



УДК 69.04

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.49-68

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Оценка безопасности эксплуатируемых железобетонных конструкций по нормам Республики Беларусь

Д.Н. Лазовский^{1*}, В.В. Тур², Д.О. Глухов³

¹ Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь;

² Брестский государственный технический университет (БГТУ), Брест, Беларусь;

³ ООО «Софтклуб», Минск, Беларусь

* d.lazovski@psu.by

Ключевые слова: существующие конструкции, надежность, индекс надежности, многоуровневая оценка

История статьи

Поступила в редакцию: 28.01.2025

Доработана: 15.02.2025

Принята к публикации: 17.02.2025

Для цитирования

Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О. Оценка безопасности эксплуатируемых железобетонных конструкций по нормам Республики Беларусь // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 49–68.

Аннотация. В последнее десятилетие в рамках стратегии устойчивого развития все больше внимание уделяется продлению срока службы существующих/эксплуатируемых зданий и сооружений. Для обоснованного принятия решения по дальнейшей эксплуатации конструкций требуются научно-обоснованные методы оценивания их надежности. В настоящей статье представлена многоуровневая система оценивания надежности существующей конструкции из бетона, включенная в новые нормы проектирования, и показаны этапы практического применения на примере простейшей свободно опертой балки. Предложены методы калибровки частных коэффициентов безопасности расчетных моделей сопротивления на основе модифицированных индексов надежности с учетом прогнозируемого остаточного срока службы строительного сооружения.

Safety Assessment of Existing Reinforced Concrete Structures According to the Standards of the Republic of Belarus

D.N. Lazousky^{1*}, V.V. Tur², D.O. Glukhov³

¹ Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus;

² Brest State Technical University (BSTU), Brest, Republic of Belarus;

³ Softclub LLC, Minsk, Republic of Belarus

* d.lazovski@psu.by

Дмитрий Николаевич Лазовский, д.т.н., профессор, профессор кафедры строительных конструкций, Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; eLIBRARY SPIN-код: 8887-8294, Scopus: 57220341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938, E-mail: d.lazovski@psu.by, lazouski.d@gmail.com

Виктор Владимирович Тур, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, Брестский государственный технический университет (БГТУ), 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; eLIBRARY SPIN-код: 1741-7652, Scopus: 6507476083, ResearcherID: X- 9477 -2018, ORCID: 0000-0001-6064, E-mail: profurvic@gmail.com, tur.s320@mail.ru

Дмитрий Олегович Глухов, к.т.н., доцент, главный инженер-программист, ООО «Софтклуб», 220141, г. Минск, пр-т Независимости, д. 168, корп. 1; eLIBRARY SPIN-код: 6882-1315, Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919, E-mail: dzmitry.hlukhau@outlook.com

© Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: existing structures, reliability, reliability index, multilevel assessment

Article history

Received: 28.01.2025

Revised: 15.02.2025

Accepted: 17.02.2025

For citation

Lazousky D.N., Tur V.V., Glukhov D.O. Safety Assessment of Existing Reinforced Concrete Structures According to the Standards of the Republic of Belarus. *Reinforced concrete structures*. 2025; 1(9):49-68.

Abstract. In the last decade, as part of the sustainable development strategy, more attention is paid to extending the service life of existing buildings and civil engineering structures. To make an informed decision on the further of existing structures, scientifically based methods for assessing their reliability are required. This article presents a multi-level system for assessing the reliability of an existing concrete structure, included in the new design standards, and shows the stages of practical application using the example of the simplest free supported beam. Methods for calibrating partial safety coefficients of resistance models based on modified reliability indices are proposed, taking into account the projected remaining service life of a construction structure.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия оценка и восстановление эксплуатируемых объектов инфраструктуры приобрели особую значимость и стали основными задачами для инженеров, специалистов-практиков и разработчиков нормативных документов по всему миру [1–3, 10, 11]. Стареение, процессы разрушения, отсутствие или ненадлежащее техническое обслуживание строительных сооружений, а также частое появление экстремальных воздействий в результате колебаний климата и природных катастроф привели к необходимости разработки более эффективных методов оценки безопасности и модернизации/восстановления находящихся в эксплуатации железобетонных конструкций. Исследования, направленные на разработку новых подходов, применяемых для оценки существующих конструкций, продолжаются, в том числе в связи с разработкой строительных норм и правил нового поколения [4–9, 13]. С одной стороны, эти подходы, основанные на результатах исследований, должны обеспечить решения, которые позволят сократить и/или избежать необходимости дополнительного вмешательства в текущее состояние конструкции, а с другой — разработать эффективные методы оценки безопасности эксплуатируемых сооружений с учетом фактических характеристик устаревших объектов инфраструктуры, но всегда с учетом экономических ограничений. Следует отметить, что продление сроков службы эксплуатируемых строительных сооружений имеет большое значение с точки зрения экологических, экономических и социально-политических аспектов, которые с каждым годом становятся все более значимыми. В частности, эти аспекты становятся особенно актуальными как в рамках реализации положений стратегии устойчивого развития, так и для сохранения исторических зданий, которые всегда представляют большую культурно-историческую, социальную и экономическую ценность для общества. Реализация общих принципов стратегии устойчивого развития вызывает необходимость продления срока службы строительных сооружений, в большинстве практических случаев в сочетании, как отмечено ранее, с серьезными экономическими ограничениями.

Dmitry N. Lazousky, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne of Polotsk, 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; eLIBRARY SPIN-code: 8887-8294, Scopus: 57220341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938, E-mail: d.lazovski@psu.by, lazouski.d@gmail.com

Viktor V. Tur, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Building Materials and Concrete Technology, Brest State Technical University (BSTU), 267 Moskovskaja str., Brest, 224017, Republic of Belarus; eLIBRARY SPIN-code: 1741-7652, Scopus: 6507476083, ResearcherID: X-9477-2018, ORCID: 0000-0001-6064, E-mail: profurvic@gmail.com, tur.s320@mail.ru

Dmitry O. Glukhov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Chief Software Engineer, Softclub LLC, Bdg. 1, 168 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220141, Republic of Belarus; eLIBRARY SPIN-code: 6882-1315, Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919, E-mail: dzmitry.hlukhau@outlook.com

В общем случае, согласно СТБ ISO 13822 [5], существующая конструкция может быть подвергнута оценке/проверке ее фактической надежности в случае:

- реконструкции/модернизации строительного сооружения, в ходе которой к существующей конструктивной системе добавляют новые элементы (рис. 1);
- выполнения проверки предельных состояний, показывающих, что существующая конструкция способна выдерживать нагрузки без отказов, связанные с ожидаемыми изменениями в плане использования объекта, эксплуатационными изменениями или продлением срока ее службы;
- выполнения ремонта здания, которое с течением времени пришло в негодность из-за воздействия окружающей среды или получило повреждения в результате особых воздействий, например землетрясения;
- сомнения в фактической надежности возведенной конструкции, например, из-за изменений, вносимых в строительные нормы.

Согласно СТБ [5], в некоторых случаях оценка фактической надежности может потребоваться государственным органам, страховым компаниям или владельцам, а также может быть предусмотрена планом технического обслуживания.

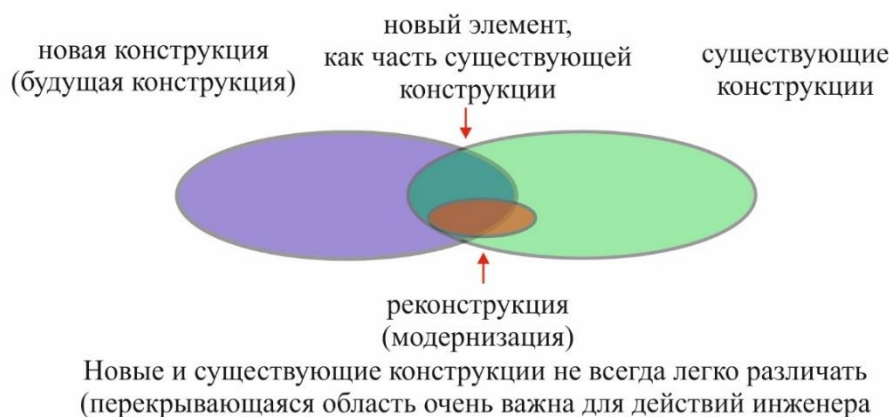


Рис. 1. Новый подход к проектированию новых и проверки существующих конструкций согласно *fib Model Code 2020* [8]

Fig. 1. New approach to the design of new and verification of existing structures according to *fib Model Code 2020* [8]

Следует подчеркнуть, что поведенческие модели (модели сопротивления), применяемые при проектировании новых конструкций, основанные на результатах лабораторных испытаний, были получены, как правило, на образцах из «нового» бетона, в то время как оцениваемые конструкции состоят из бетона «с историей». Для «нового» стандартного бетона соотношение между прочностью на сжатие, прочностью на растяжение, модулем упругости и другими свойствами является в достаточной мере установленным и уникальным. Поэтому в базах данных часто упоминается только прочность на сжатие и зависимости, связывающие ее с другими характеристиками свойств. В правилах проектирования эта взаимосвязь между механическими свойствами «встроена» в расчетные модели сопротивления. Однако в существующих конструкциях эти «уникальные соотношения» не всегда соблюдаются и являются реалистичными. Во-первых, на свойства бетона могли повлиять технологические процессы бетонирования конструкции и условия хранения во время набора прочности. Кроме того, бетон может быть поврежден в результате крупномасштабной (на структурном уровне) или локальной деформации (давление на защитные слои бетона в результате накопления продуктов коррозии арматуры, что приводит к его растрескиванию или отслоению) [10, 11]. При использовании в моделях

сопротивления характеристических, а далее и расчетных значений прочности материалов, полученных в процессе проведения основных этапов обследования технического состояния путем статистической обработки ограниченных выборок результатов полевых и лабораторных испытаний, требуется особая осторожность. Таким образом, понимание основ поведенческих моделей, используемых для оценки сопротивления эксплуатируемой конструкции, является важным элементом анализа при проверках предельных состояний и прогнозирования остаточного ресурса.

