

# Железобетонные конструкции

2025 Том 9 № 1

Научно-технический журнал

Издается с 2023 г.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 – 83679 от 26 июля 2022 г.

выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Периодичность: 4 выпуска в год.

Языки: русский, английский.

Научно-технический журнал «Железобетонные конструкции» знакомит читателей с актуальными проблемами и исследованиями в области создания и совершенствования рациональных типов железобетонных конструкций, методов их расчета, а также эксплуатации и конструкционной безопасности.

Девиз научно-технического журнала «Железобетонные конструкции»: «Живучесть без компромиссов!»

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Тамразян А.Г., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Акимов П.А., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ректор НИУ МГСУ, Москва, Россия

Тер-Мартirosян А.З., д-р техн. наук, профессор, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Дадаян Т.Л., д-р техн. наук, профессор, НУАСА, Ереван, Армения

Дуйнхэржав Я., д-р техн. наук, проф., Университет науки и технологий, Улан-Батор, Монголия

Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

Кабанцев О.В., д-р техн. наук, профессор, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Каприелов С.С., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИЖБ А.А. Гвоздева, Москва, Россия

Карпенко Н.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ РААСН, Москва, Россия

Келасев Н.Г., канд. техн. наук, АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия

Колчунов В.И., академик РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

Крылов С.Б., академик РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИЖБ А.А. Гвоздева, Москва, Россия

Люблинский В.А., канд. техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

Маилян Л.Р., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Меркулов С.И., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., КГУ, Курск, Россия

Морозов В.И., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

Селяев В.П., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Смоляго Г.А., д-р техн. наук, проф., БГТУ им. В.Г. Шухова

Травуш В.И., академик РААСН, д-р техн. наук, профессор, ЗАО «Горпроект», Москва, Россия

Федоров В.С., акад. РААСН, д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва, Россия

### ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Савин С.Ю., канд. техн. наук, доцент, НИУ МГСУ, Москва, Россия

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Тамразян А.Г. Методология теоретических основ живучести строительных систем ..... 3

Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю. Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных балок ..... 18

Мамин А.Н., Хлебников С.К. Использование композитной полимерной арматуры в бетонных конструкциях, подверженных динамическим воздействиям ..... 26

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Захаров Ф.Н., Цянь Цзе, Сюй И. Физически-информированные нейронные сети для задач строительной механики и конструкций: моделирование прогиба однопролетной балки ..... 35

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О. Оценка безопасности эксплуатируемых железобетонных конструкций по нормам Республики Беларусь ..... 49

Редактор Савин С.Ю.

Дизайн обложки: Тамразян Г.А.

Компьютерная верстка: Домарова Е.В.

### Адрес редакции:

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел. +7 (495) 287-49-14, доб. 3036; e-mail: [em@gbk-journal.ru](mailto:em@gbk-journal.ru)

Подписано в печать 28.03.2025. Выход в свет 31.03.2025. Формат 70×108/16

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 6,13. Тираж 120 экз. Заказ № 124. Цена свободная.

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ

Российская федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.

**Reinforced Concrete Structures***Zhelezobetonnyye konstruksii***2025 Vol. 9 Issue 1**

Scientific and Technical Journal

Published since 2023

Moscow State University of Civil Engineering

Media Registration Certificate of the Printed Edition No. FS 77 – 83679 dated 26 July 2022

Issued by the Federal Service for Supervision of Compliance with Legislation in the Field of Mass Communications and Heritage Protection

Published 4 issues per year.

Languages: Russian, English.

Scientific and technical journal “*Reinforced Concrete Structures*” introduces readers to current issues and research in the development and improvement of rational types of reinforced concrete structures, methods of their calculation, as well as operation and structural safety.

**The motto of the scientific and technical journal “*Reinforced Concrete Structures*” (*Zhelezobetonnyye konstruksii*):**

**“Vulnerability without compromise!”**

**EDITORIAL BOARD****EDITOR-IN-CHIEF**

**Ashot G. Tamrazyan**, corresponding member of RAACS, DSc, Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

**Pavel A. Akimov**, full member of RAACS, DSc, Prof., Rector of NRU MGSU, Moscow, Russia

**Armen Z. Ter-Martirosyan**, DSc, Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**Dadayan T.L.**, DSc, Prof., NUASA, Yerevan, Armenia

**Duinherzhav Ya.**, DSc., Prof., University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

**Erofeev V.T.**, full member of RAACS, DSc, Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**Oleg V. Kabantsev**, DSc., Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**Semen S. Kaprielov**, full member of RAACS, DSc., Prof., NIIZhB A.A. Gvozdev, Moscow, Russia

**Nikolay I. Karpenko**, full member of RAACS, DSc, Prof., NIISF RAACS, Moscow, Russia

**Nikolay G. Kelasiev**, Ph.D., JSC “TsNIIPromzdaniy”, Moscow, Russia

**Vitaly I. Kolchunov**, full member of RAACS, DSc, Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**Sergey B. Krylov**, full member of RAACS, DSc., Prof., NIIZhB A.A. Gvozdev, Moscow, Russia

**Valeriy A. Lyublinsky**, Ph.D. tech. Sciences, Prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**Levon R. Mailyan**, full member of RAACS, DSc., Prof., DSTU, Rostov-on-Don, Russia

**Sergey I. Merkulov**, corresponding member of RAACS, DSc., Prof., KSU, Kursk, Russia

**Valeriy I. Morozov**, corresponding member of RAACS, DSc., Prof., SPbGASU, St. Petersburg, Russia

**Vladimir P. Selyaev**, full member of RAACS, DSc, Prof., Mordovia State University named after N.P. Ogareva, Saransk, Russia

**Gennadiy A. Smolyago**, DSc., Prof., BSTU named after V.G. Shukhov

**Vladimir I. Travush**, full member of RAACS, DSc, Prof., CJSC “Gorproekt”, Moscow, Russia

**Victor S. Fedorov**, full member of RAACS, DSc., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

**MANAGING EDITOR**

**Sergey Yu. Savin**, Ph.D., associate prof., NRU MGSU, Moscow, Russia

**CONTENTS****THEORY OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE**

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tamrazyan A.G.</i> Methodology of Theoretical Bases of Robustness of Building Systems .....                             | 3  |
| <i>Zamaliyev F.S., Filippov D.Yu.</i> Numerical and Experimental Investigations of Prestressed Steel-Concrete Beams .....  | 18 |
| <i>Mamin A.N., Khlebnikov S.K.</i> Use Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete Structures Subject to Dynamic Loads ..... | 26 |

**COMPUTER MODELLING IN CONSTRUCTION**

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Zakharov F.N., Qian Jie, Xu Yi.</i> Physics-Informed Neural Networks for Structural Mechanics and Construction: Modeling the Deflection of a Single-Span Beam Physics-Informed Neural Networks ..... | 35 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**STRUCTURAL DESIGN**

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Lazousky D.N., Tur V.V., Glukhov D.O.</i> Safety Assessment of Existing Reinforced Concrete Structures According to the Standards of the Republic of Belarus ..... | 49 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**Copy Editor:** Sergei Yu. Savin

**Cover Design:** George A. Tamrazyan

**Layout Designer:** Ekaterina V. Domarova

**Editorial Address:**

Moscow State University of Civil Engineering

26 Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation, tel.: +7 (495) 287-49-14, additional 3036; e-mail: [em@gbk-journal.ru](mailto:em@gbk-journal.ru)

Printing run 120 copies. Open price.

Moscow State University of Civil Engineering

26 Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation, tel.: +7 (495) 287-49-14, additional 3036; e-mail: [em@gbk-journal.ru](mailto:em@gbk-journal.ru)

Printed at Publishing House MISI – MGSU

Building 8, 26 Yaroslavskoe highway, Moscow, Russian Federation, 129337, tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.



УДК 624.3.019.32

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.3-17

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Методология теоретических основ живучести строительных систем

А.Г. Тамразян<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

\* tamrazian@mail.ru

**Ключевые слова:** строительные системы, живучесть, надежность, повреждающий фактор, прогрессирующее разрушение, работоспособность, отказоустойчивость

### История статьи

Поступила в редакцию: 02.02.2025

Доработана: 22.02.2025

Принята к публикации: 27.02.2025

### Для цитирования

Тамразян А.Г. Методология теоретических основ живучести строительных систем // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 3–17.

**Аннотация.** Объекты строительства являются результатом глубоких научных разработок и обладают функциями, качествами и свойствами, которые изучаются и уточняются на протяжении их эксплуатации. Несмотря на высокие стандарты обеспечения безопасности зданий различного назначения, отмечается неуклонный рост числа и тяжести аварий различного происхождения. Происходит качественное изменение угроз, в частности военных, которые по масштабам сравнимы с природными стихийными бедствиями. Повышение требований к их безопасности в настоящее время вошло в противоречие с обеспечивающими эти требования материально-техническими, финансовыми и научно-методическими ресурсами. Статистика крупных аварий и катастроф свидетельствует о том, что возможности парирования угроз, несмотря на достижения научно-технического прогресса, оказались или ограниченными, или фактически исчерпанными. Указанные обстоятельства требуют пересмотра традиционных подходов к проблеме и приводят к формулировке новых концепций и представлений в области безопасности. Основное внимание уделяется конструкционным аспектам, определяющим общий уровень безопасности строительных систем.

Наиболее разработанными в научном плане являются задачи оценки и обеспечения прочности, ресурса и надежности конструкций, задачи же обеспечения защищенности, живучести и оценки риска требуют дальнейшего научного развития.

## Methodology of Theoretical Bases of Robustness of Building Systems

A.G. Tamrazyan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

\* tamrazian@mail.ru

**Keywords:** building systems, robustness, reliability, damage factor, progressive collapse, performance, failure tolerance

**Abstract.** Building objects are the result of in-depth scientific research and have functions, qualities and properties that are learnt and refined during their operation. Despite the high standards of safety of buildings for various purposes, there is a steady increase in the number and severity of accidents of various origins.

**Ашот Георгиевич Тамразян**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2025



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

#### Article history

Received: 02.02.2025

Revised: 22.02.2025

Accepted: 27.02.2025

#### For citation

Tamrazyan A.G. Methodology of Theoretical Bases of Robustness of Building Systems. *Reinforced concrete structures*. 2025; 1(9):3-17.

There is a qualitative change in threats, in particular military threats, which are comparable in scale to natural disasters. Increasing requirements to their safety are now in contradiction with the material, technical, financial and scientific-methodological resources that ensure these requirements. The statistics of major accidents and disasters shows that despite the achievements of scientific and technological progress, the possibilities of threat parity have either been limited or actually exhausted. These circumstances require a revision of traditional approaches to the problem and have led to the formulation of new concepts and ideas in the field of safety. The main attention is paid to structural aspects that determine the overall level of safety of building systems. The most scientifically developed are the tasks of assessing and ensuring the strength, service life and reliability of structures, while the tasks of ensuring safety, robustness and risk assessment require further scientific development.

## ВВЕДЕНИЕ

К числу особо важных и широко исследуемых свойств строительных систем относятся надежность и безопасность [1]. Безопасность строительных систем рассматривается как комплексное свойство, оцениваемое функционалом  $S(t)$ , включающим расчетно-экспериментальные характеристики прочности  $F(t)$ , ресурса  $N(t)$ , надежности  $P(t)$ , защищенности  $Z(t)$ , живучести  $L(t)$  и риска  $R(t)$  [2]:

$$S(t) = \{F(t), N(t), P(t), Z(t), L(t), R(t)\}. \quad (1)$$

В последние годы существенно возрос интерес к проблеме обеспечения живучести (robustness) строительных конструкций в особых расчетных ситуациях. До недавнего времени термин «живучесть» использовался, в основном, применительно к объектам машиностроения и ряду инженерных систем (например, систем тепло-, газо- и электроснабжения, военной техники, самолетов, кораблей и т.д.). При этом под живучестью понимали «свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов» [3].

Определение свойства живучести конструкции введено в Еврокоде [4]. В соответствии с этим живучесть — свойство конструкции противостоять таким событиям, как пожар, взрыв, удар или результат человеческих ошибок, без возникновения повреждений, которые были бы непропорциональны причине, вызвавшей повреждения. И в соответствии с Еврокодом [4] одной из стратегий для ограничения масштабов локального разрушения является применение расчетных и конструктивных правил, обеспечивающих приемлемую живучесть конструкции.

К этой проблеме непосредственно примыкает обеспечение устойчивости конструкции зданий и сооружений к «прогрессирующему» разрушению при запроектных аварийных воздействиях [5, 6]. Под «прогрессирующим» обрушением понимается «последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей» [2].

Внесение в технические нормативно-правовые акты положений о необходимости учета при проектировании этой проблемы вызывает у некоторых специалистов возражения. Эти возражения, в основном, сводятся к тому, что потребуются значительное увеличение материало-емкости конструкций.

*Ashot G. Tamrazyan*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

Во время эксплуатации строительной системы возможно ненормативное (экстремальное, аварийное и т.п.) возрастание нагрузок или чрезвычайно быстрый рост повреждений. В этих условиях эксплуатационные качества конструкции определяются ее живучестью, т.е. способностью оказывать сопротивление внешним силам, когда несколько элементов системы выйдут из строя. Системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность. Поэтому всегда имеется время для их ремонта. Системы с малой живучестью разрушаются катастрофически, что зачастую сопровождается большими материальными потерями и гибелью людей.

Следовательно, при проектировании конструкций, строительных систем необходимо учитывать экстремальные ситуации и прогнозировать живучесть систем, находя затем конструктивные решения для повышения их живучести, чтобы избежать катастрофических разрушений.

Основная причина сложности данной проблемы заключается в невозможности обеспечения абсолютной защиты конструкций. Как следствие, дискуссию вызывают следующие вопросы:

- как назначать требуемый уровень надежности для сооружения в особых расчетных ситуациях?
- какие виды и параметры особых воздействий необходимо учитывать при проектировании объектов?

Несмотря на актуальность проблемы живучести, в настоящее время отсутствуют соответствующие методики и расчеты живучести конструкций. В рамках данной статьи сделана попытка формализовать задачу живучести и разработать методические положения для ее решения.

В результате действия экстремальных нагрузок, накопления повреждений, деградации материала и тому подобных причин уменьшается способность строительной системы сопротивляться внешним воздействиям.

Живучесть — это свойство строительной системы, определяющее ее способность сохранять по крайней мере ограниченную несущую способность при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению (уменьшению) ее несущей способности и стойкости к прогрессирующему обрушению.

Поиск путей обеспечения живучести строительных объектов различного назначения требует постановки и решения ряда научно-технических задач синтеза живучих строительных систем на этапах их проектирования, строительства и эксплуатации. Отмеченное иллюстрирует технико-экономический аспект актуальности освоения и внедрения в практику теоретических основ живучести строительных систем.

Значительный вклад в разработку вопросов теории живучести различных, в том числе строительных, систем различного назначения внесли работы В.О. Алмазова [7], В.И. Колчунова [8], В.Ф. Крапивина [9], Н.В. Федоровой [10], Ю.И. Кудишина [11], М. Парфенова [12], Б.С. Расторгуева [13], И.А. Рябикина [14], Н.Н. Трекина [15], Б.С. Флейшмана [16], а также зарубежных ученых [17–20] и др.

Анализ этих и других работ позволяет отметить тенденцию постепенного перехода в оценке показателей живучести строительных систем к более совершенным, основанным на моделях с учетом структурных, функциональных факторов.

С учетом опыта представления теоретических основ различных свойств строительных систем, таких как надежность, безопасность и т.п., разработка данной статьи подчинена освещению методологии исследования и формирования теоретических основ живучести строительных систем.

## МЕТОД

### 1. Основные понятия, определения и допущения

Теория живучести строительных систем проходит стадию становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину. В связи с этим в специальной и методической литературе по данному предмету наблюдается многообразие вариантов определений и терминов, составляющих структуру складывающейся теории. Кроме многообразия, наблюдаются и признаки некоторых понятий.

Отмеченное положение вынуждает кратко рассмотреть и изложить систему понятий и определений в теоретических основах живучести с учетом их популярности среди специалистов, максимального приближения к физическому смыслу и потребностей новых разработок.

Под *теорией живучести* будем понимать комплекс научных знаний о закономерностях сохранения строительной системой определенного качества при повреждении ее элементов и о способах обеспечения данного свойства.

Согласно ГОСТу [3], *повреждение* — событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации.

Повреждения могут быть существенными, приводящими к изменению состояния элементов, и несущественными. Будем в дальнейшем учитывать только существенные повреждения.

Элементы системы могут находиться в двух состояниях: работоспособном ( $r$ ) и неработоспособном ( $\bar{r}$ ).

Переход состояний элементов возможен в обоих направлениях:

- $r \rightarrow \bar{r}$  — при повреждении элемента;
- $r \leftarrow \bar{r}$  — при восстановлении его работоспособности.

Повреждения являются следствием:

- аварий;
- боевых (террористических) воздействий;
- условий внешней среды;
- эксплуатации.

Для удобства изложения общих вопросов теоретических основ живучести строительных систем введем понятие «*повреждающий фактор*» (ПФ) — определенный вид внешнего воздействия, параметры которого превышают значения, на которые рассчитан элемент строительной системы при его проектировании.

Свойство элемента сохранять состояние работоспособности при воздействии ПФ будем называть стойкостью. Ясно, что при наличии временной избыточности стойкость элемента может обеспечиваться не только его защитой или упрочением, но и восстановлением работоспособности.

Под *эксплуатационной средой* будем понимать совокупность параметров ПФ, воздействующих на элементы системы как природного, так и техногенного происхождения.

С повреждениями элементов систем тесно связано понятие *ущерба*, который характеризуется людскими, материальными потерями. В задачах исследования и оптимизации систем по критерию живучести пользуются терминами «предельный ущерб» (наибольший допустимый) и «предотвращенный ущерб» (величина, на которую уменьшается ущерб за счет восстановительных мер).

Подход к формализации состояний систем в теории живучести существенно отличается от принятого в теории надежности. Требование работоспособности, принятое в исследованиях систем на надежность [21], слишком жесткое для оценок свойства живучести. Легко допустить, что системы, утратившие работоспособность, т.е. соответствие по всем параметрам требованиям норм, могут располагать остаточными возможностями. Следовательно, на множестве отказов, с точки зрения надежности,

могут быть выделены состояния, допускающие решение системой задачи стойкости к прогрессирующему разрушению с заданной эффективностью. Назовем эти состояния *состояниями способности*.

Такой подход дает возможность рассматривать системы в двух состояниях — способности ( $c$ ) и неспособности ( $\bar{c}$ ).

Итак, при воздействии ПФ часть элементов системы неизбежно получит повреждения. Возникает вопрос — сохранит ли система состояние способности решить задачу стойкости к прогрессирующему разрушению? На этот вопрос дает ответ теория живучести, в основе которой лежит определение данного свойства, и существует большое многообразие определений живучести [9, 14, 22–26].

