянных нагрузок при расчете конструкций зданий и сооружений // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1 (59). С. 88–97.

18. *Леонович С. Н., Аль-Факих О. А. М.* Расчет сжатых и изгибаемых железобетонных элементов при циклическом замораживании и оттаивании // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Строительство и архитектура. 2004. № 1. С. 128–132.

19. *Andrade C., Alonso C.* Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and structures. 2004. № 37 (9). Pp. 623–643.

20. *Радайкин О. В., Шарафутдинов Л. А.* Восстановление поврежденных железобетонных конструкций с применением сталефибробетона // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Донецк, 24–26 мая 2022 г. Т. 1. Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2022. С. 26–29.

21. *Радайкин О. В., Шарафутдинов Л. А.* Методика расчета прочности, трещиностойкости и жесткости железобетонных балок, усиленных сталефибробетоном, на основе нелинейной деформационной модели // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5 (94). С. 37–53. URL: https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-5-37-53

22. Программа для ЭВМ: свид-во о гос. регистрации № 2025693946, Российская Федерация. Siga61 / В. М. Попов, О. А. Яцковец. Заявл. 14.11.2025, опубл. 03.12.2025.

23. *Berthod L., Trento D., Faleschini F.* Bond between Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete and existing concrete: a review // ce/papers. Proceedings in civil engineering. 2023. Vol. 6 (5). Pp. 1358–1365. URL: https://doi.org/10.1002/cepa.2108

24. *Мишина А. В., Чилин И. А., Андрианов А. А.* Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2011. № 3-2. С. 159–165.

References

1. Trekin N. N., Kodysh E. N., Terekhov I. A., Shmakov S. D., Shchedrin O. S. *Metodika opredeleniya ekspluatatsionnoy bezopasnosti zdaniy i ikh konstruktsiy* [Methods for determining the operational safety of buildings and their structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo Academia – Architecture and construction*, 2022, no. 4, pp. 152–159.

2. Perel'muter A. V. *Razvitie trebovaniy k bezotkaznosti sooruzheniy* [Development of requirements for failure-free operation of structures]. *Vestnik TGASU – Bulletin of TGASU*, 2015, no. 1 (48), pp. 81–101.

3. Krasnoshchekov Yu. V. *Veroyatnostniy raschet stroitel'nykh konstruktsiy s uchetom asimmetrii raspredeleniya sluchaynykh velichin i funktsiy* [Probabilistic calculation of building structures taking into account asymmetry of distribution of random variables and functions]. *Vestnik SibADI – Bulletin of SibADI,* 2020, vol. 17, no. 5 (75), pp. 636–650. Available at: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650

4. Nadol'skiy V. V., Martynov Yu. S. *Otsenka trebuemogo (tselevogo) urovnya nadezhnosti na osnovanii predydushchego opyta normirovaniya* [Assessment of the required (target) level of reliability based on previous experience in rationing]. *Vestnik Polotskogo gos. un-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki – Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences,* 2014, no. 8, pp. 27–34.

5. Lebedeva I. V., Petrova T. A. *Analiz sovremennykh podkhodov k otsenke nadezhnosti v stroitel'stve* [Analysis of modern approaches to reliability assessment in construction]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of the Research Center "Construction"*, 2023, no. 3 (38), pp. 20–36. Available at: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36

6. Sokolov B. S., Zenin S. A. *Analiz normativnoy bazy proektirovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Analysis of the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials,* 2018, no. 3, pp. 4–12.

7. Lazovskiy D. N., Glukhov D. O., Glukhova T. M. *Otsenka veroyatnostnykh kharakteristik raspredeleniya effektov ot vneshnego vozdeystviya i funktsii predel'nogo sostoyaniya v raschetakh zhelezobetonnykh elementov* [Assessment of probabilistic characteristics of distribution of effects from external impact and limit state function in calculations of reinforced concrete elements]. *Vestnik Polotskogo gos. un-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki – Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences,* 2009, no. 6, pp. 35–40.