Именно поэтому оценка существующих конструкций часто требует применения сложных методов, как правило, выходящих за рамки традиционных строительных норм проектирования. За последние двадцать лет были разработаны специальные стандарты, применяемые для оценки существующих конструкций как на международном, так и на национальном уровне. К международным стандартам относят СТБ ISO 2394 [6], СТБ ISO 13822 [5], европейские технические спецификации TS CEN/TC 250, связанные с оценкой конструкций, находящихся в эксплуатации, которые легли в основу EN 1992-1-1 [9]. В Республике Беларусь разработаны и проходят утверждение строительные правила СП [12, 13], а в РФ — СП 13-102–2003 [14]. Соответствие сооружений и их частей существенным требованиям безопасности обеспечивается исполнением технического регламента ТР 2009/13 ВУ [4] и требований взаимосвязанных технических нормативных правовых актов в строительстве.

Цель оценки надежности существующих конструкций заключена в проверке при фактических характеристиках свойств материалов, геометрических размерах и величине воздействий их соответствия назначенному целевому уровню надежности, обеспечивающему безопасность для пользователя [5]. Нормативные документы Республики Беларусь в области оценки эксплуатируемых строительных конструкций [15–18] предусматривают проведение их детального обследования с целью сбора исходных данных о характеристиках конструкций для выполнения расчетов, анализ результатов которых позволяет оценить их надежность (безопасность) в свете предъявляемых к конструкциям требований. Нормативные документы [15, 17] для конструкций, которые эксплуатируются длительное время и на момент времени обследования имеют удовлетворительное состояние, содержат положения предварительной (упрощенной) оценки эксплуатируемых строительных конструкций по внешним признакам, исходя из степени их поврежденности (СП), степени риска (СР), степени нагруженности (СН), по результатам которой техническое состояние конструкции относят к одной из пяти категорий (КТС). По показателям КТС планируют виды и объем ремонтных работ для строительных конструкций. Следует отметить, что подобные оценки основаны на методах, содержащих значительные неопределенности, исключить или учесть которые практически невозможно.

Согласно СН [15], показатель степени нагруженности (СН) определяют простым делением расчетного усилия от фактических или предполагаемых нагрузок на расчетное сопротивление конструкции, определенное при фактических характеристиках базисных переменных, установленных с учетом их изменчивости и влияния дефектов. Если $СН > 1$ и требуется большой объем работ по усилению или замене конструкций, то рекомендуется выполнять их уточненные расчеты или натурные испытания [16]. Пример реализации уточненного расчета полувероятностным методом приведен в пособии [17].

Подход к оценке существующей конструкции во многом отличается от подхода к проектированию конструкции нового здания. Следует помнить о том, что проектирование новой конструкции является набором операций с абстракциями, когда конструкция существует только как ее образ. Поэтому традиционный процесс проектирования с использованием предписывающих норм содержит целый ряд неопределенностей. По окончании процесса проектирования у различных групп, участвующих в данном процессе, возникает ряд вопросов (например, один из вопросов, который возникает у собственника: *является ли запроектированное*

здание надежным, и какой остаточный ресурс можно прогнозировать?), на которые инженер-проектировщик дает один ответ: «Я не уверен, но я следовал нормам!». Нормы являются тем защитным зонтиком, под которым скрывается проектировщик от принятия решения. В случае оценивания существующих конструкций такой ответ не несет никакой информации и вряд ли удовлетворит пользователя (собственника). Здесь на первое место выдвигается вопрос надежности, а следовательно, и остаточного ресурса эксплуатации (*в течение какого периода времени конструкция будет оставаться надежной?*). Оценить риски возможно только при установленной вероятности отказа и величине последствий, связанных с отказом. Для конструкций, находящихся в эксплуатации, имеет место переход *от абстракций к фактическим* условиям, свойствам материалов, виду и уровню повреждений. Оценка надежности строительного сооружения часто требует применения сложных методов, как правило, выходящих за рамки традиционных норм проектирования. Степень сложности расчетных моделей, применяемых для оценки надежности конструкции, зависит, главным образом, от класса ответственности сооружения, который отражает потенциальные последствия обрушения/отказа. При оценке фактической надежности необходимо учитывать влияние процесса строительства и последующей эксплуатации конструкции, в ходе которых она могла подвергнуться изменениям, износу, неправильному использованию и другим отклонениям по сравнению с первоначальным проектным состоянием. При оценивании с учетом установленного технического состояния с конструкцией возможно произвести целый ряд манипуляций, включая определение фактических геометрических размеров, прочностных характеристик материалов, степени карбонизации бетона, коррозии арматуры, значений постоянных нагрузок и т.д. Однако, несмотря на то, что существующую конструкцию можно исследовать в полевых и лабораторных условиях несколько раз, всегда будет сохраняться некоторая неопределенность в отношении основных/базисных переменных и ее поведения. Поэтому, как и при проектировании новых конструкций, фактические изменения основных переменных, описывающих воздействия, свойства материалов, геометрические данные и неопределенности модели, учитывают, например, с помощью системы частных коэффициентов, или рассматривая ошибку моделирования как базисную переменную.

Как показывает практика, в большинстве случаев специалисты, выполняющие оценку технического состояния строительных конструкций, ограничиваются предварительными упрощенными расчетами, игнорируя рекомендации [5, 6, 12] и допуская необоснованные экономические затраты, связанные с усилением конструкций. Но даже после выполнения зачастую ненужного усиления инженер-конструктор не может ответить на тот же вопрос: «*А теперь конструкция соответствует требуемому уровню надежности?*».

Цель настоящей статьи: изложить систему многоуровневой оценки безопасности применительно к эксплуатируемым железобетонным конструкциям, изложенную в проекте нормативного документа [12], и на примере продемонстрировать ее применение.

МЕТОДЫ

Принципы оценки фактической надежности существующей конструкции. При оценке/проверке фактической надежности существующих зданий обычно принимают во внимание два основных принципа:

- для проверочных расчетов применяют модели сопротивлений и воздействий, содержащиеся в действующих в настоящее время нормах, а нормы, действовавшие в период проектирования конструкции, используют только в качестве справочных документов;

- учитывают фактические (оценочные) характеристики свойств конструкционных материалов, воздействий, геометрических размеров и данных о поведении конструкции во времени, а исходную проектную документацию, включая рабочие чертежи, используют только в качестве справочных документов.

Первый принцип следует применять для достижения такого же уровня надежности, как и в случае с недавно запроектированными конструкциями строительных сооружений, принимая при этом во внимание только экономические аспекты, связанные с восстановлением требуемого уровня надежности для обеспечения остаточного ресурса.

Второй принцип должен исключать пренебрежение любым техническим состоянием конструкции, которое может повлиять на ее фактическую надежность (в положительную или отрицательную сторону). Большинство современных норм и стандартов разработаны с учетом концепции предельных состояний в сочетании с их проверками методом частных коэффициентов. В соответствии с этим методом, который составляет основу надежности в действующих нормативных документах, основные/базисные переменные задают характеристическими или репрезентативными значениями, которые должны быть назначены по результатам полевых или лабораторных испытаний. Расчетные значения основных переменных определяют на основе характеристических (репрезентативных) значений и соответствующих частных коэффициентов. Из второго принципа следует, что необходимо проводить поэтапное обследование оцениваемой конструкции. Для обеспечения требований надежности следует выполнять калибровку частных коэффициентов, опираясь на модифицированные значения мер надежности (вероятности отказа и связанный с ней индекс надежности), установленные для существующих конструкций.