Рассмотрение вариантов определений, распространенных в кораблестроении, самолетостроении, машиностроении и других отраслях, позволяет выделить общее, характерное свойству живучести различных систем, в том числе строительных, и сформулировать единое определение.

Общим является:

- живучесть — составляющая качества, характеризующая изменение свойств строительной системы, эксплуатирующейся в нерасчетных условиях;
- если строительная система обладает живучестью, то ее качество полностью не утрачивается при воздействии ПФ;
- если строительная система располагает резервом функционирования, то возможно полное или частичное восстановление ее способности эффективно эксплуатироваться.

С учетом отмеченных совпадений предлагается следующее определение живучести — свойство, характеризующее способность строительных систем эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) или восстанавливать данную способность.

Из определения следует, что состояние способности при воздействии ПФ строительная система может сохранить за счет внутренних потенциальных резервов (избыточностей) или в результате восстановительных мер.

В задачах исследования живучести, как следует из определения, важно иметь «механизм» идентификации состояний способности строительных систем.

## 2. Методологический аспект теоретических основ живучести строительных систем

Формирование теоретических основ живучести с учетом опыта проведения подобных исследований [27–29], а также в смежных областях [9, 30] предполагает ряд направлений научного поиска.

Последовательность формирования теоретических основ живучести строительных систем осуществляется на трех уровнях: методологическом, моделирования и оценки обеспечения живучести этих систем.

Методологический уровень, кроме определения свойства живучести систем, его характеристик и некоторых количественных мер, предполагает установление взаимосвязи данного свойства с другими свойствами систем. В конечном счете знание этой взаимосвязи позволяет обоснованно выбрать показатели живучести строительных систем.

Общность предмета исследования и «похожесть» условий, при которых изучается данный предмет в теории надежности и теории живучести, определяют необходимость выявления «зон значимости» этих научных дисциплин.

Пусть качество строительной системы характеризуется вектором параметров  $\vec{K}(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)$ , значения которых изменяются под воздействием среды. Если эти воздействия расчетные, то отклонение параметров вектора  $K$  хотя и носит случайный характер, однако прогнозируется на уровне вероятностных моделей и хорошо изучено. Пусть  $K_n$  — вектор параметров строительной системы, характеризующий ее состояние, отвечающее требованиям норм. Для избыточных

систем характерно  $K_n > K$ , что обеспечивается различными видами избыточностей ( $n$ -раз статически неопределимых). Для неизбыточных систем, очевидно,  $K_n = K$ . В случае, когда по каким-либо причинам изменяются параметры качества строительной системы, так что  $K_n < K$ , система деградирует, т.е. теряет качество.

Естественно, что процессы, сопровождающиеся изменением качества системы от  $K_n \in K$  до  $K \in K_n$ , могут протекать как в «нормальных» расчетных условиях, так и в нерасчетных. В расчетных условиях данные изменения являются следствием отказов элементов системы. При этом исследованием закономерностей, связанных с анализом и синтезом работоспособных систем, занимается теория надежности.

В том случае, когда требование сохранения строительной системой работоспособного состояния снимается полностью или заменяется требованием сохранения состояния способности, возникает необходимость в решении исследовательских задач при условии накопления отказов элементов. Свойство систем сохранять состояние способности при отказах элементов называют отказоустойчивостью. В работе [12] утверждается, что определение данного свойства строительных систем должно увязываться с состоянием их работоспособности. На взгляд авторов, это утверждение только частично характеризует свойство отказоустойчивости. Представляет научный интерес исследование динамики изменения качества строительной системы в области  $K < K_n$ .

Теоретические основы отказоустойчивости как научная дисциплина должны давать возможность для анализа и синтеза систем, способных сохранять качество на заданном уровне или допускать его восстановление при многочисленных отказах элементов.

Физический смысл свойства отказоустойчивости близок к свойству живучести строительных систем.

Отличие заключается в том, что последнее оценивается в условиях нерасчетных внешних воздействий, приводящих к отказам элементов вследствие их повреждения. Модели повреждения основываются на сопоставлении параметров, характеризующих проектную прочность и защиту элементов, с параметрами принятой в качестве стандартной модели внешнего нерасчетного воздействия ПФ. Модели отказов элементов, принятые в теории надежности и отказоустойчивости, здесь неприемлемы. В моделировании состояний способности систем, в вычислениях вероятностных функций и показателей свойств отказоустойчивости и живучести систем много общего.

Таким образом, свойства надежности, отказоустойчивости и живучести систем могут исследоваться и обеспечиваться в условиях, как показано в таблице.

Условия проявления свойств надежности, отказоустойчивости и живучести  
Conditions of occurrence of reliability, failure tolerance and survivability properties

| <div>Воздействия</div> <div>Состояния</div> | Расчетные          | Нерасчетные |
|---------------------------------------------|--------------------|-------------|
|                                             | Надежность         | Живучесть   |
|                                             | Отказоустойчивость |             |
| Работоспособности                           |                    |             |
| Способности                                 |                    |             |

Уровень методологических исследований включает также решение задачи обоснования характеристик живучести строительных систем.

Решение данной задачи предполагает учет всех составляющих качества систем, так или иначе определяющих свойство живучести, и синтезирование их в комплексные или частные характеристики.



Комплекс задач третьего уровня исследований, объединенных в блок «обеспечение свойства живучести», ориентирован на разработку теоретических основ синтезирования свойства живучести систем различных типов в ходе их совершенствования или проектирования.

Важным этапом является выбор показателя живучести систем, который в значительной степени связан с определением свойства живучести, и достаточной критичности показателя. Данный этап предполагает подробное рассмотрение взаимосвязи свойства живучести как «вверх» (к эффективности функционирования системы), так и «вниз» (к характеристикам данного свойства).

Формирование теоретических основ живучести строительных систем на уровне моделирования и оценки предполагает:

- решение задач моделирования свойства живучести строительных систем различных типов. Основу данных моделей составляют «механизмы» идентификации состояний способности строительных систем с учетом их особенностей и подход к оцениванию возможности реализации хотя бы одного из них в условиях действия ПФ;
- разработку методик количественной оценки показателей живучести систем различных типов, основанных на соответствующих моделях и подходах.

### 3. Характеристики живучести систем

Живучесть (равно как и надежность, отказоустойчивость и т.п.) является комплексным свойством. Комплексный характер данного свойства определяется тем, что оно проявляется через возможность сохранять или восстанавливать состояние способности при воздействии ПФ. Если обратиться к определению живучести, то можно заметить, что в нем содержатся два ключевых слова: «сохранять» и «восстанавливать». Эти слова, очевидно, должны составить основу для формирования списка характеристик живучести строительных систем.

Задача определения характеристик живучести сводится к описанию или дальнейшей детализации таких «характерных черт» данного свойства, как «сохранять» и «восстанавливать» состояние способности. При этом необходимо также учитывать наиболее общие требования, которые предъявляют к характеристикам и тем вносят определенный порядок в данный раздел научного поиска [31, 32]. Применительно к характеристикам живучести эти требования должны:

- 1) давать наглядное физическое представление о проявлении свойства живучести в интересующих исследовании условиях;
- 2) допускать количественную оценку с помощью соответствующего показателя аналитическими или экспериментальными методами;
- 3) отображать наиболее существенные черты свойства живучести, проявляемые через свойства элементов и структуры системы.

Имея в виду ключевые слова в определении свойства живучести — «сохранять» и «восстанавливать», а также перечисленные требования, структуру характеристик живучести строительных систем можно представить схемой (рис. 1).

*Неуязвимость* характеризует свойство системы сохранять состояние способности при получении повреждений от воздействия ПФ.

Очевидно, количество таких повреждений зависит от стойкости элементов системы, а эффект их влияния на ее состояние — от степени конструктивной избыточности.

Частными характеристиками неуязвимости строительных систем могут рассматриваться *стойкость* и *конструктивная избыточность*.

*Стойкость* характеризует способность строительной системы сохранять состояние способности функционировать при воздействии ПФ.

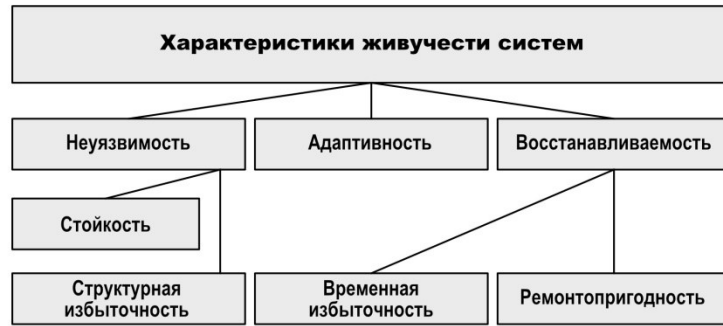


Рис. 1. Структура характеристик живучести строительных систем  
Fig. 1. Structure of robustness characteristics of building systems

Частными характеристиками стойкости строительной системы являются: ударостойкость, сейсмостойкость, огнестойкость, коррозионная стойкость, стойкость к прогрессирующему обрушению и т.д. Стойкость — адресная характеристика, так как всегда увязывается с физической природой конкретного поражающего фактора.

*Конструктивная избыточность* характеризует неуязвимость строительных систем, обеспечиваемую наличием в структуре резерва ключевых элементов. Количественной мерой данной характеристики может служить степень конструктивной избыточности, например отношение числа ключевых элементов системы к минимально необходимому для ее функционирования.

*Адаптивность* характеризует свойство системы предотвращать развитие вторичных обрушений и формировать состояние способности функционирования на основе остаточного ресурса.

*Адаптация* — приспособление и функция строительной системы к условиям эксплуатации.

*Приспособление* к условиям эксплуатации достигается средствами адаптации, назначение которых заключается в предотвращении развития вторичных обрушений строительной системы за счет развития пожара, взрыва и т.п. Цель адаптации на этапе приспособления строительной системы заключается в сохранении от вторичных обрушений остаточного ресурса системы.

Количественная оценка адаптивности системы к условиям обрушения затруднительна из-за сложности выбора соответствующего показателя.

Существует принципиальная возможность оценки вероятных сценариев протекания адаптационного процесса, что может явиться основой для формирования показателя адаптивности. Очевидно, данный вопрос следует отнести в разряд проблемных для последующих исследований. Заметим, однако, что характеристики, которые не могут быть оценены количественно, имеют право на существование и практическое использование. Как, например, в ГОСТе [33] — ремонтпригодность (характеристика надежности), оценка которой проблематична и неоднозначна для строительных объектов.

*Восстанавливаемость* характеризует приспособленность строительной системы восстанавливать живучесть за счет внутренних ресурсов.

Данная характеристика живучести проявляется в том случае, когда остаточный ресурс системы достаточен для формирования хотя бы одного состояния способности. Формирование данного состояния может осуществляться путем адаптации остаточного ресурса или проведения восстановительного ремонта.

Частной характеристикой восстанавливаемости является ремонтпригодность.

Ремонтопригодность строительной системы в условиях, созданных действием ПФ, основывается на средствах диагностики и возможности восстановления живучести.

Средства диагностики предназначены для определения текущего технического состояния системы (возможности остаточного ресурса) и выработки методов восстановления.

Количественная оценка ремонтнопригодности строительных систем возможна с учетом научного прогноза текущего состояния остаточного ресурса, эффективности и восстановительных возможностей.

Подходы к учету восстановительных возможностей систем составляют проблемную научно-техническую задачу. В связи с этим многообразие систем разделим на два подмножества:

- восстанавливаемые системы;
- невосстанавливаемые системы.

Данное разделение, которое (по существу) граничит с допущением, дает возможность разработки вопросов теории живучести строительных систем с оговоркой области их применения.

Рассмотренные характеристики могут использоваться в исследовательских и прикладных задачах отдельно, как независимые. При этом полученные результаты носят частный характер и имеют ограниченное применение.

Учет всего комплекса характеристик и их взаимозависимости в моделях живучести приближает оценку данного свойства систем к абсолютной.

#### **4. Показатели живучести систем**

Выбор показателей живучести — важный и ответственный этап формирования теоретических основ данного свойства строительных систем. Процесс выбора сопряжен с необходимостью удовлетворения ряда требований, предъявляемых к показателям, часть из которых носит противоречивый характер. Удовлетворение противоречий в данном случае возможно путем компромисса, а также использования в ряде специфических задач строительной системы частных показателей, область использования которых ограничена.

Выбор показателей живучести строительных систем удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) по смысловому содержанию выбор должен соответствовать определению свойства живучести систем;
- 2) показатель должен обеспечивать возможность разработки моделей живучести систем, доступных для проведения исследований и выполнения расчетов;
- 3) показатель должен быть чувствительным к процедурам на уровне характеристик свойства живучести.

Безусловно, наиболее сложна реализация требований п. 2 из-за их противоречивости. Для определения возможного компромисса рассмотрим составляющие качества строительных систем на различных иерархических уровнях.

Уровень функционирования по назначению может считаться высшим уровнем, обеспечивающим комплексную оценку качества строительной системы. Выбор показателя живучести на данном уровне гарантирует исследованию признаки системного подхода.

Однако следует признать, что этап моделирования (требование п. 2) в этом случае представляется весьма сложным, так как модель живучести затрудняется моделями готовности системы и способов использования ее по назначению.

Поиск возможного компромисса между желанием обеспечить системный характер исследования и необходимостью разработки достаточно простых и рабочих моделей живучести сопряжен с анализом компонентов качества строительных систем в двух встречных направлениях: «сверху» — от уровня функционирования строительных систем по назначению и «снизу» — от характеристик строительных систем.

Анализ проявления свойства живучести системы на «верхнем» уровне предполагает рассмотрение структуры показателя успешности функционирования данных систем по назначению ( $P$ ), который, в общем, может быть представлен выражением:

$$P = P\{U[y_k]; \Pi[n_j]; \Gamma[g_i] \} \quad (2)$$

где  $U[y_k]$  — множество параметров, характеризующих условия, в которых осуществляется эксплуатация строительных систем (коррозионная среда, сейсмичность, особенности грунтовых условий и т.д.);

$\Pi[n_j]$  — множество параметров, характеризующих физическую природу ПФ (природную, техногенную, военную) и их возможности;

$\Gamma[g_i]$  — множество параметров, характеризующих готовность системы к нормальной эксплуатации (надежность и т.д.);

$H[h_m]_n$  — множество характеристик назначения системы, реализуемых в условиях воздействия ПФ;

$H[h]_p$  — множество характеристик назначения системы, необходимых для выполнения ею функций с вероятностью не ниже заданной ( $P_g$ ).

Заметим, что исследование живучести имеет смысл только в отношении систем, находящихся в состоянии готовности. Очевидно, что неприятие этого допущения нарушает однозначность оценок, так как состояний неготовности систем может быть бесконечное множество.

С позиции «верхнего» уровня оценки качества системы показатель живучести ( $G$ ) может представлять собой оценку возможности сохранить системой состояние способности.

Выполненный анализ убеждает в том, что показатель живучести может быть увязан в ходе логических рассуждений и моделирования с состоянием способности системы.

Данный вывод согласуется с определением свойства живучести (требование п. 1), приведенным выше.

Свойство живучести связано с состоянием способности системы, но связь эта достаточно сложная.

Рассмотрим совокупность свойств строительной системы, в достаточной степени определяющих ее состояние способности. Для большей определенности выделим комплексные и частные свойства системы. К комплексным отнесем:

- свойство устойчивости — свойство системы сохранять характеристики назначения и ресурсы в заданных условиях;
- свойство соответствия — свойство системы удовлетворять (соответствовать) своими характеристиками назначения требованиям, обеспечивающим стойкость к прогрессирующему обрушению;
- свойство достаточности — свойство системы, определяемое наличием остаточных ресурсов, необходимых для обеспечения стойкости к прогрессирующему обрушению.

Вводя в обращение данные определения, автор допускает, что система находится в состоянии способности, если ее текущее состояние по характеристикам назначения и по ресурсам способно обеспечить стойкость к прогрессирующему обрушению в заданных условиях внешних воздействий (природных, техногенных, боевых или аварийных).

Устойчивость системы в условиях, когда воздействие ПФ носит целенаправленный характер (боевые условия, атаки БПЛА, терроризм), определяется ее защищенностью, живучестью

или совокупностью этих свойств. В условиях, когда воздействие ПФ носит нецеленаправленный характер (стихийные бедствия, аварии и т.п.), устойчивость системы определяется ее способностью защищаться и живучестью.

Последовательность проявления свойств устойчивости системы при целенаправленном воздействии ПФ, выводящем систему из состояния способности, свойство живучести является «последней возможностью» строительной системы уцелеть, т.е. сохранить состояние способности.

Приемлемость такого допущения в отношении свойства живучести обосновывается тем фактом, что данное свойство систем проявляется только тогда, когда под воздействием ПФ элементы системы теряют работоспособность (т.е. обрушаются). Это условие предполагает, что такие свойства, как защищенность, отсутствуют или «не сработали».

С учетом данного допущения (которое справедливо для случая нецеленаправленного воздействия ПФ) и определения свойства устойчивости системы свойство живучести может отслеживаться по условию — сохранила ли система состояние способности или нет? При этом приобретает реальные черты возможность моделирования свойства живучести, т.е. разработки аналитического или логического аппарата, позволяющего определять состояние системы после воздействия ПФ по свойствам соответствия и достаточности.

Таким образом, выполненный анализ проявления свойства живучести на различных уровнях оценки качества систем дает возможность сделать вывод о том, что показателем живучести строительной системы может являться количественная мера возможности сохранить системой состояние способности после воздействия на ее элементы поражающих факторов природно-техногенного характера, боевых средств или аварийной ситуации.

Для решения исследовательских и практических задач предполагается система показателей живучести (рис. 2), степень сложности и области применения которых различны.

К общим показателям живучести систем отнесем *показатель живучести восстанавливаемых систем* ( $G$ ):

$$G = G_n + G_e(\tau_e)(1 - G_n) \tag{3}$$

— вероятность сохранения системой состояния способности или восстановления данного состояния,

где  $G_e(\tau_e)$  – показатель эффективности подсистемы восстановления;

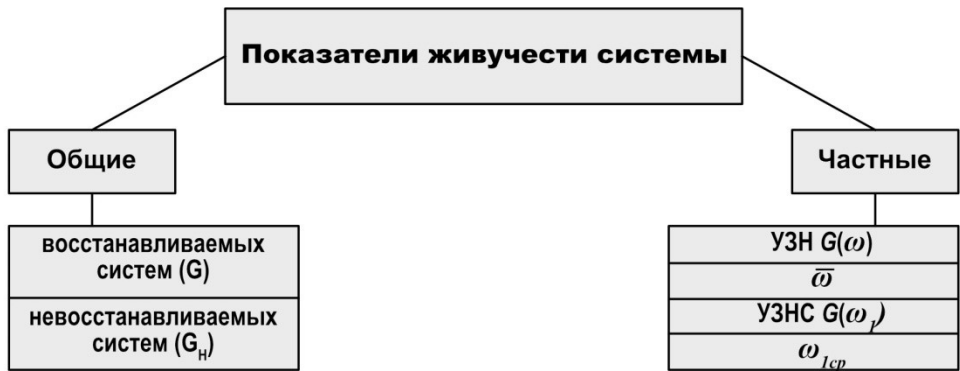


Рис. 2. Система показателей живучести  
Fig. 2. System of robustness indicators

$(G_n)$  — показатель живучести невосстанавливаемых систем или показатель неуязвимости — вероятность сохранения системой состояния способности.