8. Zenin S. A. *Analiz normativnykh dokumentov po probleme ustanovleniya dannykh dlya vypolneniya veroyatnostnykh raschetov zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Analysis of regulatory documents on the problem of establishing data for probabilistic calculations of reinforced concrete structures]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of the Research Center "Construction"*, 2022, vol. 33, no. 2, pp. 83–96. Available at: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-83-96

9. *Høj N. P., Kroon I. K., Nielsen J. S., Schubert M.* System risk modelling and decision-making — Reflections and common pitfalls. *Structural Safety,* 2025, vol. 113, 102469. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102469

10. *Thöns S., et al.* On information value and decision analyses. *Structural Safety*, 2025., vol. 113, 102481. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102481

11. *Pandey M., et al.* Life safety in the Reliability-Based design and assessment of structures. *Structural Safety*, 2025, vol. 113, 102453. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102453

12. *Val D. V., et al.* Probabilistic modelling of deterioration of reinforced concrete structures. *Structural Safety*, 2025, vol. 113, 102454. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102454

13. Popov V. M., Pinus B. I., Plyusnin M. G., Kondrat'eva L. N. *Vliyanie izmenchivosti deformatsionnykh kharakteristik betona na nadezhnost' szhatykh zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Influence of variability of deformation characteristics of concrete on reliability of compressed reinforced concrete structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Development*, 2025, no. 1–2, pp. 91–95.

14. Popov V. M., Yatskovets O. A. *Vliyanie izmenchivosti deformatsionnykh kharakteristik betona na obespechennost' nesushchey sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov v usloviyakh nizkikh temperatur* [Influence of variability of concrete deformation characteristics on provision of bearing capacity of bent reinforced concrete elements at low temperatures]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin,* 2025, no. 11 (131). Available at: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495 (accessed: 17.01.2026).

15. Popov V. M., Yatskovets O. A. *Statisticheskie zakonomernosti konstruktivnykh kharakteristik izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov v usloviyakh znakoperemennykh temperatur* [Statistical regularities of structural characteristics of bent reinforced concrete elements under conditions of alternating temperatures]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin,* 2025, no. 11 (131). Available at: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10504 (accessed: 17.01.2026).

16. Emel'yanov O. V., Mukhambetov T. B., Shuvalov A. N. *Statisticheskie kharakteristiki snegovykh nagruzok* [Statistical characteristics of snow loads]. *Vestnik YuUrGU. Stroitel'stvo i arkhitektura – SUSU Bulletin. Construction and architecture*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 35–41. Available at: https://doi.org/10.14529/build240205

17. Krasnoshchekov Yu. V. *Uchet izmenchivosti postoyannykh nagruzok pri raschete konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Taking into account the variability of constant loads when calculating the structures of buildings and structures]. *Vestnik SibADI – Bulletin of SibADI*, 2018, vol. 15, no. 1 (59), pp. 88–97.

18. Leonovich S. N., Al'-Fakikh O. A. M. *Raschet szhatykh i izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri tsiklicheskom zamorazhivanii i ottaivanii* [Calculation of compressed and bent reinforced concrete elements during cyclic freezing and thawing]. *Vestnik Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the Brest State Tech. University. Series: Construction and Architecture*, 2004, no. 1, pp. 128–132.

19. *Andrade C., Alonso C.* Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 2004, no. 37 (9), pp. 623–643.

20. Radaykin O. V., Sharafutdinov L. A. *Vosstanovlenie povrezhdennykh zhelezobetonnykh konstruktsiy s primeneniem stalefibrobetona* [Restoration of damaged reinforced concrete structures using steel fibre concrete]. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa. Trudy 8-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Donetsk, 24–26 maya 2022 g. T. 1.* [Proceedings of the 8th International scientific-practical. conf. Donetsk, May 24-26, 2022, vol. 1.]. Donetsk, Donetsk National. Tech. University Publ., 2022, pp. 26–29.

21. Radaykin O. V., Sharafutdinov L. A. *Metodika rascheta prochnosti, treshchinostoykosti i zhestkosti zhelezobetonnykh balok, usilennykh stalefibrobetonom, na osnove nelineynoy deformatsionnoy modeli* [Procedure for calculation of strength, crack resistance and stiffness of reinforced concrete beams reinforced with steel fibre concrete on the basis of nonlinear deformation model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 5 (94), pp. 37–53. Available at: https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-5-37-53

22. Popov V. M., Yatskovets O. A. Programma dlya EVM RF. Svidetel'stvo o gos. registratsii, no. 2025693946 [RF computer program. Certificate of state registration, no. 2025693946].

23. Berthod L., Trento D., Faleschini F. Bond between Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete and existing concrete: a review. *Proceedings in civil engineering,* 2023, vol. 6 (5), pp. 1358–1365. Available at: https://doi.org/10.1002/cepa.2108

24. Mishina A. V., Chilin I. A., Andrianov A. A. *Fiziko-tekhnicheskie svoystva sverkhvysokoprochnogo stalefibrobetona* [Physical and technical properties of ultra-high-strength steel fibre concrete]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 3-2, pp. 159–165.