Дифференциация мер надежности при проверках предельных состояний существующих конструкций. Новый кодекс-образец *fib Model Code 2020 (fib MC 2020)* [8] не только содержит методы проектирования новых конструкций из бетона, но и распространяется на методы оценки существующих/эксплуатируемых конструкций (рис. 1). При разработке национальных нормативных документов нового поколения рекомендовано использовать одни и те же базовые модели сопротивления как для проектирования, так и оценки конструкций, находящихся в эксплуатации. Вместе с тем, согласно требованиям проекта [8], «*концепция безопасности должна быть расширена и обновлена для охвата как новых, так и существующих конструкций с учетом дифференциации рисков и других нормируемых мер надежности с тем, чтобы различать новые и существующие конструкции, для которых принимают различные уровни надежности по экономическим соображениям, но не ниже минимальных уровней, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности (для существующих конструкций целевое значение индекса надежности может быть понижено по сравнению с целевым индексом надежности для новой конструкции)*». Нормирование мер надежности для существующей конструкции с учетом реферативного периода, равного остаточному ресурсу конструкции, необходимо как для калибровки частных коэффициентов безопасности полувероятностных методов, согласно СН 2.01.01 [7], так и при прямом оценивании, основанном на вычислении вероятностей отказа (индексов надежности) и сравнении их с целевыми значениями. Целевые значения индексов надежности $\beta_{tag,saf}$, полученные на основе теории рисков [8] и рекомендованные в проекте СП [12] для оценивания существующих конструкций, приведены в табл. 1.

Система многоуровневой оценки надежности несущих конструкций. Проверки предельных состояний бетонных и железобетонных конструкций выполняют с учетом установленных дефектов и повреждений по действующим на момент проведения обследования нормативным документам [15–17] в соответствии с системой многоуровневой оценки надежности несущих конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений (табл. 2) в соответствии с проектом СП [12]. Воздействия на конструкции, в частности климатические и окружающей среды, определяют в соответствии с [19–22].

Таблица 1

Целевые значения модифицированных индексов надежности $\beta_{tag,saf}$, применяемые при оценивании существующих конструкций согласно СП [12]

Класс последствий по СН 2.01.01 [7]	Целевой индекс надежности $\beta_{tag,saf}$
CC1	$\max(1,8; \beta_{tag,saf})$, где $\beta_{tag,saf} = -\Phi^{-1}(1 \times 10^{-3} \cdot t_{ref})$ для всех A_{col}
CC2	$\max(2,3; \beta_{o,t,saf})$, где $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(2 \times 10^{-4} \cdot t_{ref})$ при $A_{col} < 100 \text{ м}^2$, $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left(\frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)^{-2}}{0,05} \cdot t_{ref} \right)$ при $A_{col} \geq 100 \text{ м}^2$
CC3	$\max(2,8; \beta_{o,t,saf})$, где $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(5 \times 10^{-5} \cdot t_{ref})$ при $A_{col} < 20 \text{ м}^2$, $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left(\frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,59 \cdot A_{col}^{0,56} - 1)^{-2}}{0,2} \cdot t_{ref} \right)$ при $A_{col} \geq 20 \text{ м}^2$

Table 1

The target values of the modified reliability indices $\beta_{tag,saf}$ used in the evaluation of existing structures according to SP [12]

Class of consequences according to SN 2.01.01 [7]	Target reliability index $\beta_{tag,saf}$
CC1	$\max(1,8; \beta_{tag,saf})$, where $\beta_{tag,saf} = -\Phi^{-1}(1 \times 10^{-3} \cdot t_{ref})$ for all A_{col}
CC2	$\max(2,3; \beta_{o,t,saf})$, where $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(2 \times 10^{-4} \cdot t_{ref})$ for $A_{col} < 100 \text{ м}^2$, $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left(\frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)^{-2}}{0,05} \cdot t_{ref} \right)$ for $A_{col} \geq 100 \text{ м}^2$
CC3	$\max(2,8; \beta_{o,t,saf})$, where $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(5 \times 10^{-5} \cdot t_{ref})$ for $A_{col} < 20 \text{ м}^2$, $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left(\frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,59 \cdot A_{col}^{0,56} - 1)^{-2}}{0,2} \cdot t_{ref} \right)$ for $A_{col} \geq 20 \text{ м}^2$

Таблица 2

Многоуровневая система оценки надежности согласно СП [12]

Оценочный уровень	Модели, применяемые при расчетах сопротивлений	Методы статических расчетов для определения эффектов от воздействий	Методы оценки надежности
1	Модели воздействий и сопротивлений, включенные в нормы и строительные правила. Механические свойства бетона и арматуры приняты по нормам на основании данных проектной документации	Линейно-упругий расчет	Оценка конструктивных элементов полувероятностным методом — метод частных коэффициентов. Коэффициенты принимают в соответствии нормами и строительными правилами
2			
3			
4			
5			
	Механические свойства материалов определяют по результатам натурных испытаний (<i>in-situ</i>)	Уточненный расчет с учетом перераспределения усилий (нелинейный или пластический расчет)	Применяют метод частных коэффициентов; используют модифицированные значения частных коэффициентов
	Вероятностные модели сопротивлений и воздействий		Проверка предельных состояний при помощи полностью вероятностного расчета отдельных элементов конструкций или конструктивной системы в целом

Table 2

Multilevel reliability assessment system according to SP [12]

Estimated level	Models used in resistance calculations	Static calculation methods for determining the effects of impacts	Reliability assessment methods
1	Load and resistance models included in the norms and building regulations. The mechanical properties of concrete and reinforcement are accepted according to the standards based on the data of the design documentation	Linear-elastic calculation	Evaluation of structural elements by the semi-probabilistic method — the method of partial coefficients. The coefficients are accepted in accordance with the norms and building regulations
2			
3			
4			
5			
	The mechanical properties of materials are determined based on the results of field tests (<i>in-situ</i>)	Refined calculation taking into account the redistribution of forces (nonlinear or plastic calculation)	The method of partial coefficients is applied; modified values of partial coefficients are used
	Probabilistic models of resistances and loads		Verification of limit states using a fully probabilistic calculation of individual structural elements or the structural system as a whole

На 1-м оценочном уровне проверочные расчеты выполняют с использованием моделей сопротивления, содержащихся в действующих нормативных документах для проектирования соответствующих видов конструкций. При наличии проектной документации расчетные характеристики свойств материалов принимаются в соответствии с проектом (нормативные/характеристические значения прочности материалов, частные коэффициенты безопасности), рассматривая их как справочные. Расчетные значения эффектов воздействий определяют с частными коэффициентами безопасности для нагрузок, установленных действующими на момент времени обследования нормативными документами.

Если условия проверок предельных состояний методом частных коэффициентов не удовлетворяются на 1-м уровне, производят расчет на 2-м оценочном уровне. На 2-м оценочном уровне для определения сопротивления конструктивной системы применяют уточненные расчетные методы (например, нелинейные методы анализа). При этом нелинейный анализ сопротивления конструкции/конструктивной системы выполняют при средних значениях характеристик свойств материалов, а переход к расчетным значениям осуществляют путем деления полученного среднего значения сопротивления на глобальный коэффициент безопасности, определяемый по СП [12, 18].

Если условия проверки метода предельных состояний на 2-м оценочном уровне не удовлетворяются, осуществляют переход к 3-му оценочному уровню. На 3-м оценочном уровне проверки предельных состояний производят с использованием баз данных, полученных в результате детального обследования железобетонных конструкций. Выполняют статистическую обработку результатов испытаний бетона и арматуры, геометрических параметров, полученных при обследовании, пользуясь, как правило, методами оценивания малых выборок [25, 27]. При этом устанавливают средние значения, оценку стандартных отклонений и коэффициенты вариации для вычисления статистическими методами характеристических значений прочности бетона и арматуры. Для собственного веса конструктивных элементов в качестве характеристических принимают средние значения, а для функциональных нагрузок — их характеристические значения согласно [19–22]. Частные коэффициенты безопасности для характеристик свойств материалов и воздействий принимают в соответствии с действующими нормами на момент времени проведения обследования.

Если условия проверки метода предельных состояний не удовлетворяются на 3-м оценочном уровне, осуществляют переход к 4-му оценочному уровню. На этом уровне производят калибровку частных коэффициентов для воздействий и материалов в соответствии с СП [12, 18]. Частные коэффициенты калибруют с учетом фактического технического состояния конструкции, фактической изменчивости характеристик свойств бетона и арматуры, установленных, например, методами [25, 28], воздействий, условий эксплуатации конструкции, уровня и качества технического обслуживания, целевого уровня надежности при прогнозируемом остаточном сроке эксплуатации.

Если расчетные критерии метода предельных состояний не удовлетворяются на 4-м уровне или отсутствуют откалиброванные значения частных коэффициентов для фактических нагрузок и характеристик материалов, переходят к 5-му оценочному уровню. На 5-м оценочном уровне выполняют вероятностную оценку надежности в соответствии с СТБ и СН [5–7]. Проверка предельных состояний на основе вероятностных методов включает расчет индекса надежности (вероятности отказа) и сравнение его значения с целевым значением ($\beta \geq \beta_{tag,saf}$).

Окончательное заключение о надежности бетонных и железобетонных конструкций и необходимости их усиления или замены принимают только после их оценки на всех оценочных уровнях (если только на очередном из уровней условия предельных состояний не были выполнены). При этом, если на 5-м уровне по-прежнему критерии не выполняются при значительных нераскрытых неопределенностях, рекомендуется выполнить испытания прежде, чем принять решение об усилении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение многоуровневой оценки безопасности эксплуатируемых железобетонных конструкций реального объекта. В качестве примера реализации системы многоуровневой оценки безопасности, учитывающей результаты измерения параметров физических и геометрических свойств конструкций в процессе обследования, рассмотрим производственное

здание, находящееся в эксплуатации 40 лет, класс сложности К-3 [24], класс последствий отката СС2 (класс надежности RC2) [7], период отнесения (остаточный срок службы до нового обследования) $t_{ref} = 10$ лет, с прогнозируемой площадью обрушения перекрытия $A_{col} = 980 \text{ м}^2$.