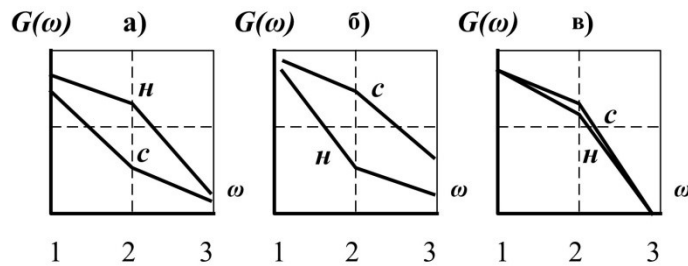
Область применения общих показателей включает задачи анализа и синтеза свойства живучести систем, требующих абсолютных (с учетом принятых условий) оценок, а также задачи формирования различного назначения частных показателей.

В качестве частных показателей живучести систем могут использоваться:

1) *условный закон необрушения системы (УЗНО)  $G(\omega)$* , характеризующий «динамику» сохранения системой состояния способности при  $\omega_x$ -кратном воздействии ПФ  $x$ -й природы.

Данный показатель формируется с помощью общих показателей путем принятия условия, что на элементы системы воздействует ПФ  $x$ -й природы  $\omega = 1, 2, \dots$  раз. Это специфическое условие определяет область применения УЗНО:

- в задачах реализации принципа «равной живучести» системы ( $c$ ) и ее носителя ( $n$ ) (рис. 3).



• **Рис. 3.** К принципу «равной живучести» системы ( $c$ ) и ее носителя ( $n$ )  
 • **Fig. 3.** To the principle of “equal robustness” of the system ( $c$ ) and its carrier ( $n$ )

Случай (в) демонстрирует реализацию принципа «равной живучести». Динамика утраты состояния способности системой и ее ключевых элементов одна или близка. Очевидно, средства, выделенные на обеспечение живучести суперсистемы «система – ключевой элемент», потрачены рациональным образом;

- в задачах выбора, когда в результате сравнения альтернатив УЗНО производится выбор варианта системы, обладающей большей живучестью;

2) *условный закон неуязвимости структуры УЗНС  $G(\omega_1)$* , характеризующий динамику сохранения системой состояния способности при последовательном удалении  $\omega_1$  ее элементов ( $\omega_1 = 1, 2, \dots, \infty$ ).

УЗНС оценивает конструктивную живучесть систем и является эффективным (возможно, единственным) средством оценки данного свойства систем на ранней стадии их разработки, когда условия распределения и эксплуатации их элементов еще неизвестны;

3) *математическое ожидание числа воздействий ПФ, при котором система теряет состояние способности  $(\bar{\omega})$* .

В работе [34] приведено доказательство, что:

$$\bar{\omega} = \sum_{j=0}^{\infty} [1 - G(\omega)_j]; \quad (4)$$

4) среднее число удаленных из структуры системы элементов, при которой она теряет состояние способности  $\omega_{1cp}$ .

Нетрудно предположить, что:

$$\omega_{1cp} = \sum_{i=0}^{\infty} \left[ 1 - G(\omega_1)_i \right]. \quad (5)$$

Показатели живучести  $\omega$  и  $\omega_{1cp}$  относятся к классу интегральных показателей.

В силу этого обстоятельства, а также их «условности» область применения данных показателей ограничена выполнением сравнительной оценки в задачах выбора более живучего варианта системы.

Список рассмотренных показателей живучести, безусловно, не является исчерпывающим и при появлении необходимости может быть дополнен иными подходами «измерения» живучести строительных систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование проблемы обеспечения живучести строительных систем носит комплексный характер и предполагает на начальной стадии разработку ряда научных положений и методов, которые в совокупности составляют теоретические основы — базис данных исследований.

Сама разработка теоретических основ живучести строительных систем в настоящее время составляет научную задачу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические системы. Анализ риска и проблемы безопасности. В 4-х частях. Часть 3. Прикладные вопросы анализа риска критически важных объектов / под ред. К.В. Фролова. М. : МГФ «Знание», 2007. 752с.
2. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Московцев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск : Наука, 2003. 174 с.
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Межгосударственный стандарт, 2017.
4. Еврокод 1: ТКП EN 1991-1-7–2009. Воздействие на конструкции. Часть 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2010.
5. Кабанцев О.В., Митрович Б. К выбору характеристик предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 234–241.
6. Шапиро Г.И., Эйман Ю.А., Травуш В.И. Рекомендации по защите высотных зданий при чрезвычайных ситуациях. М. : Москомархитектуры, 2006.
7. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов : монография. М. : АСВ, 2013, 128 с.
8. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71.
9. Крапивин В.Ф. О теории живучести сложных систем. М. : Наука, 1978.
10. Ключева Н.В. Основы теории живучести железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: дис. д-ра техн. наук. Орел, 2009. 454 с.
11. Кудишин Ю.И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 28.
12. Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и эффективность корабельных электроэнергетических систем. Л. : ВМА, 1989.
13. Расторгуев Б.С. Методы расчета зданий на устойчивость против прогрессирующего разрушения // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2009. № 13. С. 15–20.
14. Рябинин И.А. Пути повышения эффективности научных исследований в области живучести технических систем // Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем : мат. II Все-союз. науч.-техн. конф. (Алушта, 1987). М. : Наука, 1988.
15. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Классификация сооружений промышленных предприятий по возможности защиты от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 1 (47). С. 15–20.
16. Флейшман Б.С. О живучести сложных систем // Изв. АН СССР. 1966. № 5.
17. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М. : Мир, 1980. 608 с.
18. Baker J.W., Schubert M., Faber M.H. On the Assessment of Robustness // Structural Safety. 2008. Vol. 30. No. 3.

Pp. 253–267.

19. Brett C., Lu Y. Assessment of Robustness of Structures: Current State of Research // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013. Vol. 7. No. 4. Pp. 356–368.
20. Starossek U., Haberland M. Evaluating Measures of Structural Robustness // *Structures*. 2009. Pp. 1758–1765.
21. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций : монография. М. : Издательство АСВ, 2016. 908 с.
22. Анцелович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М. : Машиностроение, 1985. 295 с.
23. Гретченко А.Т., Дорожук Ю.И. Устройство и живучесть корабля // ВВМИУ им. Дзержинского. СПб., 1991.
24. Доронин С.В. Расчеты живучести при проектировании машиностроительных конструкций // *Тяжелое машиностроение*. 2008. № 7. С. 9–12.
25. Советский энциклопедический словарь / науч.-ред. совет: А.М. Прохоров (пред.) и др. М. : Советская энциклопедия, 1980. 1600 с.
26. Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести повреждаемых стержневых конструкций : дис....канд. техн. наук. Красноярск, 2020. 183 с.
27. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 7. С. 22–28.
28. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.
29. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 7. С. 819–830.
30. Вольterra В. Математическая теория борьбы за сосуществование. М. : Наука, 1976. 286 с.
31. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов // *Методология, методы, модели*. М. : МО СССР, 1989.
32. Складчев А.Н. Надежность систем с накоплением нарушений. Рига : Знание, 1969.
33. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
34. Плескунов М.А., Корчёмкина Л.В. Теория вероятностей : справочник. Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2017. 136 с.

## REFERENCES

1. Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical systems. Risk analysis and security problems. In 4x parts. Part 3. Applied issues of risk analysis of critically important objects / edited by K.V. Frolov. Moscow, MGF “Znanie”, 2007; 752.
2. Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskovtsev V.V., Chernyaev A.P. *Probabilistic risk-analysis of the technical system constructions*. Novosibirsk, Nauka, 2003; 174.
3. GOST 27.002–2015. Reliability in technique. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow, Interstate Standard, 2017.
4. Eurocode 1: TCP EN 1991-1-7–2009. Impacts on structures. Part 1-7. General impacts. Particular impacts. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, 2010.
5. Kabantsev O.V., Mitrovich B. To a choice of characteristics of limit states of monolithic reinforced concrete bearing systems for a mode of progressive collapse. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Technology of textile industry*. 2018; 6(378):234-241.
6. Shapiro G.I., Eisman Yu.A., Travush V.I. *Recommendations for the protection of high-rise buildings in emergency situations*. Moscow, Moskomarhitektury, 2006.
7. Almazov V.O., Cao Zui Khoi. *Dynamics of progressive failure of monolithic multistory frames : monograph*. Moscow, ASV, 2013; 128.
8. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; (3):31-71. (in Russian).
9. Krapivin V.F. *About the Theory of Survivability of Complex Systems*. Moscow, Nauka, 1978.
10. Klyueva N.V. *Fundamentals of the theory of survivability of reinforced concrete structures under beyond-design effects : Dr. Sci. .* Orel, 2009; 454. (in Russian).
11. Kudishin Yu.I. Conceptual problems of the building structures survivability. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2009; 2:28. (in Russian).
12. Parfenov Y.M. *Reliability, survivability and efficiency of ship electric power systems*. Leningrad, VMA, 1989.
13. Rastorguev B.S. Methods of calculation of buildings for stability against progressive destruction. *Bulletin of the Building Sciences Department of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2009; 13:15-20. (in Russian).
14. Ryabinin I.A. Ways to increase the efficiency of scientific research in the field of survivability of technical systems. *Survivability and Reconfiguration of Information-Computer and Control Systems : Proceedings of the 2nd All-Union Scientific and Technical Conference (Alushta, 1987)*. Moscow, Nauka, 1988.
15. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S. D. Classification of structures of industrial enterprises on the possibility of protection from progressive collapse. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2024;



1(47):15-20.

16. Fleishman B.S. On the survivability of complex systems. *Izv. of the Academy of Sciences of the USSR*. 1966; 5.
17. Poston T., Stewart I. *Theory of Catastrophes and its Applications*. Moscow, Mir, 1980; 608.
18. Baker J.W., Schubert M., Faber M.H. On the Assessment of Robustness. *Structural Safety*. 2008; 30(3):253-267.
19. Brett C., Lu Y. Assessment of Robustness of Structures: Current State of Research. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013; 7(4):356-368.
20. Starossek U., Haberland M. Evaluating Measures of Structural Robustness. *Structures*. 2009; 1758-1765.
21. Mkrtichev O.V., Raiser V.D. *Theory of Reliability in Design of Building Structures : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 908.
22. Antselovich L.L. Reliability, safety and survivability of the airplane. Moscow, Mashinostroenie, 1985; 295.
23. Gretchenko A.T., Doroshchuk Y.I. Device and survivability of a ship. *VVMIU named after Dzerzhinsky*. St. Petersburg, 1991.
24. Doronin S.V. Survivability calculations at designing of the machine-building constructions. *Tyazheloe mashinost.* 2008; 7:9-12. (in Russian).
25. Soviet Encyclopedic Dictionary / Editorial Board: A.M. Prokhorov (predecessor) and others. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1980; 1600.
26. Filippova Y.F. *Estimation of survivability of damaged rod structures : dis....knd. tehn. nauk*. Krasnoyarsk, 2020; 183.
27. Tamrazyan A.G. Survivability as a degree of serviceability of structures under damage. *Industrial and civil engineering*. 2023; 7:22-28.
28. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to the survivability assessment of building structures, buildings and constructions. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74.
29. Tamrazyan A.G., Alexeytsev A.V. Optimal design of the bearing structures of buildings taking into account the relative risk of accidents. *Vestnik MSCU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(7):819-830.
30. Volterra V. *Mathematical theory of the struggle for coexistence*. Moscow, Nauka, 1976; 286.
31. Petukhov G.B. Fundamentals of the theory of effectiveness of purposeful processes. *Methodology, methods, models*. Moscow, MO USSR, 1989.
32. Sklyarevich A N. *Reliability of Systems with Accumulation of Violations*. Riga, Znanie, 1969.
33. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions.
34. Pleskunov M.A., Korchyomkina L.V. *Probability theory : handbook*. Ekaterinburg, Izd-v. Ural. unct, 2017; 136.



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.18-25

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных балок

Ф.С. Замалиев\*, Д.Ю. Филиппов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), Казань, Российская Федерация

\* zamaliev49@mail.ru

**Ключевые слова:** сталебетонная балка, преднапряжение, численные исследования, образцы, натурные испытания

### История статьи

Поступила в редакцию: 01.02.2025

Доработана: 20.02.2025

Принята к публикации: 28.02.2025

### Для цитирования

Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю. Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных балок // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 18–25.

**Аннотация.** Идея преднапряжения в железобетонных конструкциях достаточно широко применяется. Особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных железобетонных элементов изложены во многих научных статьях, разработаны рекомендации по способам преднапряжения. Использование преднапряжения в сталебетонных конструкциях достаточно новое явление. В СП 266.1325800.2016 по преднапряжению сталежелезобетонных конструкций рекомендации отсутствуют.

Цель исследования — оценка влияния предварительного напряжения на напряженно-деформированное состояние сталебетонных балок. Применение предварительного напряжения в сталебетонных балках позволяет оптимизировать их материалоемкость. Приведены методика и результаты численных исследований на основе компьютерного моделирования. Проведены экспериментальные исследования сталебетонных балок. Дан анализ результатов натурных испытаний и сравнение их с данными численных экспериментов.

## Numerical and Experimental Investigations of Prestressed Steel-Concrete Beams

F.S. Zamaliev\*, D.Yu. Filippov

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), Kazan, Russian Federation

\* zamaliev49@mail.ru

**Keywords:** steel-concrete beam, prestressing, numerical studies, specimens, full-scale tests

### Article history

Received: 01.02.2025

Revised: 20.02.2025

Accepted: 28.02.2025

**Abstract.** The idea of prestressing in reinforced concrete structures is widely used. Peculiarities of stress-strain state of prestressed reinforced concrete elements are described in many scientific articles, recommendations on prestressing methods are developed. The use of prestressing in steel-concrete structures is quite a new phenomenon. In SP 266.1325800.2016 there are no recommendations on prestressing of steel-reinforced concrete structures.

The aim of the study is to evaluate the effect of prestressing on the stress-strain state of steel-concrete beams.

**Фарит Сахапович Замалиев**, к.т.н., доцент кафедры Металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; eLIBRARY SPIN-код: 4926-5781, ORCID: 0000-0002-3563-2994, E-mail: zamaliev49@mail.ru

**Денис Юрьевич Филиппов**, аспирант кафедры Металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

© Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю., 2025



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

**For citation**

Zamaliyev F.S., Filippov D.Yu. Numerical and Experimental Investigations of Prestressed Steel-Concrete Beams. *Reinforced concrete structures*. 2025; 1(9):18-25.

Application of prestressing in steel-concrete beams allows to optimize their material intensity. The methodology and results of numerical investigations on the basis of computer modeling are given. Experimental studies of steel-concrete beams are carried out. The results of full-scale tests are analyzed and compared with the data of numerical experiments.

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность применения сталежелезобетонных конструкций в гражданском и промышленном строительстве с каждым годом возрастает. Применение преднапряжения в сталежелезобетонных конструкциях находится у нас в стране в начальной стадии, что также подтверждают новые технические решения, на которые выданы патенты [1], при этом отмечается, что необходимы научные исследования, после которых появятся рекомендации по применению преднапряжения в сталежелезобетонных конструкциях.

В обзорных статьях [2, 3] даны сегодняшнее состояние и перспективы развития сталежелезобетонных обычных конструкций, без преднапряжения. В статье [4] тоже без преднапряжения приведен параметрический анализ и тенденции исследований составных балок. В работе [5] представлены испытания плит на основе стального профнастила, совместно работающих со сталебетонными балками. Статья [6] посвящена экспериментальным исследованиям сталебетонных балок, где показан механизм передачи внутренних усилий от стальной части к бетону. Результаты численных и экспериментальных исследований и их сопоставление, а также напряженно-деформированное состояние стыка слоев отражены в статье [7]. Статья [8] посвящена вопросам применения сталежелезобетонных перекрытий в восстанавливаемых перекрытиях архитектурных памятников старой постройки. Источник [9] отражает особенности работы составных изгибаемых элементов, которые объединены вертикальными связями слоев. В статье [10] имеются результаты экспериментально-теоретических исследований сборных железобетонных балок с преднапряжением и без него. Статья [11] отражает работу сталебетонных балок с высокопрочным бетоном, но без преднапряжения.

Статья [12] посвящена численному моделированию преднапряженных сталебетонных балок на основе конечно-элементной модели при кратковременных длительных нагрузках. Результаты расчетов сравнены с экспериментальными данными других авторов. В работе [13] приведены параметрические исследования композитных сталебетонных балок таврового сечения при различных условиях предварительного напряжения. Рассмотрены различные случаи нагружения, профили арматуры, пролеты балок, разные размеры стальных балок и бетонного настила. Статья [14] посвящена изучению нелинейного поведения преднапряженных композитных балок. Проведены параметрические численные исследования эффективности усиления внешними натяжителями и сравнены с экспериментальными результатами.

Источник [15] отражает результаты исследований зоны сдвига сталебетонной неразрезной преднапряженной коробчатой балки. В статье [16] приведены параметрические исследования сталежелезобетонных балок, предварительно напряженных внешними арматурными элементами. Исследованы влияние расположения и форма арматурных элементов, длина арматуры, начальные усилия предварительного напряжения. Некоторые источники отражают исследование не только отдельных балок, а их совместную работу с монолитной плитой и стальным профнастилом [17].

**Farit S. Zamaliyev**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Associate Professor, Department of Metal Structures and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), 1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation; eLIBRARY SPIN- code: 4926-5781, ORCID: 0000-0002-3563-2994, E-mail: zamaliyev49@mail.ru

**Denis Yu. Filippov**, Graduate student Department of Metal Structures and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), 1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation

Ранее в исследованиях преобладали стальные балки таврового сечения. В работе [18] изучено изгибное поведение преднапряженных трубобетонных балок, показано, что геометрическая конфигурация таких балок обеспечивает их более высокое сопротивление локальному выпучиванию стенки. Источник [19] отражает результаты испытаний двухпролетных преднапряженных сталебетонных балок общей длиной 9,8 м. Статья [20] посвящена экспериментальным исследованиям сталежелезобетонных преднапряженных сборных балок со шпильками, соединенными с балками из высокопрочной стали.

Статьи [21, 22] посвящены исследованиям сталежелезобетонных композитных балок с элементами из углепластика. Первая — исследованиям в области отрицательного момента, вторая — численным исследованиям композитных балок, усиленных пластинами из углепластика и преднапряженных несвязанной арматурой.

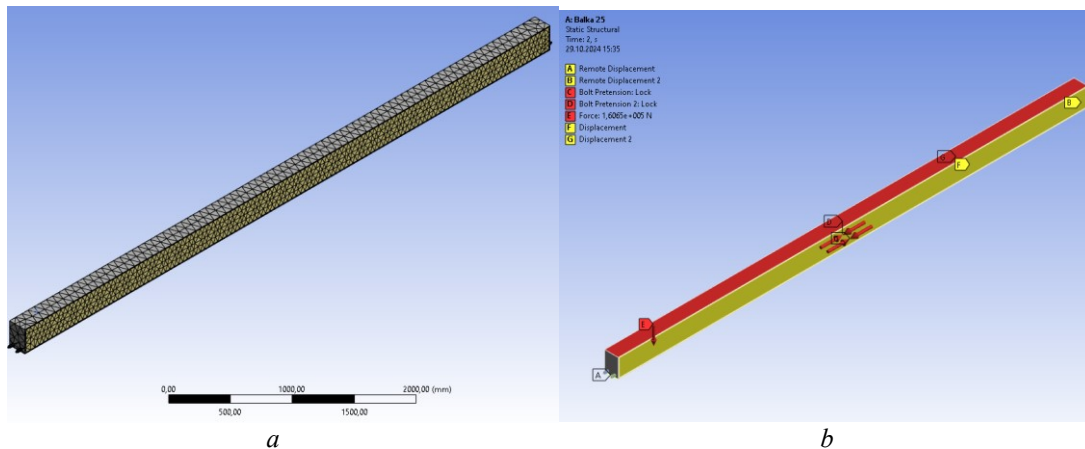
## МЕТОД

Рассмотрим особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок с наиболее распространенными параметрами, которые могут быть использованы как в составе ребристого перекрытия, так и изолированно. Проведем численные исследования путем компьютерного моделирования и экспериментальные исследования на моделях.

Расчетную модель балки создаем непосредственно в ПК Ansys. Сначала создается эскиз: геометрические фигуры, затем 3D тела. В режиме моделирования создаем геометрические модели. Задаем в программном комплексе материалы и их свойства. Анализ фактора напряженно-деформированного состояния в ПК Ansys производится с помощью функции нелинейного анализа.

Далее генерируется конечно-элементная сетка, затем между элементами модели балки создаются контакты. Для расчетной модели задаем граничные условия. Следующий шаг — задание нагрузок, задается величиной задаваемого усилия преднапряжения.

Расчет сталебетонных балок производился в ПК ANSYS. Для моделирования СБ балок были приняты следующие материалы: стальная часть из прокатной двутавровой балки С255 длиной 6000 мм, две фасонки на концах двутавра (играющие роль опорных ребер) толщиной 14 мм каждая. Вдоль двутавровой балки пропущены два арматурных стержня класса А800 диаметром 14 мм в полипропиленовой оболочке. Класс бетона по прочности В30. Модель СБ балки моделировалась по схеме свободно-опертой балки с распределенной погонной нагрузкой. Расчетный пролет составил 6000 мм. Нагрузка прикладывалась в 10 шагов по 2,6775 кН/м. Общая приложенная нагрузка составила 26,775 кН/м. Величина преднапряжения — 186 кН (рис. 1).



**Рис. 1.** Сталебетонная балка: *a* — генерация КЭ сетки; *b* — приложенные нагрузки и закрепления  
**Fig. 1.** Steel-concrete beam: *a* — generation of KE mesh; *b* — applied loads and anchorages

Для экспериментальных исследований преднапряженная СБ балка была изготовлена из прокатной двутавровой балки № 20К1 С245 длиной 2000 мм, две фасонки на концах двутавра (играющие роль опорных ребер) толщиной 14 мм каждая. Вдоль двутавровой балки пропущены два арматурных стержня класса А500С диаметром 20 мм в полипропиленовой оболочке. Класс бетона по прочности В20. СБ балка испытывалась по схеме свободно-опертой балки двумя сосредоточенными силами в средней части пролета. Расчетный пролет — 1950 мм. Общая приложенная нагрузка составила 400 кН. Величина преднапряжения — 100 кН (рис. 2).

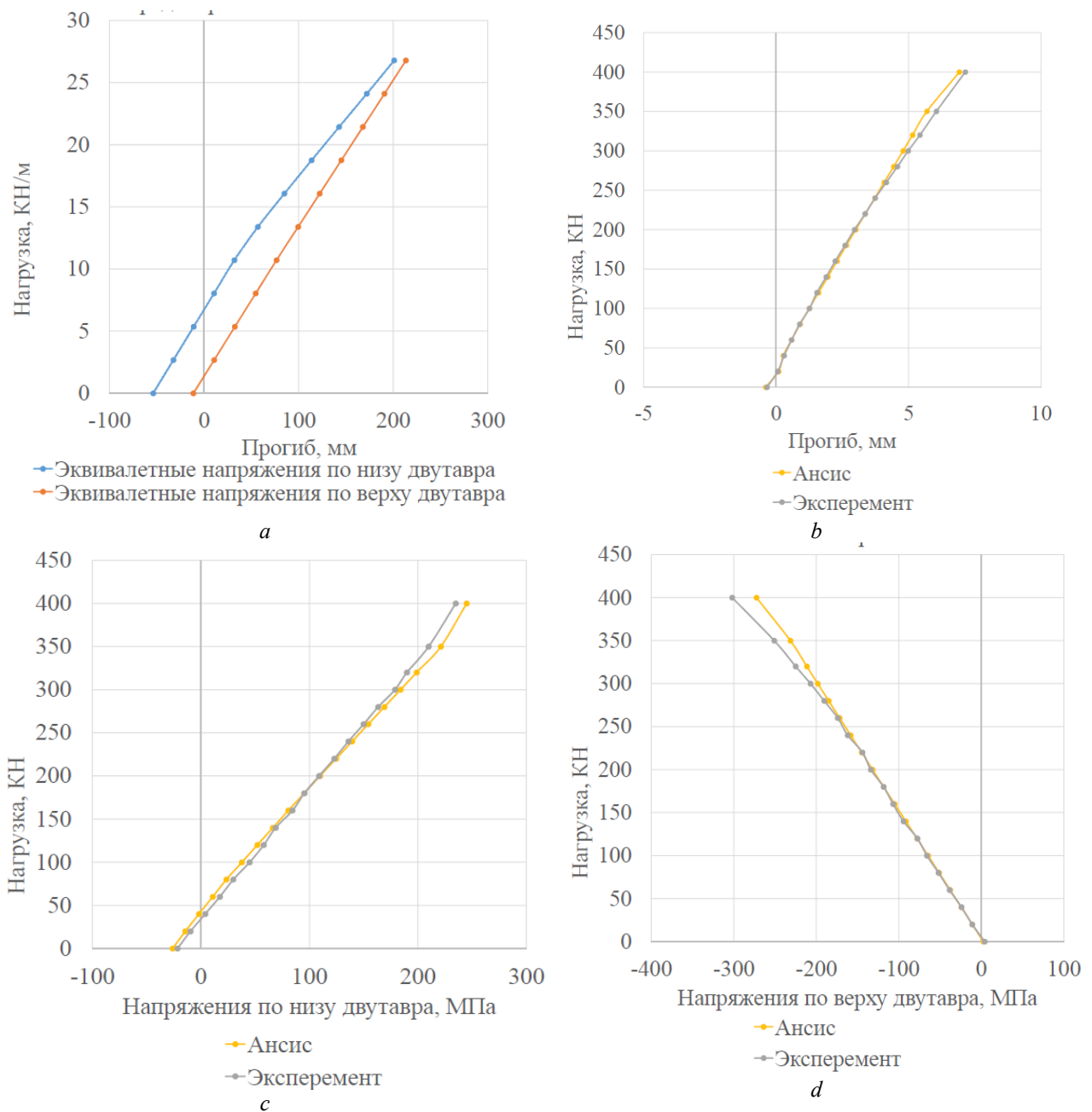


Рис. 2. Сталебетонная балка в установке: *a* — общий вид; *b* — измерение прогиба  
Fig. 2. Steel-concrete beam in installation: *a* — General view; *b* — Deflection measurement

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогиб СБ балки пролетом 6 м при нагрузке 26,775 кН/м составил 31,46 мм; напряжения по низу двутавра при нагрузке 26,775 кН/м — 201 МПа; напряжения по верху двутавра при нагрузке 26,775 кН/м — –213,31 МПа; относительные деформации в сжатой зоне бетона при нагрузке 26,775 кН/м —  $-6,99 \text{ мм/мм} \cdot 10^{-4}$ . Эквивалентная железобетонная балка по расчету —  $450 \times 200 \text{ мм}$  с 4 стержнями преднапряженной арматуры диаметром 14 мм класса А800.

Прогиб СБ балки пролетом 2 м при нагрузке 400 кН составил 7,14 мм; напряжения по низу двутавра при нагрузке 400 кН — 235 МПа; напряжения по верху двутавра при нагрузке 400 кН — –302 МПа; относительные деформации в сжатой зоне бетона при нагрузке 400 кН —  $-9,1 \text{ мм/мм} \cdot 10^{-4}$ . Сходимость предложенной КЭ модели с результатами эксперимента при нагрузке 400 кН составила: по деформациям — 3,12 %; по напряжениям нижней полки двутавра — 4,3 %; по напряжениям верхней полки двутавра — 9,76 %; по относительным деформациям сжатой зоны бетона — 4,93 % (таблица, рис. 3).



**Рис. 3.** Графики изменений напряжений и прогибов преднапряженной балки:

*a* — прогибов по низу и верху двутавра; *b* — изменение прогибов; *c* — изменение напряжений по низу двутавра; *d* — изменение напряжений по верху двутавра

**Fig. 3.** Graphs of changes in stresses and deflections of prestressed beam:

*a* — deflections at the bottom and top of the I-beam; *b* — change of deflections; *c* — change of stresses at the bottom of the I-beam; *d* — change of stresses at the top of the I-beam

Сходимость численных экспериментов с данными испытаний

|   | Прогибы | Напряжения |       | Относительные деформации сжатой зоны бетона |
|---|---------|------------|-------|---------------------------------------------|
|   |         | в н.п.     | в в.п |                                             |
| % | 3,12    | 4,3        | 9,76  | 4,93                                        |

Convergence of numerical experiments with test data

|   | Deflections | Tensions     |           | Relative deformations of the concrete compressed zone |
|---|-------------|--------------|-----------|-------------------------------------------------------|
|   |             | bottom shelf | top shelf |                                                       |
| % | 3.12        | 4.3          | 9.76      | 4.93                                                  |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сталежелезобетонные преднапряженные изгибаемые элементы используют на сегодняшний день не так широко из-за того, что такие системы недостаточно изучены и нет опыта их применения в строительной практике. Численные исследования и натурные испытания сталебетонных преднапряженных балок подтвердили перспективность подобной конструкции.
2. На основе изучения особенностей напряженно-деформированного состояния сталебетонных преднапряженных балок со стальными двутаврами получены численные результаты.
3. Сравнение результатов численного эксперимента с данными натурных испытаний показывает, что расхождения результатов численных экспериментов от натурных находятся:
- по напряжениям до 4,3 и 9,76 %;
  - по прогибам до 3,12 %;
  - по несущей способности до 7 %.
4. Анализ результатов численных исследований, полученных с помощью ПК ANSYS, показывает, что конечные результаты прогибов по нагрузкам не превышают 8 %, однако характер графиков сильно расходится. В численных экспериментах они прямолинейные, а в натурных испытаниях — криволинейные.
5. Для уменьшения количественного расхождения численных и экспериментальных результатов изгибаемых преднапряженных сталебетонных элементов необходимы дальнейшие исследования таких видов конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Замалиев Ф.С. Сталежелезобетонные перекрытия: новые методы их расчета // Известия КГАСУ. 2024. № 70.

2. Alsharari F., El-Sisi A.E.-D., Mutnbak M., Salim H., El-Zohairy A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders // Buildings. 2022. Vol. 12 (5). No. 596. DOI: 10.3390/buildings12050596

3. Liu W., Fang Q., Chen L., Li Z., Zhang Y., Xiang, H. Blast resistance of prestressed steel-grouting composite beams under close-in explosions: Experiment and numerical analysis // Advances in Structural Engineering. 2022. Vol. 25 (7). Pp. 1519–1534. DOI: 10.1177/13694332221092676

4. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. № 4. С. 205–208.

5. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams // Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 136. Issue 2. Pp. 183–192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-



9445(2010)136:2(183)

6. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams // *Buildings*. 2018. Vol. 8 (10). P. 134. DOI: 10.3390/buildings8100134
7. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63 (1). Pp. 135–144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
8. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 5 (97). С. 3–15.
9. Qiang X., Chen L., Jiang X. Flexure tests on steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP plates by string system // *FuheCailiaoXuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*. Vol. 39 (11). Pp. 5135–5147. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220629.004
10. Shi B., Zhu W., Yang H., Liu W., Tao H., Ling Z. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 204. P. 109901 DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109901
11. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 3 (79). Pp. 36–44. DOI: 10.18720/MCE.79.4
12. Tiejiong Lou, Sergio M.R. Lopes, Adelino V. Lopes. Numerical modeling of externally prestressed steel–concrete composite beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. Pp. 229–236. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.02.008
13. Anwar B. Abu-Sena, Ibrahim G. Shaaban, Mohamed S. Soliman, Khaled Abd-Allah Mohamed Gharib. Effect of geometrical properties on strength of externally prestressed steel–concrete composite beams // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2018. Vol. 173. Issue 1. Pp. 42–62. DOI: 10.1680/jstbu.17.00172
14. Tiejiong Lou, Theodore L. Karavasilis. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 190. Pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031
15. Jun Sun, Zhenhong Yue, Yan He, Yasir Ibrahim Shah. Slip analysis of prestressed steel-concrete continuous composite beam // *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.01.007
16. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 189. P. 107087. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107087
17. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with profiled steel decking // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 194. P. 107331. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107331
18. Mohammad Reza Ghaemdoost, Jian Yang, Feiliang Wang, Siping Li, BabakJamhiri. Flexural behavior of prestressed concrete-filled steel tubular flange beams // *Structures*. 2022. Vol. 43. Pp. 1643–1667. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.080
19. Fei Peng, Weichen Xue, Lili Bai. Flexural behavior of externally prestressed continuous steel-concrete composite beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 212. P. 108282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108282
20. Gang Xiong, Liyu Feng, Yunhe Zou, Xuanding Wang, Jincheng Xie. Experimental study of high-strength steel-precast prestressed concrete composite beams under hogging moment // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 219. P. 108784. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108784
21. Fangzheng Shen, Bing Wang, Ping Zhuge, Hetao Qi. Flexural performance investigation of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP tendons in the negative bending moment region // *Structures*. 2024. Vol. 61. P. 106025. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106025
22. Longlong Chen, Xuhong Qiang, Xu Jiang, Jie Bai. Numerical study of steel–concrete composite beams strengthened by CFRP plates with prestressed unbonded reinforcement system // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 157. P. 107905. DOI:10.1016/j.engfailanal.2023.107905

## REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Zamaliyev F.S. Steel reinforced concrete slabs new methods of their calculation. *Izvestia KSUAE*. 2024; 70. (in Russian).
2. Alsharari F., El-Sisi A.E.-D., Mutnbak M., Salim H., El-Zohairy A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders. *Buildings*. 2022; 12(5):596. DOI: 10.3390/buildings12050596
3. Liu W., Fang Q., Chen L., Li Z., Zhang Y., Xiang H. Blast resistance of prestressed steel-grouting composite beams under close-in explosions: Experiment and numerical analysis. *Advances in Structural Engineering*. 2022; 25(7):1519-1534. DOI: 10.1177/13694332221092676
4. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. *Advances of modern science*. 2017; 4:205-208. (in Russian).



5. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams. *Journal of Structural Engineering*. 2010; 136(2):183-192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(183)
6. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams. *Buildings*. 2018; 8(10):134. DOI: 10.3390/buildings8100134
7. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(1):135-144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
8. Zamaliev F.S., Tamrazyan A.G. To the calculation of steel-reinforced concrete ribbed slabs for restored floors *Construction and reconstruction*. 2021; 5(97):3-15.
9. Qiang X., Chen L., Jiang X. Flexure tests on steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP plates by string system. *FuheCailiaoXuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*. 2022; 39(11):5135-5147. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220629.004
10. Shi B., Zhu W., Yang H., Liu W., Tao H., Ling Z. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress. *Engineering Structures*. 2020; 204:109901. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109901
11. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 3(79):36-44. DOI: 10.18720/MCE.79
12. Tiejiong Lou, Sergio M.R. Lopes, Adelino V. Lopes Numerical modeling of externally prestressed steel–concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016; 121:229-236. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.02.008
13. Anwar B. Abu-Sena, Ibrahim G. Shaaban, Mohamed S. Soliman, Khaled Abd-Allah Mohamed Gharib. Effect of geometrical properties on strength of externally prestressed steel–concrete composite beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2018; 173(1):42-62. DOI: 10.1680/jstbu.17.00172
14. Tiejiong Lou, Theodore L. Karavasilis. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams. *Engineering Structures*. 2019; 190:116-127. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031
15. Jun Sun, Zhenhong Yue, Yan He, Yasir Ibrahim Shah. Slip analysis of prestressed steel-concrete continuous composite beam. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.01.007
16. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 189:107087. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107087
17. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with profiled steel decking. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 194:107331. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107331
18. Mohammad Reza Ghaemdoost, Jian Yang, Feiliang Wang, Siping Li, BabakJamhiri. Flexural behavior of prestressed concrete-filled steel tubular flange beams. *Structures*. 2022; 43:1643-1667. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.080
19. Fei Peng, Weichen Xue, Lili Bai. Flexural behavior of externally prestressed continuous steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 212:108282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108282
20. Gang Xiong, Liyu Feng, Yunhe Zou, Xuanding Wang, Jincheng Xie. Experimental study of high-strength steel-precast prestressed concrete composite beams under hogging moment. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 219:108784. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108784
21. Fangzheng Shen, Bing Wang, Ping Zhuge, Hetao Qi. Flexural performance investigation of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP tendons in the negative bending moment region. *Structures*. 2024; 61:106025. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106025
22. Longlong Chen, Xuhong Qiang, Xu Jiang, Jie Bai. Numerical study of steel–concrete composite beams strengthened by CFRP plates with prestresse dun bonded reinforcement system. *Engineering Failure Analysis*. 2024; 157:107905. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107905



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.26-34

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Использование композитной полимерной арматуры в бетонных конструкциях, подверженных динамическим воздействиям

А.Н. Мамин<sup>1, 2\*</sup>, С.К. Хлебников<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий (АО «ЦНИИПромзданий»), Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация;

<sup>3</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

\* otozs@yandex.ru

**Ключевые слова:** неметаллическая арматура, арматура композитная полимерная, бетонные конструкции, диаграмма деформирования, динамическое нагружение

### История статьи

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Доработана: 05.02.2025

Принята к публикации: 07.02.2025

### Для цитирования

Мамин А.Н., Хлебников С.К. Использование композитной полимерной арматуры в бетонных конструкциях, подверженных динамическим воздействиям // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 26–34.