Геометрические размеры поперечного сечения и продольное армирование изгибаемого железобетонного балочного элемента, запроектированного по СНиП [23] из бетона класса В20 (С16/20), составляют: ширина 200 мм, высота 500 мм; армирование: в растянутой зоне двумя стержнями диаметром 25 мм арматуры класса АIII (S400); в сжатой зоне — двумя стержнями диаметром 12 мм класса АIII (S400). Толщина защитного слоя арматуры в растянутой и сжатой зонах сечения, согласно проектным данным, составляет 30 мм. Балки имеют повреждения в виде коррозии рабочей арматуры растянутой зоны балок в пролете с уменьшением ее поперечного сечения. При обследовании в полевых и лабораторных испытаниях установлены фактические единичные значения следующих базисных переменных: фактического диаметра арматуры в растянутой зоне с учетом повреждения коррозией; толщины ее защитного слоя; прочности бетона при сжатии (цилиндрическая прочность, полученная с учетом коэффициента 0,8 для перехода от кубиковой прочности, определенной при обследовании); прочность (предел текучести) арматуры в растянутой зоне. Полученные по результатам испытаний единичные значения базисных переменных приведены в табл. 1. Характеристические значения прочности бетона определены по методу порядковых статистик для ограниченных выборок результатов, разработанных в исследованиях [25, 27], и внесенному в СП [12]. Значение коэффициента вариаций определено согласно СП [12], принимая логнормальное (LN) распределение прочности бетона. Статистические параметры для арматуры установлены согласно СН [7]. Учитывая малую изменчивость толщины защитного слоя бетона и диаметра арматуры после коррозионного повреждения (менее 5 %), при дальнейшем анализе в расчетных моделях сопротивлений использовали средние значения, полученные при проведении обследования. Расчетное значение максимального изгибающего момента в критическом сечении от расчетного сочетания воздействий после изменения плана эксплуатации объекта $M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Таблица 3

Значения базисных переменных по результатам натурального обследования

Но-мер	Базисная переменная	Ед. изм.	Выборка единичных результатов испытаний	Среднее значение	Характеристическое значение	CoV
1	Прочность бетона на сжатие*	МПа	20,6; 21,6; 19,7; 19,5; 21,1; 21,3; 23,6; 23,5; 22,5; 20,0; 20,2; 19,6; 20,3; 22,5; 20,5	21,1	17,7	0,11
2	Прочность арматуры на растяжение	МПа	467; 465; 473; 481,7; 475; 492; 500	479,1	429,7	0,066
3	Толщина защитного слоя	мм	42,7; 42,8; 44,0; 43,4; 44,0; 44,1; 43,7; 43,2; 42,8; 44,1; 43,5; 43,2; 43,4; 44,15; 43,5	43,5	—	—
4	Диаметр продольной арматуры	мм	22,3; 22,2; 22,1; 23,0; 22,0; 22,5; 22,4; 22,8; 22,7; 22,6; 22,1; 22,0; 21,9; 22,0; 21,9	22,3	—	—

* — значения цилиндрической прочности бетона, пересчитанные путем умножения единичных значений прочности стандартных кубов на переходной коэффициент 0,8.

Table 3

Values of the basic variables based on the results of the field survey

Number	Basic variable	Units	Sampling of individual test results	Average value	Characteristic value	CoV
1	Compressive strength of concrete *	MPa	20.6; 21.6; 19.7; 19.5; 21.1; 21.3; 23.6; 23.5; 22.5; 20.0; 20.2; 19.6; 20.3; 22.5; 20.5	21.1	17.7	0.11
2	Tensile strength of reinforcement	MPa	467; 465; 473; 481.7; 475; 492; 500	479.1	429.7	0.066
3	Concrete cover	mm	42.7; 42.8; 44.0; 43.4; 44.0; 44.1; 43.7; 43.2; 42.8; 44.1; 43.5; 43.2; 43.4; 44.15; 43.5	43.5	—	—
4	Diameter of the longitudinal reinforcement	mm	22.3; 22.2; 22.1; 23.0; 22.0; 22.5; 22.4; 22.8; 22.7; 22.6; 22.1; 22.0; 21.9; 22.0; 21.9	22.3	—	—

* — the values of the cylindrical strength of concrete, recalculated by multiplying the unit strength values of standard cubes by a transition factor of 0.8.

Результаты статистической обработки данных, полученных при обследовании рассматриваемых изгибаемых конструкций, и результаты расчета приведены на рис. 2.

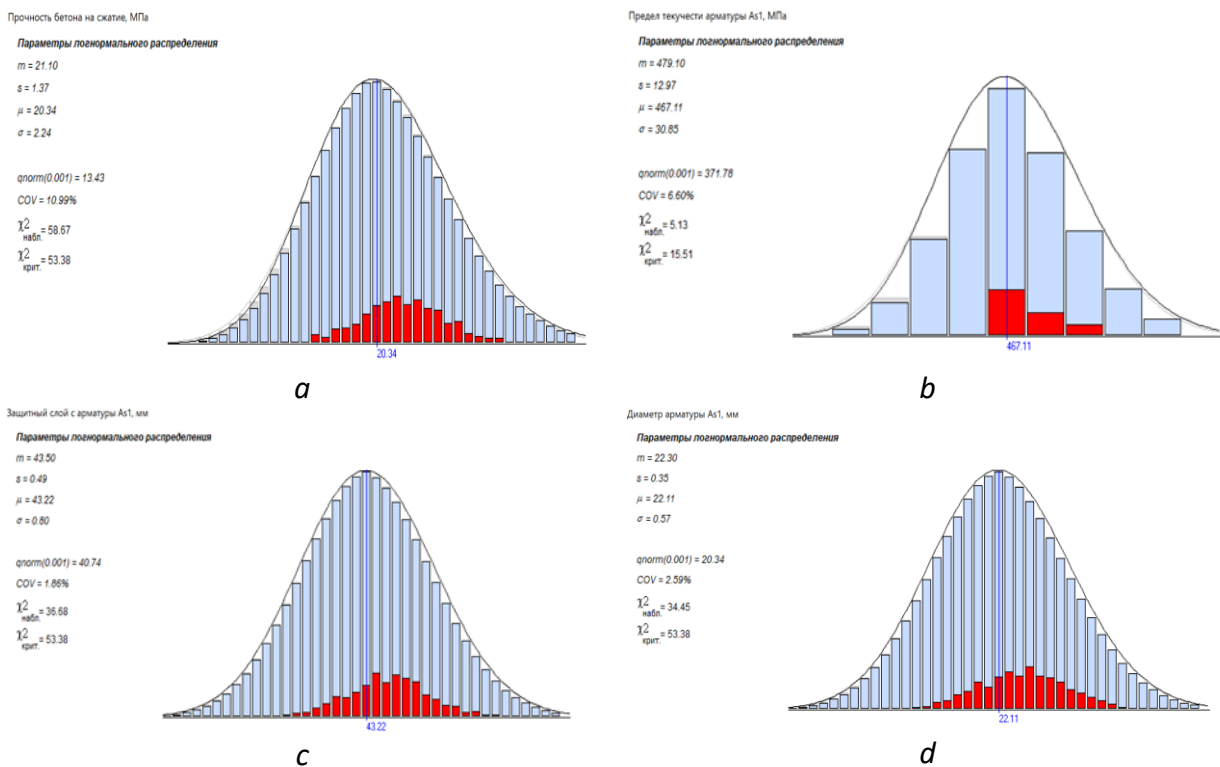


Рис. 2. Результаты статистической обработки измеренных при обследовании данных: *a* — прочности бетона; *b* — предела текучести арматуры; *c* — толщины защитного слоя арматуры (до центра тяжести ее сечения); *d* — диаметра арматуры растянутой зоны

Fig. 2. The results of statistical processing of the data measured during the survey: *a* — the strength of concrete; *b* — the yield strength of reinforcement; *c* — the thickness of the protective layer of reinforcement (up to the center of gravity of its section); *d* — the diameter of the reinforcement of the stretched zone

Выполним проверку предельного состояния несущей способности изгибаемого элемента конструкции на 1-м оценочном уровне упрощенным линейно-упругим расчетом с учетом уменьшения поперечного сечения арматуры в растянутой зоне (среднее значение диаметра