**Аннотация.** В статье рассмотрены свойства композитной полимерной арматуры (АКП) и ее использование в бетонных конструкциях. АКП, обладая высокой прочностью на растяжение, низкой плотностью и устойчивостью к коррозии, является перспективной альтернативой традиционной стальной арматуре, особенно в агрессивных средах. Однако широкое применение АКП ограничено рядом факторов, среди которых недостаточная изученность поведения АКП и бетонных конструкций с ее использованием при динамических воздействиях. В статье описана структура АКП как гетерогенного анизотропного материала, состоящего из непрерывных армирующих волокон и полимерной матрицы. Отобрана классификация АКП с анализом ее физико-механических свойств при статическом, длительном и динамическом нагружениях, а также методики расчета армобетонных конструкций с ее использованием. Приведена диаграмма деформирования для статического растяжения и сжатия, полученная по результатам испытаний АКП. При кратковременном статическом нагружении АКП деформируется упруго без образования пластических зон, однако при длительном воздействии из-за ползучести полимеров происходит снижение прочностных характеристик АКП. Поведение композитной арматуры при динамических воздействиях остается малоизученным, однако ряд исследователей отмечают наличие эффекта динамического упрочнения при действии кратковременной динамической нагрузки. Для определения влияния скорости деформирования на свойства АКП необходимы дополнительные исследования. В работе предложены рекомендации по моделированию нагружения при испытаниях изгибаемых элементов, учитывающие особенности их деформирования при динамической знакопеременной нагрузке. Анализ полученных результатов показывает необходимость проведения дальнейших исследований АКП в условиях циклического динамического нагружения, что позволит расширить сферу применения полимеркомпозитной арматуры в строительстве.



# Use Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete Structures Subject to Dynamic Loads

A.N. Mamin<sup>1, 2\*</sup>, S.K. Khlebnikov<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

\* otozs@yandex.ru

**Keywords:** non-metallic fitting, fiber-reinforced polymer bars, concrete structures, deformation diagram, dynamic loading

## Article history

Received: 30.01.2025

Revised: 05.02.2025

Accepted: 07.02.2025

## For citation

Mamin A.N., Khlebnikov S.K. Use Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete Structures Subject to Dynamic Loads. *Reinforced Concrete Structures*. 2025; 1(9):26-34.

**Abstract.** The article examines the properties of fiber-reinforced polymer bars (FRP bars) and its use in concrete structures. With its high tensile strength, low density, and corrosion resistance, FRP bars presents a promising alternative to traditional steel reinforcement, particularly in aggressive environments. However, its widespread application is limited by several factors, including the insufficient study of FRP bars behavior and the performance of concrete structures reinforced with it under dynamic loads. The article describes FRP bars as a heterogeneous anisotropic material composed of continuous reinforcing fibers and a polymer matrix. It provides a classification of FRP bars, analyzes its physical and mechanical properties under static, long-term, and dynamic loading conditions, and discusses calculation methods for reinforced concrete structures incorporating FRP bars. A deformation diagram for static tension and compression, obtained from experimental tests, is presented. Under short-term static loading, FRP bars deforms elastically without forming plastic zones. However, under prolonged exposure, polymer creep leads to a reduction in FRP bars' strength characteristics. The behavior of fiber-reinforced polymer bars under dynamic loads remains underexplored, although some studies indicate the presence of a dynamic hardening effect under short-term dynamic loading. Additional research is needed to determine the influence of strain rate on FRP bars properties. The study proposes recommendations for modeling loading conditions in tests of flexural elements, considering their deformation behavior under cyclic dynamic loads. The analysis of the obtained results highlights the need for further research on FRP bars under cyclic dynamic loading, which would expand the scope of fiber-reinforced polymer bars applications in construction.

## ВВЕДЕНИЕ

Для кардинального повышения сопротивления бетона силовым воздействиям в строительных конструкциях сегодня в основном традиционно применяют стальную арматуру, главным недостатком которой является низкая коррозионная стойкость. Коррозия арматуры с течением времени становится одним из основных механизмов деградации железобетонных конструкций, снижая их несущую способность и срок безопасной эксплуатации [2, 10, 12].

**Александр Николаевич Мамин**, доктор технических наук, начальник отдела, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46, корп. 2; профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AuthorID: 376930, E-mail: otozs@yandex.ru

**Сергей Константинович Хлебников**, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5; аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 9420-7523, E-mail: s.xlebnikov@mail.ru

**Aleksandr N. Mamin**, Doctor of Sciences in Technology, Head of the Department, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, 46, bld. 2, Dmitrovskoe shosse, Moscow 12723, Russian Federation; Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AuthorID: 376930, E-mail: otozs@yandex.ru

**Sergey K. Khlebnikov**, Junior Researcher, Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 6, bld. 5, 2nd Institut'skaya str., Moscow, 109428, Russian Federation; PhD student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9420-7523, E-mail: s.xlebnikov@mail.ru

В последнее время все большее распространение получают неметаллические композитные материалы, которые практически не подвержены коррозии, поэтому применение композитной полимерной арматуры (АКП) позволяет повысить надежность конструкций, особенно находящихся в агрессивных средах, и сократить эксплуатационные затраты за счет увеличения межремонтных интервалов [5].

По сравнению со стальной, композитная полимерная арматура имеет и другие преимущества: более высокая прочность на растяжение, радиопрозрачность и электромагнитная инертность, низкая теплопроводность, а также упрощающие транспортировку и монтаж небольшой удельный вес и простота обработки арматуры на строительной площадке. К основным недостаткам АКП, затрудняющим ее применение в строительстве, относятся низкая огнестойкость, высокая деформативность, сложность создания предварительного натяжения, несвариваемость композитных материалов, нетехнологичность изготовления гнутых элементов, сложность идентификации армирования в существующих конструкциях при обследовании их технического состояния.

Еще один фактор, ограничивающий применение полимерной арматуры — недостаточность достоверных сведений о сопротивлении бетонных конструкций, армированных АКП, динамическим воздействиям, которые часто необходимо учитывать как при основных, так и при особых сочетаниях нагрузок. Как следствие, в нормативных документах РФ использование арматуры из полимерных материалов в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям, не предусмотрено.

Отметим также, что большинство действующих отечественных и зарубежных нормативных документов являются модификацией аналогичных норм по расчету железобетонных конструкций и реализуют принцип расчета бетонных конструкций с АКП по методу предельных состояний. Внесенные изменения, как правило, связаны с использованием коэффициентов надежности по материалу и понижающих коэффициентов условий работы АКП, нормированием ее характеристик, а также более осторожным подходом при описании конструктивных требований к армированным АКП бетонным конструкциям [8, 11].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Композитная полимерная арматура представляет собой гетерогенный анизотропный материал в форме стержня. Он состоит из ориентированных непрерывных высокопрочных неметаллических волокон (стеклянных, базальтовых, углеродных, арамидных или их комбинации) и матрицы из полимерного связующего (термопластичного или термореактивного). Волокна являются основным несущим элементом, воспринимающим нагрузку, а матрица защищает их от механических и химических воздействий, объединяет в единый конструктивный элемент и распределяет усилия между отдельными волокнами. В зависимости от типа армирующих волокон различают стеклокомпозитную (АСК), базальтокомпозитную (АБК), углекомпозитную (АУК) и органокомпозитную (ААК) арматуру (рис. 1).

Для улучшения сцепления с бетоном на поверхности стержней формируют периодический профиль, образованный намоткой на стержень дополнительного волокна, или создают песчано-эпоксидное покрытие.

Физико-химические и механические характеристики АКП существенно отличаются от характеристик традиционной стальной арматуры. Характерны высокие показатели прочности при растяжении (800–3000 МПа), пониженные значения модуля упругости (45–160 ГПа). Свойства АКП зависят не только от типа используемого армирующего волокнистого материала, вида полимерного связующего, их объемного соотношения, но и от технологии изготовления. По этой причине характеристики арматуры разных видов и разных производителей могут значительно различаться [3, 6, 8].



**Рис. 1.** Виды арматуры композитной полимерной (АКП)  
**Fig. 1.** Types of fiber-reinforced polymer bars (FRP bars)

Многие исследователи выявили также, что прочность и модуль упругости АКП при растяжении чувствительны к ее диаметру: с увеличением диаметра арматуры эти параметры уменьшаются вследствие неравномерности распределения между волокнами внутренних усилий. В отдельных случаях при увеличении диаметра отмечено снижение прочности на величину до 35 % [4, 9, 13].

Экспериментально установлено, что прочность АКП при сжатии меньше, чем при растяжении [7, 8]. Это согласуется с ожидаемым механизмом разрушения композита от потери устойчивости сжатых волокон внутри матрицы и, соответственно, ее разрыва в поперечном направлении. В отечественных и большинстве зарубежных нормативных документов для всех типов АКП расчетное значение сопротивления сжатию принимают равным нулю.

Расчет армобетонных конструкций с АКП выполняют по СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные композитной полимерной арматурой. Правила проектирования». Методики расчетов являются адаптацией, а в большинстве своем полностью повторяют методики расчета железобетонных конструкций по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». При этом расчетные характеристики стальной растянутой арматуры заменяют аналогичными характеристиками АКП, а для сжатой арматуры принимают равными нулю. В настоящее время расчет армобетонных конструкций с АКП производят по первой и второй группам предельных состояний на действие статических нагрузок. Длительность нагружения учитывают понижением расчетного сопротивления растяжению АКП до 30–60 %, в зависимости от типа арматуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Свойства АКП при статическом кратковременном нагружении*

При кратковременном воздействии растяжение АКП на всем диапазоне нагружения происходит линейно, без образования пластических деформаций.

Предел прочности и модуль упругости при кратковременном растяжении являются основными нормируемыми и контролируемыми показателями. Методики испытаний отражены в соответствующих документах ACI, ASTM, JSCE, а также в российских стандартах. Вступающий

в действие с 1 июня 2025 г. ГОСТ 32492–2024 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик» обобщает и систематизирует имеющийся список методов определения физико-механических характеристик АКП, в том числе при динамических нагружениях.

Проведенные в январе 2024 г. на базе Испытательного центра НИИЖБ испытания стеклокомпозитной арматуры на прочность и деформативность при сжатии и растяжении подтвердили упругое деформирование АКП вплоть до разрушения. Серии образцов стеклокомпозитной арматуры диаметром 12 мм (по 3 образца в серии) были доведены до разрушения сжимающей и растягивающей нагрузками. С применением тензометрического метода были получены диаграммы деформирования АКП (рис. 2). При этом средние значения модуля упругости и предела прочности при растяжении составили  $E_f = 50$  ГПа и  $\sigma_b = 1060$  МПа, а при сжатии эти характеристики снизились до  $E_f = 32$  ГПа и  $\sigma_{bc} = 915$  МПа.

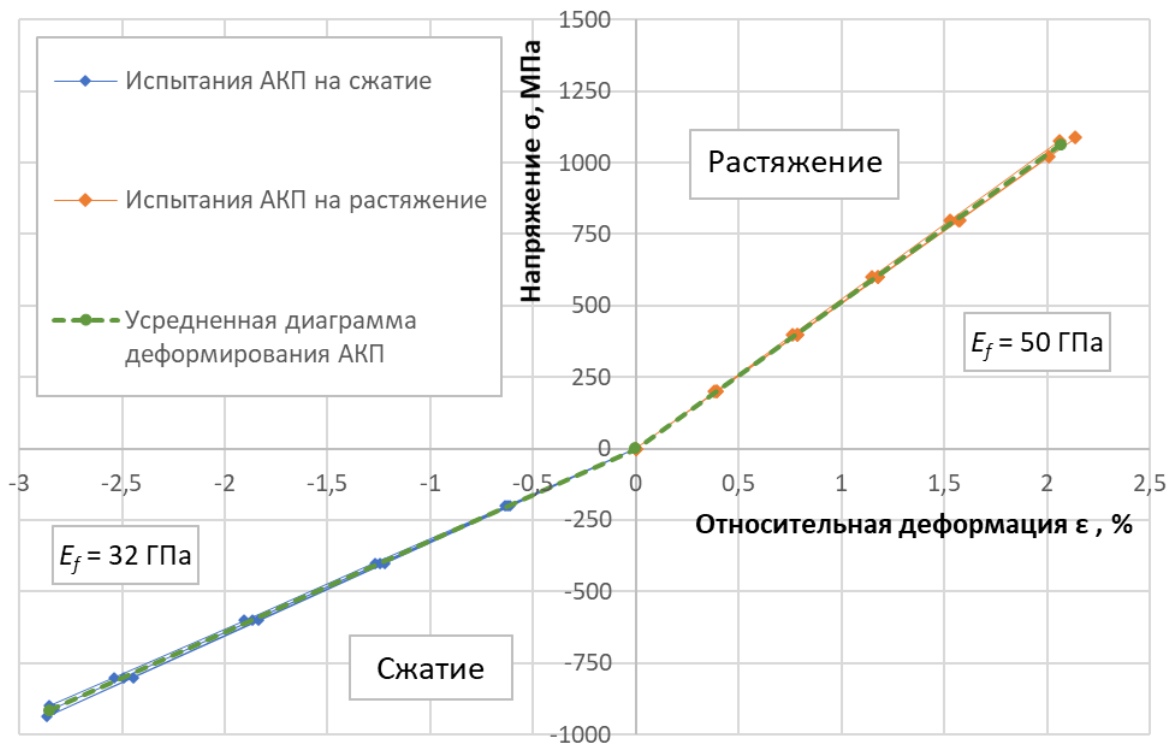


Рис. 2. Диаграмма деформирования АКП  
Fig. 2. Deformation diagram of FRP bars

### **Свойства АКП при длительном нагружении**

При длительном нагружении прочность АКП со временем снижается. Данный эффект во многом зависит от типа полимерного связующего (полимерам свойственна ползучесть), волокон и температурно-влажностных характеристик среды. В настоящее время исследования данного вопроса продолжаются. Согласно СП 295.1325800.2017 расчетное сопротивление АКП растяжению при длительном действии нагрузок составляет 30...60 % от нормативного значения в зависимости от типа арматуры.

### **Свойства АКП при динамических воздействиях**

При динамических воздействиях прочностные и деформационные характеристики материалов отличаются от аналогичных характеристик, полученных при статических испытаниях. Влияние скорости деформирования на свойства АКП сегодня малоизучено. Некоторые зарубежные исследования показали, что значения модуля упругости и предела прочности для АКП



чувствительны к изменению скорости деформирования, при этом величина предельных деформаций изменяется в меньшей степени [14, 15].

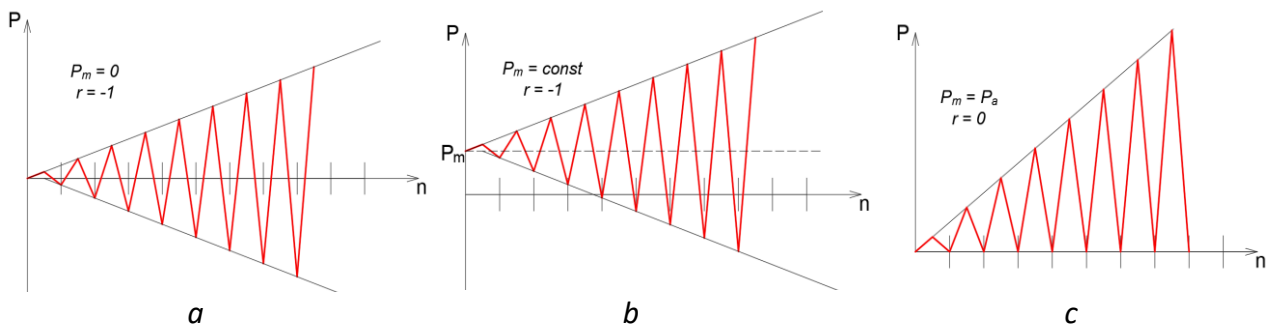
Выявлено динамическое упрочнение при действии кратковременного динамического растяжения и сжатия. Так, авторы работы [7], обобщая, предлагают использовать при расчетах значения расчетных коэффициентов динамического упрочнения для АКП, равные  $k_{f,d} = 1 \dots 1,15$  при растяжении и  $k_{fc,d} = 1 \dots 1,1$  при сжатии.

### **Армированные АКП бетонные конструкции при динамических воздействиях**

В нормативных документах и рекомендациях различных организаций РФ расчеты бетонных конструкций с композитной арматурой при динамических воздействиях не рассмотрены. Нет также рекомендаций по проведению динамических испытаний, и для экспериментов возникает необходимость создания соответствующей методики.

При этом имеется достаточный опыт экспериментальных исследований железобетонных конструкций, который, очевидно, следует учесть при разработке такой методики.

Так, для моделирования малоцикловых динамических нагружений часто применяют приложение возрастающих знакопеременных нагрузок, график изменения которых показан на рис. 3, а [1, 16 и др.].



**Рис. 3.** Графики изменения нагрузки при симметричном (а), асимметричном (b) и пульсирующем (с) циклах нагружения

**Fig. 3.** Load change graphs for symmetric (a), asymmetric (b), and pulsating (c) loading cycles

Отметим, что такое моделирование может быть не совсем корректным для изгибаемых горизонтальных элементов, так как предусматривает симметричный цикл нагружения с коэффициентом асимметрии  $r = -1$ . В пределах одного цикла приложенные усилия достигают максимального ( $P_{\max}$ ) и минимального ( $P_{\min}$ ) значений. В случае симметричного цикла эти значения по абсолютной величине равны, а при асимметричном цикле может быть выделена переменная составляющая с амплитудой (1) и постоянная составляющая (2):

$$P_a = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2}, \quad (1)$$

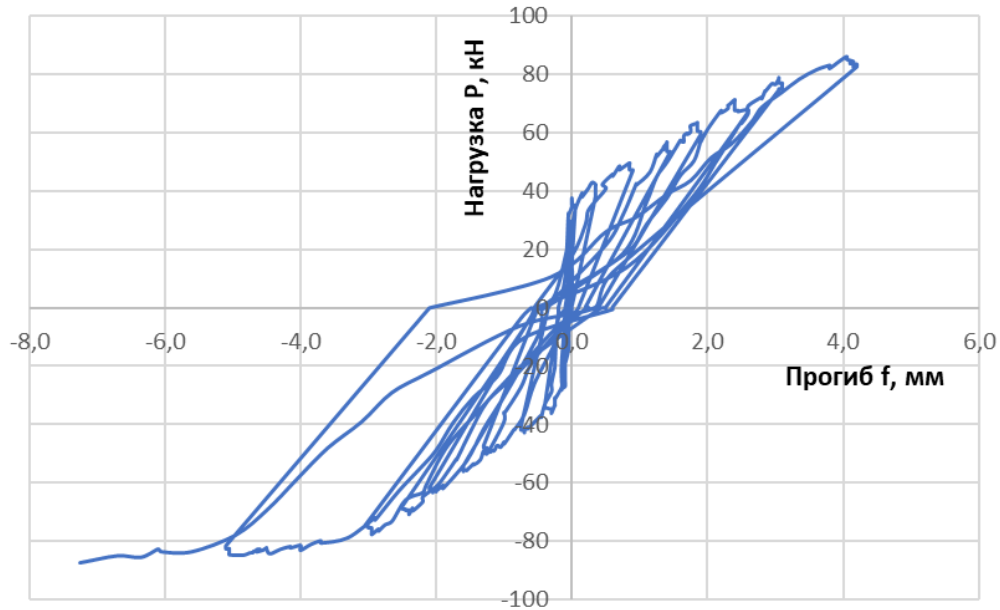
$$P_m = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}. \quad (2)$$

В зависимости от соотношения (3) цикл переменных нагрузок может быть симметричным ( $P_m = 0$ ,  $r = -1$ ), пульсирующим ( $\sigma_m = \sigma_a$ ,  $r = 0$ ) или асимметричным при любых других значениях:

$$r = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (3)$$

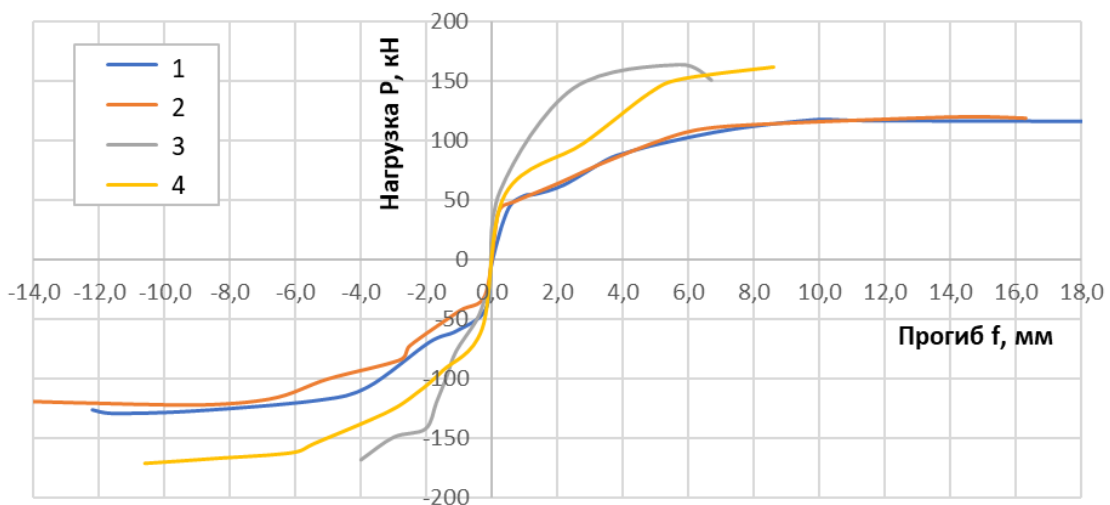
Поскольку к горизонтальным элементам, как правило, приложена полезная нагрузка, их испытания на изгиб следует проводить с асимметричным циклом (рис. 3, b). Пульсирующий цикл можно рекомендовать при испытаниях на растяжение, как это было принято в работе [1], а симметричный — на изгиб вертикальных конструкций.

Применение современного оборудования дает возможность в полуавтоматическом режиме проводить испытания и получать графики показаний измерительных приборов для контролируемых в эксперименте параметров. На рис. 4 приведен пример графика перемещений, полученных по показаниям электронных прогибомеров в испытаниях [1].



**Рис. 4.** Зависимость прогибов середины одной балки от нагрузки  
**Fig. 4.** The dependence of the deflections of the middle of one beam on the load

Учитывая, что при расчетах по первой группе предельных состояний динамические нагрузки, как правило, заменяют квазистатическими с соответствующей диаграммой деформирования материалов, для практических расчетов удобнее использовать огибающие диаграммы, полученные при очерчивании точек с максимальными по абсолютной величине значениями. Огибающие диаграммы также удобны для сравнительного анализа результатов нескольких испытаний, поскольку на одном графике можно показать несколько кривых. Так, в показанном на рис. 5 примере [1] огибающая диаграмма для образца 1 соответствует полной диаграмме по рис. 4.



**Рис. 5.** Огибающие диаграммы для четырех образцов  
**Fig. 5.** Envelope diagrams for four samples



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свойства АКП при статическом кратковременном нагружении хорошо изучены, деформирование композитной арматуры на всем диапазоне нагружения происходит упруго, без образования зон пластических деформаций. При длительном нагружении прочность АКП со временем снижается, что объясняется ползучестью полимеров. Данный эффект во многом зависит от типа полимерного связующего, волокон и температурно-влажностных характеристик среды. При динамических воздействиях прочностные и деформационные характеристики материалов отличаются от аналогичных характеристик при статических испытаниях. Влияние скорости деформирования на свойства АКП по-прежнему остается малоизученным. При действии кратковременного динамического нагружения возможно динамическое упрочнение АКП. Вопрос влияния динамических малоцикловых знакопеременных нагрузок на прочностные и деформационные характеристики АКП остается открытым.

В настоящее время применение АКП для армирования бетонных конструкций, подверженных динамическим воздействиям, не регламентировано действующей нормативно-технической документацией в связи с недостаточной научно-исследовательской базой в этой области. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых бетонных конструкций с АКП при динамических знакопеременных малоцикловых воздействиях будет способствовать расширению области применения АКП в строительстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Квасников А.А., Мартыанов К.В., Пугачев Б.А. Испытания элементов железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 6. С. 24–30. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.06.24-30
2. Берлинов М.В. Длительная эксплуатация гибкого фундамента в условиях нелинейного реологического деформирования при силовых и средовых воздействиях // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 23–32.
3. Гиздатуллин А.Р., Хусаинов Р.Р., Хозин В.Г., Красникова Н.М. Прочность и деформативность бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитными стержнями // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 32–41.
4. Гиздатуллин А.Р., Хозин В.Г., Куклин А.Н. и др. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3. С. 40–47.
5. Жаврид С.С. Исследование противокоррозионной стойкости стеклопластиковой арматуры для бетонных конструкций : дис. ... канд. тех. наук. Минск, 1968.
6. Лапинов А.Е. Обследование и контроль качества конструкций, армированных и усиленных композитными полимерными материалами // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 129–135.
7. Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник ТГАСУ. 2016. № 5 (58).
8. Плевков В.С., Тамразян А.Г., Кудяков К.Л. Прочность и трещиностойкость изгибаемых фибробетонных элементов с преднапряженной стеклокомпозитной арматурой при статическом и кратковременном динамическом нагружении : монография. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2021. 204 с.
9. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26.
10. Савин С.Ю., Колчунов В.В., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 46–54.
11. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Степанов А.Ю. Арматура композитная полимерная и композитные полимерные изделия. М., 2023.
12. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
13. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. М. : Стройиздат, 1980. 104 с.

14. Ocholaa R.O., Marcusa K., Nurickb G.N., Franzc T. Mechanical behavior of glass and carbon fiber reinforced composites at varying strain rates // *Composite Structures*. 2004. Vol. 63. Pp. 455–467.
15. Ray B.C., Rathorea D. A review on mechanical behavior of FRP composites at different loading speeds // *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2015. Vol. 40. Pp. 119–135. DOI: 10.1080/10408436.2014.940443
16. Shahrooz B.M., Remmetter M.E., Qin F. Seismic Design and Performance of Composite Coupled Walls. *Journal of Structural Engineering-Asce*. 1993. No. 119 (11). Pp. 3291–3309. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3291)

## REFERENCES

1. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammatorov A.A., Kvasnikov A.A., Martyanov K.V., Pugachev B.A. Testing of Elements of Reinforced Concrete Structures With Looped Joints of Reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 6:24-30. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.06.24-30 (in Russian).
2. Berlinov M.V. Long-Term Exploitation of a Flexible Foundation in Conditions of Nonlinear Rheological Deformation under Force and Non-Force Influences. *Reinforced concrete structures*. 2024; 8(4):23-32. (in Russian).
3. Gizdatullin G.A., Khusainov R.R., Khozin V.G., Krasinikova N.M. Strength and deformability of concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 62(2):32-41. (in Russian).
4. Gizdatullin A.R., Khozin V.G., Kuklin A.N., Khusnutdinov A.M. Specifics of Testing and Fracture Behavior of Fibre-Reinforced Polymer Bars. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; (3):40-47. (in Russian).
5. Javrid S.S. *Investigation of the corrosion resistance of fiberglass reinforcement for concrete structures : dissertation*. Minsk, 1968. (in Russian).
6. Lapshinov A.E. *Inspection and quality control of reinforced and strengthened structures with FRP structures. Survey of Buildings and Structures: problems and ways to solve them : materials VIII International Scientific and practical conference*. 2017; 129-135. (in Russian).
7. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Strength and deformability of polymer composites under tensile and compressive loads. *Journal of Construction and Architecture*. 2016; 5(58):91-101. (in Russian).
8. Plevkov V.S., Tamrazyan A.G., Kudyakov K.L. Strength and crack resistance of bent fiber-reinforced concrete elements with prestressed glass composite reinforcement under static and short-term dynamic loading. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. (in Russian).
9. Rimshin V.I., Merkulov S.I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:22-26. (in Russian).
10. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):46-54. (in Russian).
11. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Stepanov A.Yu. *Composite polymer fittings and composite polymer products*. Moscow, 2023. (in Russian).
12. Tamrazyan A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):5-18. (in Russian).
13. Frolov N.P. *Fiberglass reinforcement and fiberglass concrete structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. (in Russian).
14. Ocholaa R.O., Marcusa K., Nurickb G.N., Franzc T. Mechanical behavior of glass and carbon fiber reinforced composites at varying strain rates. *Composite Structures*. 2004; 63:455-467.
15. Ray B.C., Rathorea D. A review on mechanical behavior of FRP composites at different loading speeds. *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2015; 40:119-135. DOI: 10.1080/10408436.2014.940443
16. Shahrooz B.M., Remmetter M.E., Qin F. Seismic Design and Performance of Composite Coupled Walls. *Journal of Structural Engineering-Asce*. 1993; 119(11):3291-3309. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3291)



УДК 004.942

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.35-48

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Физически-информированные нейронные сети для задач строительной механики и конструкций: моделирование прогиба однопролетной балки

Захаров Ф.Н.<sup>1\*</sup>, Цянь Цзе<sup>1</sup>, Сюй И<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт Блютаун Леджу Констракшн Менеджмент Ко. Лтд., Ханчжоу, Китай

<sup>2</sup> Институт архитектурного проектирования и исследований провинции Чжэцзян, Ханчжоу, Китай

\* zaharof2010@yandex.ru

**Ключевые слова:** физически-информированные нейронные сети, строительная механика, ограниченный объем данных, искусственный интеллект, расчет балки

### История статьи

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Доработана: 05.02.2025

Принята к публикации: 07.02.2025

### Для цитирования

Захаров Ф.Н., Цянь Цзе, Сюй И. Физически-информированные нейронные сети для задач строительной механики и конструкций: моделирование прогиба однопролетной балки // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 35–48.

**Аннотация.** В статье приведены результаты разработки и анализа моделей физически-информированных нейронных сетей (*PINN*) для расчета прогиба однопролетной балки под действием равномерно распределённой нагрузки. Для обучения модели был синтезирован набор данных на основе аналитических законов строительной механики, включающий параметры: относительная длина участка измерений  $l$ , количество измерительных точек  $N$ , уровень шума  $R$ . Обучающий набор данных содержал 1296 строк, описывающих случайные точки в пределах пролета балки. В рамках исследования обучено 480 моделей *PINN* для оценки влияния веса физической функции потерь, количества измерений и уровня шума на точность предсказаний. Результаты показали, что модели *PINN* достигают высокой точности  $R^2 \geq 0,88$  даже при высоком уровне шума  $R > 20\%$  и демонстрируют устойчивость к низкому и среднему уровням шума. Исследование выявило, что настройка веса физической функции потерь является одним из ключевых параметров для достижения оптимального баланса функциями потерь физических закономерностей и экспериментальных данных. Увеличение количества измерительных точек положительно влияет на точность при низком уровне шума. Увеличение количества измерительных точек при высоком уровне шума измерений снижает точность предсказаний модели. Научная новизна исследования заключается в предложении подхода к расчету строительных конструкций с использованием *PINN*, который интегрирует физические законы в процесс обучения. Полученные результаты подтверждают перспективность использования *PINN* для инженерных расчетов, особенно в условиях ограниченного объема данных.

**Фёдор Николаевич Захаров**, кандидат технических наук, руководитель отдела исследований и разработок, Научно-исследовательский институт Блютаун Леджу Констракшн Менеджмент Ко. Лтд., 310030, г. Ханчжоу, район Сиху, ул. Вэнь Вест Роуд, д. 767, Международный центр Сиси, корпус D, 7-й этаж, провинция Чжэцзян, Китай; eLIBRARY SPIN-код: 2349-1076, ORCID: 0009-0006-6242-8776, E-mail: zaharof2010@yandex.ru.

**Цянь Цзе**, магистр инженерии, генеральный менеджер, Научно-исследовательский институт Блютаун Леджу Констракшн Менеджмент Ко. Лтд., 310030, г. Ханчжоу, район Сиху, ул. Вэнь Вест Роуд, д. 767, Международный центр Сиси, корпус D, 7-й этаж, провинция Чжэцзян, Китай, E-mail: 23539954@qq.com

**Сюй И**, магистр инженерии, старший инженер, Институт архитектурного проектирования и исследований провинции Чжэцзян, 310027, г. Ханчжоу, район Сиху, ул. Юханта, д. 866, провинция Чжэцзян, Китай

© Захаров Ф.Н., Цянь Цзе, Сюй И, 2025



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

# Physics-Informed Neural Networks for Structural Mechanics and Construction: Modeling the Deflection of a Single-Span Beam Physics-Informed Neural Networks

F.N. Zakharov<sup>1\*</sup>, Qian Jie<sup>1</sup>, Xu Yi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Bluetown Leju Construction Management Co. Ltd, Hangzhou, China

<sup>2</sup> Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou, China

\* zaharof2010@yandex.ru

**Keywords:** Physics-Informed Neural Networks, structural mechanics, limited data, artificial intelligence, beam calculation

## Article history

Received: 30.01.2025

Revised: 05.02.2025

Accepted: 07.02.2025

## For citation

Zakharov F.N., Qian Jie, Xu Yi. Physics-Informed Neural Networks for Structural Mechanics and Construction: Modeling the Deflection of a Single-Span Beam Physics-Informed Neural Networks. *Reinforced Concrete Structures*. 2025; 1(9):35-48.

**Abstract.** This article presents the development and analysis of a Physics-Informed Neural Network (*PINN*) model for calculating the deflection of a simply supported beam under uniformly distributed load. The training dataset was synthesized based on analytical principles of structural mechanics and included the following parameters: relative length of the measurement section  $l$ , number of measurement points  $N$ , and noise level  $R$ . The training dataset consisted of 1,296 rows describing random points within the beam span. In this study, 480 *PINN* models were trained to evaluate the impact of the weight of the physics-informed loss function, the number of measurements, and the noise level on prediction accuracy. The results demonstrated that *PINN* models achieve high accuracy ( $R^2 \geq 0.88$ ) even with high noise levels ( $R > 20\%$ ) and exhibit robustness to low and moderate noise levels. The study identified that adjusting the weight of the physics-informed loss function is a key parameter for achieving an optimal balance between the loss functions of physical laws and experimental data. Increasing the number of measurement points positively influences accuracy at low noise levels. However, an increase in the number of measurement points under high noise levels reduces the prediction accuracy of the model. The scientific novelty of the study lies in proposing an approach for structural analysis using *PINN*, which integrates physical laws into the training process. The findings confirm the potential of using *PINN* for engineering calculations, particularly under limited data conditions.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие искусственного интеллекта в последние десятилетия открыло новые возможности для решения сложных инженерных задач. В строительной инженерии традиционно используются аналитические методы и методы конечных элементов (МКЭ) для расчета строительных конструкций. Эти подходы доказали свою эффективность и надежность на протяжении десятилетий. Программное обеспечение на основе МКЭ широко применяется в инженерной практике, обеспечивая высокую точность результатов. Тем не менее методы конечных элементов имеют ряд ограничений, которые могут затруднять их применение в сложных инженерных задачах. Программное обеспечение с МКЭ требует значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации оператора. Особого внимания требуют постановка задачи, точное определение взаимодействия элементов, граничные условия, а также качество исходных данных. Наличие шума в измерениях или неполные данные могут существенно снизить точность результатов.

**Fedor N. Zakharov**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Research and Development Department, Bluetown Leju Construction Management Co. Ltd. Research Institute, 767 Wenyi West Road, Xixi International Center, Building D, 7th Floor, Hangzhou, Xihu District, 310030, Zhejiang Province, China; eLIBRARY SPIN-code: 2349-1076, ORCID: 0009-0006-6242-8776, E-mail: zaharof2010@yandex.ru

**Qian Jie**, Master of Engineering, General Manager, Bluetown Leju Construction Management Co. Ltd. Research Institute, 767 Wenyi West Road, Xixi International Center, Building D, 7th Floor, Hangzhou, Xihu District, 310030, Zhejiang Province, China, E-mail: 23539954@qq.com

**Xu Yi**, Master of Engineering, Senior Engineer, Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, 866 Yuhangtang Road, Hangzhou, Xihu District, 310027, Zhejiang Province, China

Современный уровень развития строительной индустрии и проектирования ставит новые вызовы перед инженерами, требуя более гибких и эффективных методов расчета. Эти методы должны интегрировать физические законы, демонстрировать устойчивость к качеству экспериментальных и измеренных данных, а также обеспечивать высокую точность результатов при ограниченной мощности вычислительным ресурсам и качеству исходной подготовки данных [1–3].

В последние годы методы машинного обучения, включая нейронные сети, получили широкое распространение в решении задач строительной механики. Исследования демонстрируют успешное применение машинного обучения для прогнозирования прочностных характеристик бетона [4–7], а графовые нейронные сети (*GNN*) доказали свою эффективность в задачах проектирования строительных конструкций, таких как оптимизация стальной арматуры и проектирование балок в стеновых системах [8–11]. Однако одной из ключевых особенностей таких моделей остается необходимость в большом объеме данных для обучения, что ограничивает их применение в инженерной практике, где доступность данных часто бывает ограниченной.