22,3 мм при $A_{s1} = 781 \text{ мм}^2$), моделируя работу бетона сжатой зоны в виде прямоугольной эпюры уменьшенной высоты ($\lambda = 0,8$; $\eta = 1$) [18]. Расчетные характеристики свойств материалов и размещение арматуры в расчетном поперечном сечении вычисляем в соответствии с проектом, исходя из их характеристических значений прочности (так как по результатам натурного обследования установлено, что прочность бетона, согласно СТБ EN 13791 [26], не ниже класса C16/20, и арматуры — не ниже A400). При этом значения частных коэффициентов безопасности принимаем согласно действующему СП 5.03.01 [18]. С учетом проектных параметров геометрические размеры и прочностные характеристики материалов равны:

$$c = 30 + 25/2 = 47,5 \text{ мм}; c_1 = 30 + 12/2 = 36 \text{ мм}; d = 500 - 47,5 = 457,5 \text{ мм};$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{390}{1,15} = 339 \text{ МПа}; f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16}{1,5} = 10,7 \text{ МПа}.$$

Расчетные значения эффектов от воздействий (изгибающих моментов) определяют с коэффициентами безопасности для нагрузок, установленными действующими на момент времени обследования нормативными документами. Определим расчетное сопротивление изгибу железобетонного элемента в критическом сечении при проектных параметрах:

$$M_{Rd} = \eta f_{cd} b x_{eff} (d - 0,5 x_{eff}) + f_{yd} A_{s2} (d - c_1) = \\ = 1 \cdot 10,7 \cdot 200 \cdot 87,94 \cdot (457,5 - 0,5 \cdot 87,94) + 348 \cdot 226 \cdot (457,5 - 36) = 111 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$\text{при } x_{eff} = \frac{f_{yd} A_{s1} - f_{yd} A_{s2}}{\eta f_{cd} b} = \frac{339 \cdot 781 - 339 \cdot 226}{1 \cdot 10,7 \cdot 200} = 88 \text{ мм}.$$

Достижение предельного состояния по прочности поперечного сечения начинается с растянутой зоны:

$$\xi = \frac{x_{eff}}{\lambda d} = \frac{88}{0,8 \cdot 457,5} = 0,24 < \xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{f_{yd}/E_s + \varepsilon_{cu2}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{339/2 \cdot 10^5 + 3,5 \cdot 10^{-3}} = 0,674,$$

где $M_{Rd} = 111 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_{Ed} = 130 \text{ кН} \cdot \text{м}$ — условие проверки предельных состояний несущей способности методом частных коэффициентов при проектных параметрах конструкции на 1-м оценочном уровне *не выполняется*.

Произведем проверочный расчет обследованной конструкции на 2-м оценочном уровне с использованием нелинейного расчета с использованием деформационной модели в соответствии с положениями СП [18]. Нелинейный анализ сопротивления изгибаемых конструкций выполняем при средних значениях характеристик свойств материалов, полученных при обследовании и лабораторных испытаниях, а переход к расчетному значению изгибающего момента M_{Rd} осуществляем с применением к полученному среднему значению сопротивления глобального коэффициента безопасности γ_R . Среднее значение прочности бетона на сжатие: $f_{cm, is} = 21,1 \text{ МПа}$; предела текучести арматуры: $\sigma_{ym} = 479,1 \text{ МПа}$ (A_{s1}), $\sigma_{ym} = 400 \text{ МПа}$ (A_{s2}); среднее расстояние от грани элемента до центра тяжести арматуры $c_m = 43,5 \text{ мм}$ (A_{s2}), $c_{1,m} = 36 \text{ мм}$ (A_{s2}); среднее значение диаметра арматуры 22,3 мм (A_{s1}), 12 мм (A_{s2}) (табл. 3). В результате расчета с применением деформационной модели изгибающий момент (расчетное сопротивление изгибу) элемента конструкции при средних геометрических размерах и средних значениях характеристик свойств материалов был получен равным $M_{Rm} = 156,25 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Результаты расчета приведены на рис. 3, а. Вычисляем глобальный коэффициент безопасности для сопротивления γ_R в соответствии с СП [12, 18] по формуле:

$$\gamma_R = \gamma_r^* \cdot \gamma_{Rd}, \quad (1)$$

где коэффициент глобального сопротивления, учитывающий неопределенности, связанные с изменчивостью свойств материалов и геометрических размеров, вычисляется по формуле:

$$\gamma_r^* = \exp(\alpha_R \cdot \beta_{tag} \cdot V_R^*), \quad (2)$$

где $\alpha_R = 0,8$, [7]; $\beta_{tag} = 3,8$ для RC2 [7].

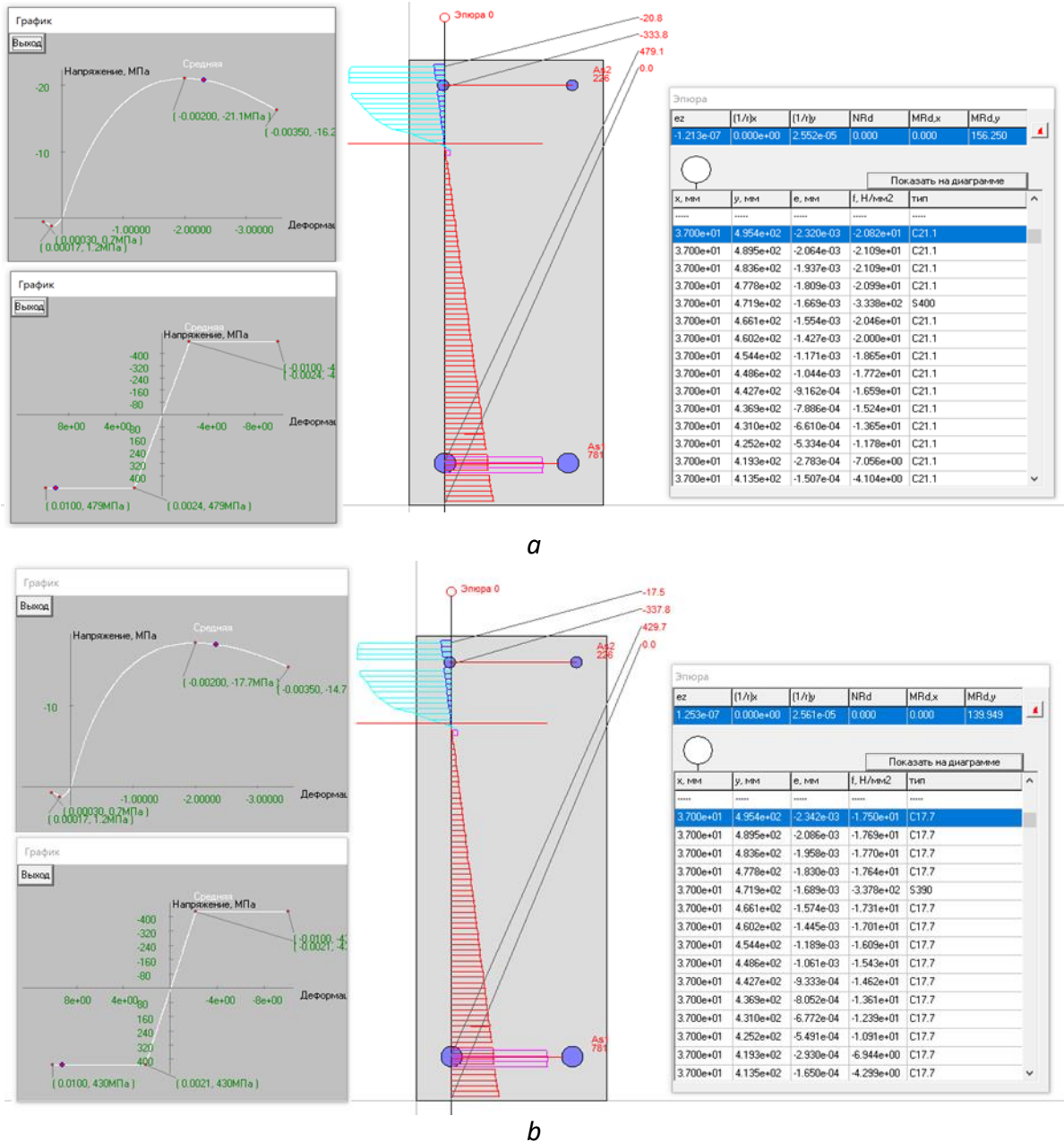


Рис. 3. Результаты расчета предельного изгибающего момента и параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения (на 2-м уровне) при параметрах свойств материалов: *a* — средних; *b* — характеристических (цифры на выносных линиях — напряжения в МПа) (синим и красным цветом — относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, напряжений) **Fig. 3.** The results of calculating the limiting bending moment and the parameters of the stress-strain state of the cross section (at level 2) with the parameters of the properties of materials: *a* — average; *b* — characteristic (the numbers on the outrigger lines are stresses in MPa) (blue and red are relative deformations, respectively, in compressed and stretched zones; blue and pink — similarly, tension)

Коэффициент глобального сопротивления, учитывающий неопределенности расчетной модели сопротивления, принимаем по СП [12] для недостаточно проверенных численных моделей изгибаемых балочных элементов: $\gamma_{Rd} = 1,1$.

Коэффициент вариации сопротивления поперечного сечения рассматриваемого изгибаемого элемента определяют по формуле:

$$V_r^* = \frac{1}{c} \cdot \ln \left(\frac{R_m}{R_k} \right), \quad (3)$$

где $c = 1,645$; $R_m = M_{Rm} = 156,25 \text{ кН}\cdot\text{м}$; $R_k = 139,949 \text{ кН}\cdot\text{м} \approx 140 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Результаты расчета в соответствии с деформационной моделью для изгибаемого элемента при характеристических значениях свойств материалов приведены на рис. 3, б. Тогда глобальный коэффициент безопасности для сопротивления, вычисленный по формулам (1)–(3), равен:

$$\gamma_R = 1,18 \cdot 1,1 = 1,3,$$

где $\gamma_r^* = \exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,055) = 1,18$; $V_r^* = \frac{1}{1,645} \cdot \ln \left(\frac{156,25}{140} \right) = 0,055$.

Следует отметить, что использование коэффициента $c = 1,645$ в формуле (3) не вполне корректно при вычислении характеристического значения сопротивления изгибу с использованием характеристических значений базисных переменных для бетона и арматуры, что было показано в исследовании [27].

Проверяем условие $M_{Rd} = M_{Rm}/\gamma_R = 156,25/1,3 = 120 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$ — критерий проверки предельного состояния несущей способности (STR), согласно СН 2.01.01 [7], *не удовлетворяется* на 2-м оценочном уровне.

Выполним проверочный расчет сопротивления изгибу рассматриваемого элемента на 3-м оценочном уровне с использованием нелинейного расчета по деформационной модели, в которой применимы диаграммы деформирования бетона и арматуры, параметрические точки которых были получены статистической обработкой результатов испытаний бетона и арматуры, геометрических размеров, полученных при обследовании. При этом устанавливаем средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации для вычисления статистическими методами характеристических значений прочности бетона и арматуры. Частные коэффициенты безопасности для характеристик свойств материалов принимаем в соответствии с действующими нормами на момент времени проведения обследования [18]: $\gamma_c = 1,5$; $\gamma_s = 1,15$. Для изгибающего момента от внешних воздействий принимаем его расчетное значение (с учетом коэффициентов безопасности [4]): $M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Характеристические значения базисных переменных и их коэффициенты вариации по результатам статистической обработки испытаний: $f_{ck} = 17,1 \text{ МПа}$; $V_c = 0,11$; $f_{yk} = 454,65 \text{ МПа}$; $V_s = 0,066$. Диаметр арматуры (A_{s1}) и расстояние от нижней грани изгибаемого элемента до ее центра тяжести принимаем равными их средним значениям, полученным при обследовании: 22,3 мм; 43,5 мм соответственно. Расчетные значения сопротивления бетона и арматуры равны: $f_{cd} = 17,1/1,5 = 11,4 \text{ МПа}$; $f_{yd} = 429,7/1,15 = 373,7 \text{ МПа}$. Характеристики арматуры в сжатой зоне (A_{s2}) и геометрические параметры поперечного сечения принимаем равными параметрическим значениям: $f_{yd} = 390/1,15 = 339 \text{ МПа}$; $c_1 = 36 \text{ мм}$. В результате расчета по деформационной модели расчетное сопротивление изгибу элемента равно $M_{Rd} = 120 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Критерий проверки предельных состояний несущей способности *не удовлетворяется*. Результаты расчета приведены на рис. 4.

Выполним проверочный расчет на 4-м оценочном уровне с использованием нелинейного расчета по деформационной модели, и выполняя калибровку частных коэффициентов безопасности для бетона и арматуры в соответствии с СП [12]. Частный коэффициент безопасности для материалов определяем по формуле:

$$\gamma_M = \gamma_{Rd,1} \cdot \gamma_{Rd,2} \cdot \gamma_m, \quad (4)$$

где γ_{Rd} — частные коэффициенты, учитывающие неопределенности расчетной модели сопротивления ($\gamma_{Rd,1}$) и геометрические неопределенности ($\gamma_{Rd,2}$), принимаем равными: для бетона — $\gamma_{Rd,1} = 1,1$; $\gamma_{Rd,2} = 1,1$; для арматуры — $\gamma_{Rd,1} = 1,025$; $\gamma_{Rd,2} = 1,05$;

γ_m — частный коэффициент, учитывающий изменчивость свойств материала (γ_m), вычисляем по формуле:

$$\gamma_m = \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot V_x)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot \beta_t \cdot V_x)} \quad (5)$$

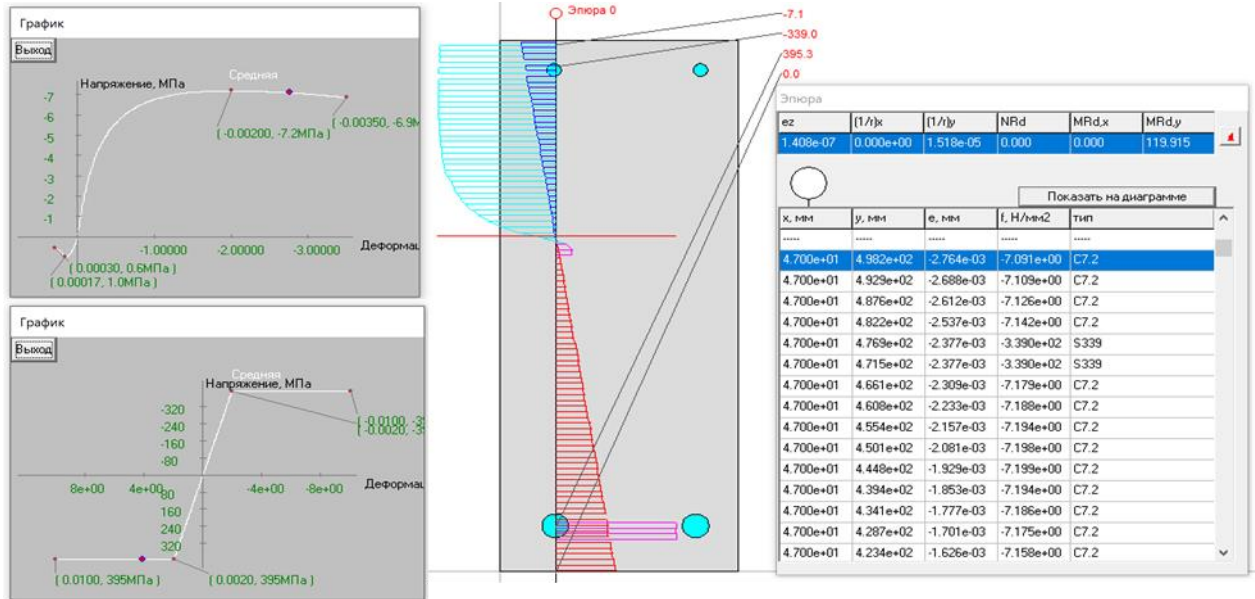


Рис. 4. Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения на 3-м уровне:

(цифры на выносных линиях — напряжения в МПа) (синим и красным цветом — относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, напряжений)

Fig. 4. The results of calculating the parameters of the stress-strain state of the cross section at level 3:

(the numbers on the outrigger lines are stresses in MPa) (blue and red are relative deformations, respectively, in compressed and stretched zones: blue and pink — similarly, tension)

Целевой индекс надежности ($\beta_{tag,saf}$) для класса последствий отказа СС2 для балок покрытия площадью $A_{col} = 980 \text{ м}^2$ и планируемого срока эксплуатации (до очередного обследования) $t_{ref} = 10$ лет определяем из условия:

$$\beta_{o,t} = -\Phi^{-1} \left(\frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)}{0,05} \cdot t_{ref} \right) =$$

$$= -\Phi^{-1} \left(\frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot 980^{0,5} - 1)}{0,05} \cdot 10 \right) = \Phi^{-1}(0,075) = 1,83 \quad (6)$$

Значения частного коэффициента, учитывающего изменчивость свойств материалов, вычисляем по формуле (5):

для бетона: $\gamma_m = \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,11)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,11)} = \frac{0,819}{0,798} = 1,03$;

для арматуры: $\gamma_m = \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,066)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,066)} = \frac{0,891}{0,879} = 1,014$.

Для арматуры (A_{s2}), в сжатой зоне балок которой не производились испытания, принимаем коэффициент вариации 5%. Тогда:

$$\gamma_m = \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,05)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,05)} = \frac{0,918}{0,908} = 1,01$$

$$\gamma_s = 1,025 \cdot 1,05 \cdot 1,01 = 1,09.$$

Для выполнения расчета по деформационной модели на 4-м уровне с учетом откалиброванных коэффициентов расчетное сопротивление бетона равно: $f_{cd} = 17,7/1,25 = 14,16$ МПа; арматуры: (A_{s1}) — $f_{yd} = 429,7/1,09 = 394$ МПа; (A_{s2}) — $400/1,09 = 367$ МПа. Измеряемые при обследовании геометрические параметры принимаем равными их средним значениям. Расчетный изгибающий момент изгибаемого элемента равен $M_{Rd} = 127,84$ кН·м $< M_{Ed} = 130$ кН·м — условие безопасности не удовлетворяется. Результаты расчета приведены на рис. 5.

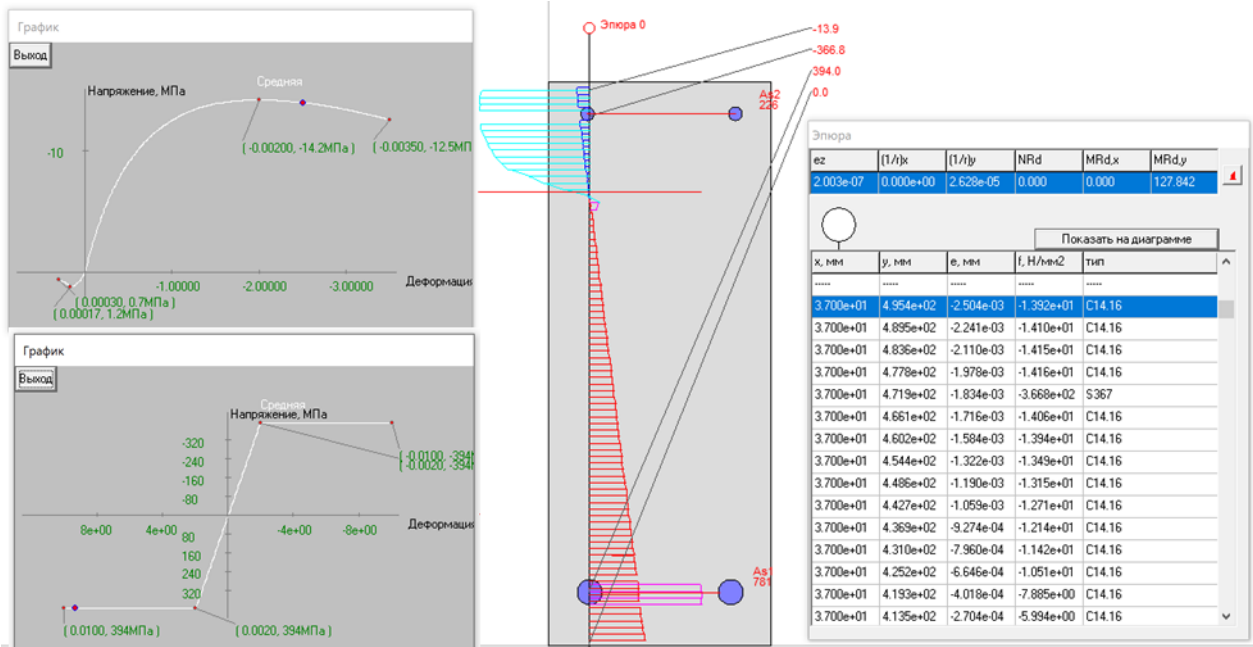


Рис. 5. Результаты расчета предельного изгибающего момента и параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения на 4-м уровне:

(цифры на выносных линиях — напряжения в МПа) (синим и красным цветом — относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, напряжений)

Fig. 5. The results of the calculation of the limiting bending moment and the parameters of the stress-strain state of the cross section at level 4:

(the numbers on the outrigger lines are stresses in MPa) (blue and red are relative deformations, respectively, in compressed and stretched zones: blue and pink — similarly, tension)

Выполним вероятностную оценку надежности конструкций перекрытия в соответствии с СП [12]. Проверка предельного состояния несущей способности на основе вероятностных методов включает прямой расчет индекса надежности (вероятности отказа) и сравнение его с целевым значением, вычисленным по формуле (6) для площади перекрытия 980 м^2 на период времени отнесения отказа $t_{ref} = 10$ лет. При описании измеряемых при обследовании базисных переменных (табл. 1) было принято логнормальное распределение. Для неизмеряемых при обследовании геометрических размеров и сопротивления верхней арматуры также принимаем логнормальное распределение с коэффициентами вариации: для сопротивления верхней арматуры $0,03$; для диаметра и толщины ее защитного слоя (расстояния от верхней грани до центра тяжести стержня) $0,02$. В функции состояния $g(X)$ расчетный изгибающий момент от сочетания нагрузок в критическом сечении обследуемых балок принимали как детерминистическую величину ($M_{Ed} = 130$ кН·м). Индекс надежности, полученный вероятностным расчетом, составил $\beta = 2,5 > \beta_{o,t} = 1,83$ — критерий надежности при проверке предельных состояний несущей способности *выполняется*. Усиления балок перекрытия не требуется, необходимо выполнить ремонтные работы по очистке арматуры от коррозии и восстановлению защитного слоя бетона. После 10 лет эксплуатации требуется обследование конструкций с оценкой надежности на очередной период отнесения. Исходные данные и результаты расчета приведены на рис. 6.

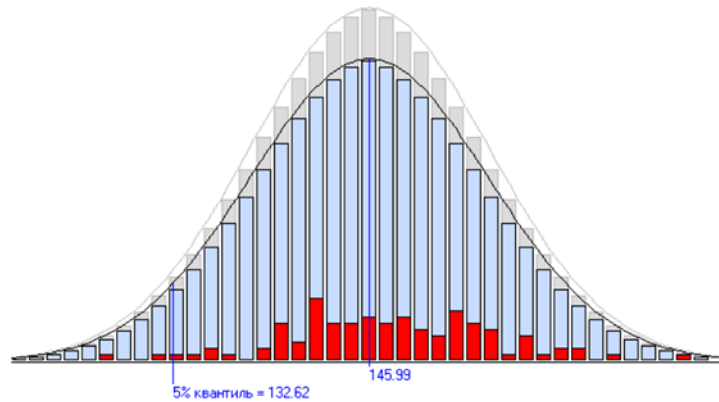
Поперечное сечение		Усилия: I группа предельных состояний			II группа предельных состояний			Обеспеченность оценок 95 %	
Исх. дан. расч. прогиба		Изгибающий момент	Усилие продольного сжатия	Коэф. вариаций по нагрузке	Изгибающий момент	Усилие продольного сжатия	Объем эксперимента	Вероятность разрушения = 2.5%	Индекс надежности $\beta = 2.50$
Прочность бетона на сжатие, МПа	Предел текучести арматуры As1, МПа	Предел текучести арматуры As2, МПа	Диаметр арматуры As1, мм	Диаметр арматуры As2, мм	Защитный слой с арматуры As1, мм	Защитный слой с1 арматуры As2, мм	Предварительное напр арматуры As1, мм	Предварительное напр арматуры As2, мм	Тестовый параметр
<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично	<input type="checkbox"/> Логнормальный <input type="checkbox"/> Таблично	<input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный <input type="checkbox"/> Таблично	<input type="checkbox"/> Логнормальный <input checked="" type="checkbox"/> Таблично
20.6 21.6 19.7 19.5 21.1 21.3 23.6 23.5 22.5 20.0 20.2 19.6 20.3 22.5 20.5	467 465 473 481.7 475 492 500		22.3 22.2 22.1 23.0 22.0 22.5 22.4 22.8 22.7 22.6 22.1 22.0 21.9 22.0 21.9	42.7 42.8 44.0 43.4 44.0 44.1 43.7 43.2 42.8 44.1 43.5 43.2 43.4 44.15 43.5					
гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма	гистограмма
<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> <input type="checkbox"/> По классу С30/37 коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> <input type="checkbox"/> По классу С330 коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> По классу S400 коэффициент вариации, %: 3	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Параметрически среднее: 12 коэффициент вариации, %: 2	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Параметрически среднее: 36 коэффициент вариации, %: 2	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: <input type="text"/> коэффициент вариации, %: <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Параметрически среднее: 0 коэффициент вариации, %: <input type="text"/>
m = 21.10 s = 1.37 m95 = 20.34 s95 = 2.24 x0.05 = 16.66	m = 479.00 s = 12.95 m95 = 467.02 s95 = 30.80 x0.05 = 416.36	m = 420.76 s = 12.62 m95 = 420.76 s95 = 12.62 x0.05 = 400.00	m = 22.30 s = 0.35 m95 = 22.11 s95 = 0.57 x0.05 = 21.16	m = 12.00 s = 0.24 m95 = 12.00 s95 = 0.24 x0.05 = 11.61	m = 43.50 s = 0.49 m95 = 43.22 s95 = 0.80 x0.05 = 41.90	m = 36.00 s = 0.72 m95 = 36.00 s95 = 0.72 x0.05 = 34.82	m = 0.00 s = 0.00 m95 = 0.00 s95 = 0.00 x0.05 = 0.00	m = 0.00 s = 0.00 m95 = 0.00 s95 = 0.00 x0.05 = 0.00	
Расчет	Функция предельного состояния по изгибающему моменту			Распределение прогиба элемента с трещинами			Распределение момента трещинообразования		
GRID-расчет	Функция предельного состояния по продольному усилию			Распределение ширины раскрытия трещины			Тест генератора	Тест логнормального	

a

Функция предельного состояния, кНм

Параметры нормального распределения

$m = 147.37$
 $s = 6.96$
 $\mu = 145.99$
 $\sigma = 8.13$
 $qnorm(0.05) = 132.62$
 $qnorm(0.001) = 120.87$
 $COV = 5.57\%$
 $\chi^2_{набл.} = 9592.24$
 $\chi^2_{крит.} = 53.38$



b

Рис. 6. Результаты расчета предельного изгибающего момента и параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения (на 5-м уровне) при параметрах свойств материалов: *a* — средних; *b* — характеристических (цифры на выносных линиях — напряжения в МПа) (синим и красным цветом — относительные деформации соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым — аналогично, напряжений)
Fig. 6. Initial data and results of the probabilistic calculation of the reliability index of coating structures at level 5: *a*; *b* — distribution of the maximum bending moment

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка безопасности эксплуатируемых конструкций существенно отличается от принципов проектирования новых конструкций. Предложенная 5-уровневая система оценки надежности существующих конструкций при незначительных трудозатратах в процессе обследования и поверочных расчетах позволит сократить экономические затраты на поддержание строительных конструкций в безопасном состоянии длительное время.

На примере изгибаемой балочной конструкции продемонстрирована возможность поэтапного снижения неопределенностей расчетной модели сопротивления при учете фактической изменчивости физическо-механических и геометрических характеристик свойств конструкций. Общая стратегия оценки надежности предусматривает также учет фактической изменчивости воздействий на существующие конструкции и оценку пригодности к нормальной эксплуатации, для чего проводятся дальнейшие исследования. Однако предложенная многоуровневая система оценок позволяет принять обоснованные решения о необходимости выполнения усиления, особенно в тех случаях, когда конструкция не имеет значимых дефектов, а результаты расчетов по действующим нормам показывают, что она уже на грани разрушения. Безусловно, как и в случае проектирования новых конструкций, проектировщик или обследователь вряд ли будет прибегать к полностью вероятностному моделированию, но вероятностный метод может быть использован для калибровки частных коэффициентов, когда речь идет об ответственных и значимых объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Diamantidis D., Tanner P., Holicky M., Sykora M.* On reliability assessment of existing structures // *Structural Safety*. 2025. Vol. 113. Pp. 345–358.
2. *Koker N. De, Viljonen C., Lenner R., Jacobsz S.W.* Updating structural reliability using load measurement // *Structural Safety*. 2020. Vol. 84. P. 101939.
3. *Leque J., Straub D.* Reliability analysis and updating of deteriorating systems with dynamic Bayesian network // *Structural Safety*. . 2016. Vol. 62. Pp. 34–46.
4. ТР 2009/013/ВУ*. Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность // Госстандарт Республики Беларусь. Минск, 2015. 25 с.
5. СТБ ISO 13822–2017. Основы проектирования конструкций. Оценка существующих конструкций // Госстандарт Республики Беларусь. Минск, 2017. – 40 с.
6. СТБ ISO 2394–2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы // Госстандарт Республики Беларусь. Минск, 2008. 65 с.
7. СН 2.01.01–2022. Основы проектирования строительных конструкций // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2022. 60 с.
8. Final Draft fib Model Code for Concrete Structures. Federal Institute of Technology Lausanne — EPEL. 2023. P. 853.
9. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. The British Standard Institution. Brussels, 2023.
10. *Тур В.В., Яловая Ю.С.* Применение теории нечетких множеств при оценивании технического состояния конструкции по характерным дефектам для реального строительного объекта // *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2014. № 1. С. 136–139.
11. *Дереченник С.С., Тур В.В.* Новый подход к оцениванию IN-SITU характеристической прочности бетона в существующих железобетонных конструкциях при ограниченном количестве результатов полевых испытаний // *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2018. № 1. С. 109–115.
12. СП. Обследование и усиление бетонных и железобетонных конструкций (проект) // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2023. 106 с.
13. СП 1.04.03–2023. Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2023. 106 с.
14. СП 13-102–2003. Свод правил по проектированию и строительству. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М., 2003.
15. СН 1.04.01–2020. Техническое состояние зданий и сооружений // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2021. 68 с.

16. ТКП 45-1.04-37–2008*. Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2021. 39 с.
17. Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01–84*. Усиление железобетонных конструкций // ГП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 1998. 190 с.
18. СП 5.03.01–2020. Бетонные и железобетонные конструкции // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2020. 236 с.
19. СН 2.01.02–2019. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2020. 33 с.
20. СН 2.01.04–2019. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2020. 36 с.
21. СН 2.01.05–2019. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2020. 120 с.
22. СН 2.01.06–2019. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Температурные воздействия // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2020. 27 с.
23. СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции // Гос. комитет СССР по делам строительства. М., 1985. 77 с.
24. СН 3.02.07–2020. Объекты строительства. Классификация // РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2021. 7 с.
25. Дереченник С.С., Тур В.В. Оценка соответствия прочности бетона: теория и практика : монография // Министерство образования Республики Беларусь. Учреждение образования «Брестский государственный технический университет». Брест : БрГТУ, 2023. С. 152–156.
26. СТБ EN 13791–2012. Оценка фактической (*in-situ*) прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона. Минск : РУП «Стройтехнорм», 2012.
27. Tur V.V., Derechennik S.S. Non-parametric evaluation of characteristic in-situ concrete compressive strength // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 27. No. 1 (1). Pp. 1003–1021.
28. Себешев В.Г. Расчет надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безопасности // Известия ПГУС. 2017. № 1. С. 165–172.

REFERENCES

1. Diamantidis D., Tanner P., Holicky M., Sykora M. On reliability assessment of existing structures. *Structural Safety*. 2025; 113:345-358.
2. Koker N. De, Viljonen C., Lenner R., Jacobsz S.W. Updating structural reliability using load measurement. *Structural Safety*. 2020; 84:101939.
3. Leque J., Straub D. Reliability analysis and updating of deteriorating systems with dynamic Bayesian network. *Structural Safety*. 2016; 62:34-46.
4. TR 2009/013/BY*. Technical Regulations of the Republic of Belarus. Buildings and structures, construction materials and products. Safety. Gosstandart of the Republic of Belarus. Minsk, 2015; 25.
5. STB ISO 13822–2017. Fundamentals of design of structures. Evaluation of existing structures. Gosstandart of the Republic of Belarus. Minsk, 2017; 40.
6. STB ISO 2394–2007. Reliability of building structures. General principles. Gosstandart of the Republic of Belarus. Minsk, 2008; 65.
7. CN 2.01.01–2022. Fundamentals of building structures design. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2022; 60.
8. Final Draft fib Model Code for Concrete Structures. Federal Institute of Technology Lausanne — EPEL. 2023; 853.
9. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. The British Standard Institution. Brussels, 2023.
10. Tur V.V., Yalovaya Y.S. Application of the theory of fuzzy sets in estimating the technical state of the structure by characteristic defects for a real construction object. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture*. 2014; 1:136-139. (in Russian).
11. Derechennik S.S., Tur V.V. A new approach to the IN-SITU estimation of the characteristic strength of concrete in the existing reinforced concrete structures with a limited number of field test results. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and architecture*. 2018; 1:109-115. (in Russian).
12. SP. Inspection and Reinforcement of Concrete and Reinforced Concrete Structures (draft). RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2023; 106.
13. SP 1.04.03–2023. Inspection and strengthening of stone and reinforced stone structures. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2023; 106.

14. SP 13-102–2003. Code of rules for design and construction. Rules of inspection of load-bearing structures of buildings and constructions. Moscow, 2003.
15. SN 1.04.01–2020. Technical condition of buildings and structures. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2021; 68.
16. TKP 45-1.04-37–2008*. Inspection of building structures of buildings and constructions. Order of carrying out. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2021; 39.
17. Manual P1-98 to SNiP 2.03.01–84*. Reinforcement of reinforced concrete structures. State Enterprise “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 1998; 190.
18. SP 5.03.01–2020. Concrete and reinforced concrete structures. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2020; 236.
19. SN 2.01.02–2019. Impacts on structures. General impacts. Volume weight, dead weight, functional loads for buildings. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2020; 33.
20. CN 2.01.04–2019. Impacts on structures. General impacts. Snow loads. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2020; 36.
21. SSN 2.01.05–2019. Impacts on structures. General impacts. Wind impacts. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2020; 120.
22. SN 2.01.06–2019. Impacts on structures. General impacts. Temperature effects. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2020; 27.
23. SNiP 2.03.01–84*. Concrete and reinforced concrete structures. USSR State Committee for Construction. Moscow, 1985; 77.
24. SN 3.02.07–2020. Construction objects. Classification. RUE “Stroytekhnorm” of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2021; 7.
25. Derechennik S.S., Tur V.V. Estimation of concrete strength conformity: theory and practice : monograph. *Ministry of Education of the Republic of Belarus. Educational Institution “Brest State Technical University”*. Brest, Brest State Technical University, 2023; 152-156. (in Russian).
26. STB EN 13791–2012. Estimation of actual (*in-situ*) compressive strength of structures and elements of precast concrete.– Minsk, RUE “Stroytekhnorm”, 2012.
27. Tur V.V., Derechennik S.S. Non-parametric evaluation of characteristic in-situ concrete compressive strength. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27:1(1):1003-1021.
28. Sebeshev V.G. Calculation of reliability of structures and constructions by polycriteria and generalized safety conditions. *Izvestiya PSUS*. 2017; 1:165-172. (in Russian).