Физически-информированные нейронные сети (*PINN*) представляют собой эффективный подход, который позволяет интегрировать физические законы в процесс обучения нейронных сетей [12, 13]. Это делает *PINN* перспективным инструментом для инженерных задач, особенно в условиях ограниченного объема данных или наличия шума. Интеграция физических законов в модели нейронных сетей критически важна для задач, где соблюдение физических и нормативных ограничений является необходимым условием безопасности систем и людей. На сегодняшний день *PINN* применяются для моделирования тепловых процессов и механики материалов [14–16], анализа динамики колебаний [17] и других областей. Однако использование *PINN* для расчетов строительных конструкций, включая задачи строительной механики, остается практически неизученным, открывая широкие перспективы для исследований. Ключевой проблемой при применении *PINN* является недостаток систематического анализа их эффективности в задачах расчета строительных конструкций. Большинство текущих исследований сосредоточены на решении узкоспециализированных задач и не учитывают влияние физических ограничений, параметров модели и качества данных на точность результатов. Этот пробел в научном знании требует детального анализа и разработки подходов, которые позволят повысить точность и надежность моделей *PINN* для инженерного применения.

Таким образом, в рамках настоящего исследования ставятся следующие исследовательские вопросы:

- влияние веса физической функции потерь влияет на точность предсказаний модели *PINN*;
- влияние объема обучающих данных на качество модели *PINN*;
- устойчивость предсказания *PINN* к наличию шума в данных.

Целью данного исследования является разработка и проверка эффективности модели *PINN* для расчета прогиба однопролетной балки, нагруженной равномерной нагрузкой. Особое внимание уделяется влиянию качества и объема обучающих данных на точность модели.

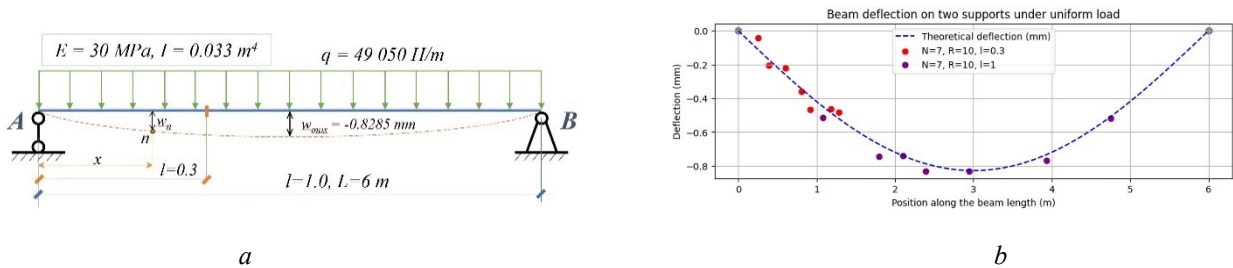
Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать модель *PINN* для расчета прогиба однопролетной балки, нагруженной равномерной нагрузкой.
2. Оценить влияние физической функции потерь на точность предсказаний модели.
3. Исследовать влияние объема обучающих данных на точность предсказаний модели.
4. Проанализировать устойчивость модели к наличию шума в данных.

Научная новизна работы заключается в предложении подхода к расчету строительных конструкций с использованием *PINN*, который интегрирует физические законы в процесс обучения. В рамках исследования демонстрируется устойчивость предложенной модели к шуму в данных и проводится сравнительный анализ ее точности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании *PINN* применяется для расчета прогиба однопролетной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Цель работы заключается в оценке эффективности данного подхода для задач строительной механики и исследовании влияния ключевых параметров на точность моделей. Для расчетов использована расчетная схема балки на двух шарнирных опорах без консолей, выполненной из тяжелого железобетона с постоянным прямоугольным сечением размером  $0,4 \times 1,0$  м. Балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой величиной  $49\,050$  Н/м, что соответствует типовым условиям эксплуатации строительных конструкций. Расчетная схема представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Расчетная схема однопролетной балки с равномерно распределенной нагрузкой, используемая для обучения и оценки модели *PINN*:

*a* — общий вид загрузки; *b* — теоретический прогиб в измерительных точках *n* при  $N = 7$ ,  $R = 10$  %

**Fig. 1.** Computational scheme of a single-span beam with a uniformly distributed load used for training and evaluation of the *PINN* model:

*a* — general view of the loading; *b* — theoretical deflections at measurement points *n* with  $N = 7$ ,  $R = 10$  %

В ходе исследования было обучено 480 моделей *PINN* с использованием обучающего набора данных, который включал следующие переменные:

1.  $l$  — относительная длина участка пролета балки, в пределах которого расположены измерительные точки  $n$ .
2.  $N$  — общее количество точек  $n$ , случайно расположенных вдоль оси балки.
3.  $R$  — степень отклонения значение прогиба от теоретически рассчитанных, %.
4.  $x$  — координата случайной точки  $n$  вдоль продольной оси балки.
5.  $w_n$  — скалярное значение прогиба балки в случайной точке  $n$  с учетом степени отклонения  $R$ .

Обучающий набор данных был искусственно синтезирован с использованием аналитических законов строительной механики. Набор включал 1296 строк, каждая из которых описывала расчетную точку  $n$  с соответствующими параметрами. Точки  $n$  были выбраны случайным образом, без соблюдения равномерности распределения вдоль пролета балки  $L$ , с учетом относительной длины участка  $l$ . Перемещения в крайних точках балки заданы равными нулю для обеспечения граничных условий, соответствующих расчетной схеме. Случайный уровень шума  $R$  к теоретическим значениям прогиба был использован для моделирования неточностей измерений. Значение прогиба  $w_n$  было определено следующим образом:

$$w_n = w_{n,theoretic} \pm A; \quad (1)$$

$$A = \frac{R}{100} \cdot w_{\max}, \quad (2)$$

где  $w_{n, \text{theoretic}}$  — теоретическое значение прогиба балки в точке  $n$ , рассчитанное по аналитической формуле;

$A$  — амплитуда шума, предел для отклонения значения прогиба в точке  $n$ .

Общая архитектура *PINN*, использованная в исследовании, представляла собой адаптированную полносвязную нейронную сеть, которая включала три скрытых слоя по 50 нейронов в каждом. В качестве функции активации использовался гиперболический тангенс ( $\tanh$ ). Выходной слой модели содержал один нейрон, генерирующий скалярное значение прогиба балки для заданной координаты. Обучение модели выполнялось с использованием оптимизатора Adam при скорости обучения 0,01. Была применена ранняя остановка с параметром терпимости, равным 20 эпохам для предотвращения переобучения. Максимальное количество эпох для обучения каждой модели составляло 1000. Функция потерь представляла собой взвешенную сумму ошибок данных и функции физических потерь, определяемую формулой (3):

$$Loss_{total} = (1 - \lambda_{physic}) \cdot Loss_{MSE} + \lambda_{physic} \cdot Loss_{physic}, \quad (3)$$

где  $Loss_{total}$  — общая взвешенная функция потерь модели *PINN*;

$Loss_{MSE}$  — функция потерь данных, основанная на среднеквадратичной ошибке (*MSE*), измеряющая отклонение предсказанных значений от целевых;

$Loss_{physic}$  — функция физических потерь, отражающая отклонение предсказанных значений от аналитического решения уравнения прогиба балки;

$\lambda_{physic}$  — вес физической функции потерь.

Для балки с равномерно распределенной нагрузкой физическая функция потерь  $Loss_{physic}$  рассчитывалась в соответствии с формулой (4), основанной на дифференциальном уравнении прогиба балки:

$$Loss_{physic} = \frac{1}{N'} \sum_{n'=1}^{N'} \left( \frac{d^4 w_{n', predict}}{dx^4} - \frac{q}{EI} \right)^2, \quad (4)$$

где  $N'$  — количество контрольных точек  $n'$ , использованных для вычисления физической функции потерь, в исследовании принято  $n' = 200$ ;

$w_{n', predict}$  — предсказанное значение прогиба балки в контрольных точках;

$q$  — величина равномерно распределенной нагрузки;

$EI$  — жесткость балки на изгиб.

На вход модели подавались координаты точек вдоль продольной оси балки  $x_n$ , относительная длина участка  $l$ , количество измерительных точек  $N$  и уровень шума  $R$ . Диапазоны значений этих параметров, а также значения веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$  приведены в табл. 1. Целевой переменной разработанных моделей является прогиб балки  $w_n$ . Задачей модели являлось восстановление полного распределения прогиба балки  $w_x$  в пределах полного пролета  $L$ , используя ограниченный объем данных  $N$  о замеренных значениях прогиба  $w_n$  в случайных измерительных точках.

Точность моделей оценивалась с использованием классических метрик: среднеквадратичной ошибки (*RMSE*), коэффициента детерминации ( $R^2$ ) и максимальной ошибки. Проверка производилась путем сравнения предсказанных значений прогиба с теоретическими значениями в 200 случайно выбранных точках вдоль пролета балки. Для воспроизводимости был зафиксирован начальный параметр генерации случайных точек  $n$  ( $\text{seed} = 42$ ), обеспечивающий равномерное распределение точек вдоль пролета.

Таблица 1

| Диапазоны входных параметров   |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Параметр                       | Диапазон значений                  |
| Координаты точек               | $0 \leq x_n \leq 6 \text{ м}$      |
| Относительная длина участка    | $0,3 \leq l \leq 1,0$              |
| Количество измерительных точек | $3 \leq N \leq 7$                  |
| Уровень шума                   | $0 \% \leq R \leq 25 \%$           |
| Вес физической функции потерь  | $0 \leq \lambda_{physic} \leq 1,0$ |

Table 1

| Ranges of Input Parameters           |                                    |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| Parameter                            | Value Range                        |
| Coordinates of points                | $0 \leq x_n \leq 6 \text{ m}$      |
| Relative segment length              | $0,3 \leq l \leq 1,0$              |
| Number of measurement points         | $3 \leq N \leq 7$                  |
| Noise level                          | $0 \% \leq R \leq 25 \%$           |
| Weight of the physical loss function | $0 \leq \lambda_{physic} \leq 1,0$ |

Для разработки, обучения моделей и анализа данных использовался Python версии 3.12.3. В качестве специализированных инструментов применялись библиотеки PyTorch (torch) для реализации нейронных сетей, NumPy и Pandas для обработки данных, Matplotlib для визуализации результатов, а также Scikit-learn для расчета метрик и анализа точности. Разработка осуществлялась в среде Visual Studio.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены результаты моделирования прогиба балки с использованием PINN. Анализ фокусируется на влиянии следующих факторов на точность прогнозов:

- вес физической функции потерь  $\lambda_{physic}$ ;
- количество точек измерения  $n$  вдоль балки  $N$ ;
- относительный уровень шума значения прогиба в точке изменения  $R$ .

Далее приводятся графики, табличные данные и визуализации, иллюстрирующие зависимости метрик точности моделей  $R^2$  и  $RMSE$  от указанных параметров. Влияние веса физической функции потерь на предсказания модели проиллюстрировано на рис. 2. На графиках показаны траектории прогиба балки, предсказанные моделью при различных значениях  $\lambda_{physic}$ , для аналогичных значений  $l$ ,  $N$  и  $R$ . Для иллюстрации выбраны два случая: с относительной длиной участка измерительных точек  $l = 0,3$  и  $l = 1,0$ . Также на рис. 2 представлены график сравнения истинных и предсказанных значений и гистограмма остатков для каждого случая. Соответствующие значения параметров и числовые значения метрик для этих случаев приведены в табл. 2.

На рис. 3 представлены графики, демонстрирующие влияние ключевых параметров на метрики точности  $R^2$  и  $RMSE$  моделей PINN. На рис. 4 представлены поверхности зависимости точности моделей  $R^2$  от уровня шума  $R$  и количества точек измерения  $N$  при различных значениях веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$ . Рис. 4 демонстрирует трехмерное представление зависимости, позволяя оценить влияние параметров модели в объемном пространстве. Эти графики позволяют визуализировать, как увеличение веса физической функции потерь, количество точек измерения и уровень шума данных способствуют повышению точности моделей.



Приведены графики для значения относительно длины участка распределения  $l = 0,3$ . Характер распределения значений и зависимостей аналогичен значениям и зависимостям при  $l = 1,0$ . Представленные данные позволяют оценить, как изменение этих параметров влияет на способность моделей *PINN* восстанавливать траекторию прогиба балки с учетом физико-математических закономерностей. Для анализа использованы диапазоны параметров, подробно описанные в разделе 2 «Материалы и методы», чтобы продемонстрировать влияние как отдельных факторов, так и их совместного действия на точность модели.

Таблица 2

Параметры и метрики моделей *PINN* для различных случаев моделирования

| Номер    | Параметры модели |     |     |                    | Метрики модели |           |        |        |        |
|----------|------------------|-----|-----|--------------------|----------------|-----------|--------|--------|--------|
|          | $R$              | $N$ | $l$ | $\lambda_{physic}$ | $R^2$          | Max Error | $MSE$  | $MAE$  | $RMSE$ |
| Случай 1 |                  |     |     |                    |                |           |        |        |        |
| 1        | 20               | 5   | 0,3 | 0,0                | 0,1674         | 0,4954    | 0,0534 | 0,1751 | 0,2310 |
| 2        | 20               | 5   | 0,3 | 0,3                | 0,9832         | 0,1359    | 0,0011 | 0,0147 | 0,0328 |
| 3        | 20               | 5   | 0,3 | 0,8                | 0,9848         | 0,1893    | 0,0010 | 0,0130 | 0,0312 |
| Случай 2 |                  |     |     |                    |                |           |        |        |        |
| 4        | 25               | 7   | 1,0 | 0,0                | 0,4500         | 0,3705    | 0,0352 | 0,1538 | 0,1877 |
| 5        | 25               | 7   | 1,0 | 0,3                | 0,9107         | 0,3203    | 0,0057 | 0,0483 | 0,0756 |
| 6        | 25               | 7   | 1,0 | 0,8                | 0,9752         | 0,1828    | 0,0016 | 0,0280 | 0,0398 |

Table 2

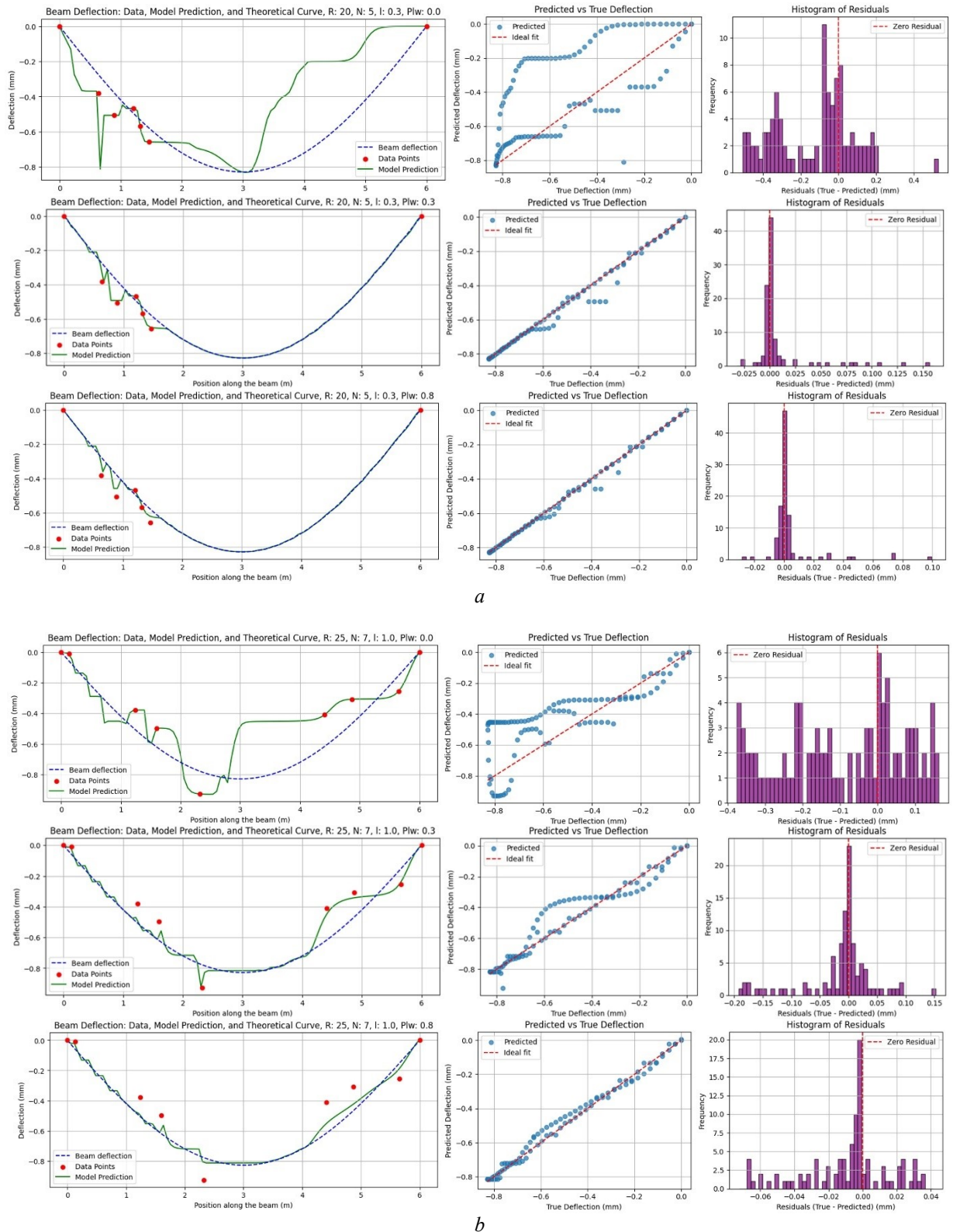
Parameters and Metrics of *PINN* Models for Different Simulation Cases

| Number | Model Parameters |     |     |                    | Model Metrics |           |        |        |        |
|--------|------------------|-----|-----|--------------------|---------------|-----------|--------|--------|--------|
|        | $R$              | $N$ | $l$ | $\lambda_{physic}$ | $R^2$         | Max Error | $MSE$  | $MAE$  | $RMSE$ |
| Case 1 |                  |     |     |                    |               |           |        |        |        |
| 1      | 20               | 5   | 0.3 | 0.0                | 0.1674        | 0.4954    | 0.0534 | 0.1751 | 0.2310 |
| 2      | 20               | 5   | 0.3 | 0.3                | 0.9832        | 0.1359    | 0.0011 | 0.0147 | 0.0328 |
| 3      | 20               | 5   | 0.3 | 0.8                | 0.9848        | 0.1893    | 0.0010 | 0.0130 | 0.0312 |
| Case 2 |                  |     |     |                    |               |           |        |        |        |
| 4      | 25               | 7   | 1.0 | 0.0                | 0.4500        | 0.3705    | 0.0352 | 0.1538 | 0.1877 |
| 5      | 25               | 7   | 1.0 | 0.3                | 0.9107        | 0.3203    | 0.0057 | 0.0483 | 0.0756 |
| 6      | 25               | 7   | 1.0 | 0.8                | 0.9752        | 0.1828    | 0.0016 | 0.0280 | 0.0398 |

Первичный анализ показал, что даже незначительное влияние физической функции потерь, заданное при весе функции  $\lambda_{physic} = 0,1$ , позволяет существенно улучшить метрики точности моделей и повысить качество их предсказаний. Более детальный анализ результатов и выводы будут представлены в следующих разделах.

ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнен детальный анализ влияния ключевых параметров на точность моделей *PINN* в задачах строительной механики. Полученные результаты позволили сформулировать ключевые выводы, отражающие эффективность метода и его возможности для применения в практике инженерных расчетов.

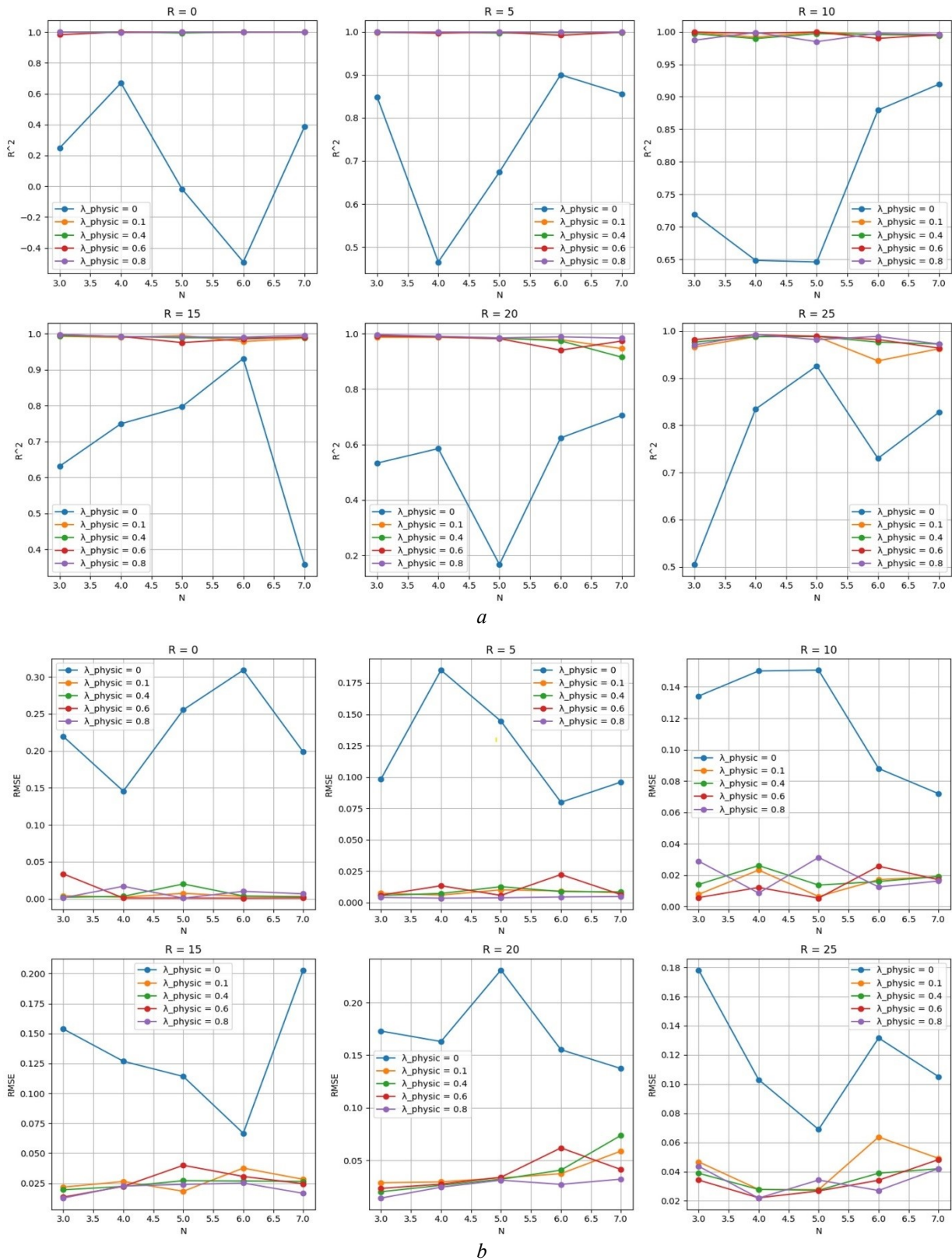


**Рис. 2.** Влияние веса физической функции потерь  $\lambda_{physic} = 0; 0.3; 0.8$  на предсказания модели, траектории прогиба балки, сравнение истинных и предсказанных значений, гистограммы остатков для различных значений:

$a$  — для  $l = 0.3, R = 20\%, N = 5$ ;  $b$  — для  $l = 1.0, R = 25\%, N = 7$

**Fig. 2.** Influence of the weight of the physical loss function  $\lambda_{physic} = 0; 0.3; 0.8$  on the model predictions, deflection trajectories of the beam, comparison of true and predicted values, residual histograms for different values:

$a$  — for  $l = 0.3, R = 20\%, N = 5$ ;  $b$  — for  $l = 1.0, R = 25\%, N = 7$



**Рис. 3.** Влияние количества измерительных точек  $N$  и уровня шума  $R$  на метрики моделей при различных значениях  $\lambda_{physic}$ ,  $l = 0,3$ :

$a$  — для  $R^2$ ;  $b$  — для  $RMSE$

**Fig. 3.** Influence of the number of measurement points  $N$  and noise level  $R$  on the model metrics at different values of  $\lambda_{physic}$ ,  $l = 0,3$ :

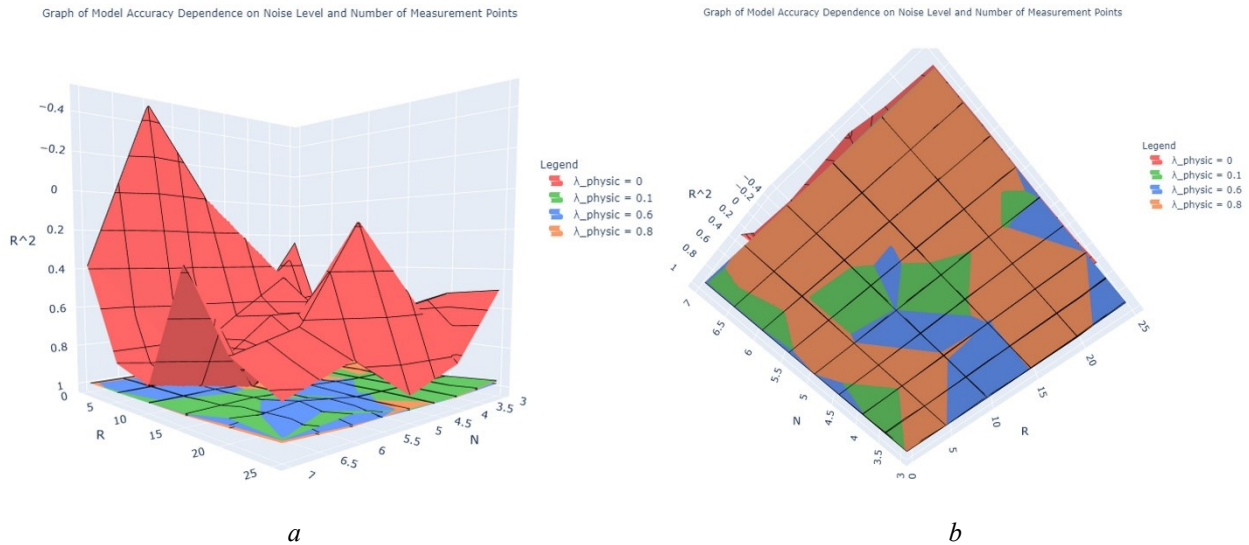
$a$  — for  $R^2$ ;  $b$  — for  $RMSE$

## Анализ построения траекторий прогиба моделями PINN

При весе физической функции потерь  $\lambda_{physic} = 0$  модели PINN демонстрируют слабую сходимость с теоретическими данными, особенно в условиях ограниченного объема экспериментальных данных. Модель преимущественно подстраивается под замеренные точки, теряя способность восстанавливать истинную траекторию прогиба. Это хорошо видно на представленных графиках (рис. 2), где траектория прогиба модели с  $\lambda_{physic} = 0$  значительно отклоняется от теоретических значений, особенно при наличии данных с высоким уровнем шума. Например, в случае 1 ( $R = 20\%$ ,  $N = 5$ ,  $\lambda_{physic} = 0$ ) коэффициент детерминации  $R^2$  составляет всего 0,1674, а максимальная ошибка достигает  $\text{Max Error} = 0,4954$  мм, что свидетельствует о низкой точности модели.

Увеличение  $\lambda_{physic}$  до 0,3 значительно улучшает сходимость модели с теоретическими данными. Коэффициент детерминации увеличивается до  $R^2 = 0,9832$ , а максимальная ошибка снижается до  $\text{Max Error} = 0,1359$  мм. Таким образом, даже при ограниченном объеме данных модель демонстрирует способность восстанавливать истинную траекторию прогиба.

При весе физической функции потерь  $\lambda_{physic} = 0,8$  модель практически полностью следует теоретическому закону, внося незначительные коррективы на основе замеренных значений. Например, в случае 2 ( $R = 25\%$ ,  $N = 7$ ,  $\lambda_{physic} = 0,8$ ) коэффициент достигает  $R^2 = 0,9752$ , а максимальная ошибка снижается до  $\text{Max Error} = 0,1828$  мм. Однако дальнейшее увеличение  $\lambda_{physic}$  до 1,0 приводит к тому, что модель теряет способность обобщать экспериментальные данные и снижается ее применимость в инженерных расчетах.



**Рис. 4.** Трехмерные графики зависимости точности моделей  $R^2$  от уровня шума  $R$  и количества измерительных точек  $N$  при различных значениях  $\lambda_{physic}$ ,  $l = 0,3$ :

$a$  — общий вид;  $b$  — вид нижней плоскости

**Fig. 4.** Three-dimensional graphs of the dependence of model accuracy  $R^2$  on noise level  $R$  and the number of measurement points  $N$  at different values of  $\lambda_{physic}$ ,  $l = 0.3$ :

$a$  — general view;  $b$  — view of the bottom plane

## Анализ графиков зависимости $R^2$ и $RMSE$ от уровня шума $R$ и количества измерительных точек $N$

Анализ графиков зависимости  $R^2$  и  $RMSE$  от уровня шума  $R$  и количества точек измерений  $N$  (рис. 3) также подтверждает, что модели PINN без учета физической функции потерь  $\lambda_{physic} = 0$  демонстрируют крайне нестабильные результаты, включая отрицательные значения  $R^2$ . Это

говорит о неспособности модели в этом случае корректно обобщать данные. Однако даже небольшое увеличение  $\lambda_{physic}$  до 0,1 обеспечивает значительное улучшение метрик:  $R^2$  стабильно достигает диапазона 0,94–1,0 при любом уровне шума и количестве измерений. Интересно, что увеличение количества данных при высоком уровне шума снижает качество модели, тогда как при шуме в пределах  $R < 5\%$   $R^2$  остается практически равным 1.

### Анализ трехмерных графиков

Трехмерные графики зависимости точности модели от уровня шума  $R$  и количества точек измерений  $N$  подтверждают, что увеличение веса физической функции потерь даже до  $\lambda_{physic} = 0,1$  значительно повышает точность предсказаний. При этом плоскость максимальных значений  $R^2$  демонстрирует, что для различных комбинаций  $N$  и  $R$  значения веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$  для максимального  $R^2$  могут различаться. Для некоторых комбинаций  $R$  и  $N$  максимальное  $R^2$  достигается уже при  $\lambda_{physic} = 0,1$ . Это свидетельствует о том, что увеличение веса физической функции потерь не всегда линейно улучшает метрики модели. Таким образом, вес физической функции потерь становится важным гиперпараметром, требующим индивидуальной настройки в зависимости от условий задачи.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что модели *PINN* демонстрируют высокую эффективность в решении задач строительной механики применительно для расчета прогиба однопролетной балки под действием равномерно распределенной нагрузки. Модели показывают высокое качество предсказаний даже при обучении на ограниченном объеме данных, что подчеркивает их применимость в условиях реальных инженерных задач.

Увеличение веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$  ожидаемо улучшает сходимость предсказаний модели с теоретическими значениями прогиба. Однако чрезмерное увеличение веса  $\lambda_{physic}$  снижает учет экспериментальных данных, что может ограничивать применимость модели в реальных задачах проектирования. Оптимальный баланс между физической функцией потерь  $Loss_{physic}$  и математической функцией потерь  $Loss_{MSE}$  варьируется в зависимости от параметров данных и требует настройки веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$  как гиперпараметра.

Результаты также показали, что увеличение количества измерительных точек  $N$  положительно влияет на точность модели при низком уровне шума  $R$ , но при высоком  $R$  увеличение количества данных  $N$  приводит к снижению качества предсказаний.

Модели *PINN* продемонстрировали устойчивость к низкому и среднему уровням шума  $R \leq 5\%$ , при которых коэффициент детерминации  $R^2$  остается близким к 1,00. При увеличении уровня шума  $R > 20\%$  точность моделей несколько снижается, однако даже в этих условиях  $R^2$  сохраняет значения выше 0,88, что свидетельствует о высокой эффективности модели в условиях значительных отклонений данных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования была разработана и проанализирована модель Physics-Informed Neural Networks (*PINN*) для расчета прогиба однопролетной балки под действием равномерно распределенной нагрузки. Для обучения модели был синтезирован набор данных на основе аналитических законов строительной механики, включающий параметры, такие как относительная длина участка распределения измерительных точек балки  $l$ , количество измерительных точек  $N$  и уровень шума измерений  $R$ . Обучающий набор данных содержал 1296 строк, каждая из которых описывала случайную точку в пределах пролета балки.

В рамках исследования была проведена серия обучения 480 моделей *PINN*, в ходе которых изучалось влияние ключевых параметров на точность модели. Были проанализированы зависимости метрик точности ( $R^2$ ,  $RMSE$ ) от уровня шума в данных, количества измерительных



точек и веса физической функции потерь. Модель успешно интегрировала физические законы в процесс обучения, что позволило достичь высокой точности предсказаний даже при ограниченном объеме данных. Основные выводы исследования:

1. Модели *PINN* показали высокую точность предсказаний и устойчивость к низкому и среднему уровням шума. Даже в условиях значительных отклонений данных  $R > 20\%$  точность модели сохранялась на высоком уровне  $R^2 \geq 0,88$ , что подтверждает ее применимость в инженерной практике.

2. Увеличение веса физической функции потерь  $\lambda_{physic}$  улучшает сходимость предсказаний модели с теоретическими значениями, однако чрезмерное увеличение веса  $\lambda_{physic}$  приводит к снижению влияния экспериментальных данных. Поиск оптимального баланса между математической и физической функциями потерь, который обеспечит достаточную точность модели, является задачей настройки гиперпараметров, зависит от условий задачи и требует индивидуального подхода.

3. Увеличение количества измерительных точек  $N$  положительно сказывается на точности модели при низком уровне шума  $R$ . Однако при высоком уровне шума избыток данных может снижать качество предсказаний.

Научная новизна исследования заключается в детальном анализе влияния ключевых параметров, таких как вес физической функции потерь, объем данных и уровень шума, на точность моделей *PINN*. Впервые для задач строительной механики были исследованы и продемонстрированы преимущества *PINN*, которые включают интеграцию физических закономерностей и устойчивость к ограниченному объему данных.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения *PINN* для расчета строительных конструкций в реальных инженерных задачах. Полученные результаты подтверждают перспективность метода для задач, требующих высокой точности и учета физических закономерностей.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в следующем:

- оптимизация гиперпараметров моделей *PINN* для более сложных условий нагрузки и расчетных схем;
- расширение области применения метода, включая расчеты конструкций с переменными нагрузками и сложными граничными условиями;
- использование метода для интеграции данных натурных испытаний и симуляций для повышения точности инженерных расчетов.

Настоящее исследование закладывает основу для дальнейшего применения методов *PINN* в строительной механике и инженерной практике, подчеркивая их эффективность и потенциал для дальнейшего изучения и практического внедрения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят господина Цю Лимина, Президента компании Блютаун Леджу Констракшн Менеджмент Ко. Лтд., за предоставленную поддержку, включая обеспечение необходимыми ресурсами, административное содействие и помощь в установлении значимых контактов. Его неизменная поддержка науки и инноваций заслуживает глубочайшего уважения и высокой оценки, отражая преданность прогрессу и развитию строительной отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szabó B.A., Babuška I. Finite Element Analysis: Method, Verification, and Validation. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2021. 374 p.
2. Ereiz S., Duvnjak I., Jiménez-Alonso J.F. Review of finite element model updating methods for structural applications // Structures. 2022. Vol. 41. Pp. 684–723. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.05.041

3. Cremonesi M., Franci A., Idelsohn S. et al. State of the Art Review of the Particle Finite Element Method (PFEM) // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 27. No. 6. Pp. 1709–1735. DOI: 10.1007/s11831-020-09468-4
4. Gupta P., Gupta N., Saxena K.K. Predicting compressive strength of geopolymer concrete using machine learning // *Innovation and Emerging Technologies*. 2023. Vol. 10. No. 2350003. DOI: 10.1142/S2737599423500032
5. Paudel S., Pudasainee A., Shrestha R.K., Kharel E. Compressive strength of concrete material using machine learning techniques // *Cleaner Engineering and Technology*. 2023. Vol. 15. No. 100661. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100661
6. Pakzad S.S., Roshan N., Ghalehnovi M. Comparison of various machine learning algorithms used for compressive strength prediction of steel fiber-reinforced concrete // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. No. 3646. DOI: 10.1038/s41598-023-30606-y
7. Alyousef R., Rehman M.F., Khan M. et al. Machine learning-driven predictive models for compressive strength of steel fiber reinforced concrete subjected to high temperatures // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. No. e02418. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02418
8. Jia Y., Wang J., Shou W., Hosseini M.R., Bai Y. Graph neural networks for construction applications // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 154. No. 104984. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104984
9. Zhao P., Liao W., Huang Y., Lu X. Beam layout design of shear wall structures based on graph neural networks // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. No. 105223. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105223
10. Li M., Liu Y., Wong B.C.L. et al. Automated structural design optimization of steel reinforcement using graph neural network and exploratory genetic algorithms // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 146. No. 104677. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104677
11. Wu C., Xu X., Jiang R. et al. Graph-based deep learning model for knowledge base completion in constraint management of construction projects // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2023. Vol. 38. No. 6. Pp. 702–719. DOI: 10.1111/mice.12904
12. Xu C., Cao B. T., Yuan Y., Meschke G. Transfer learning based physics-informed neural networks for solving inverse problems in engineering structures under different loading scenarios // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 405. No. 115852. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115852
13. Li Y., Ni P., Sun L., Xia Y. Finite element model-informed deep learning for equivalent force estimation and full-field response calculation // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 206. No. 110892. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110892
14. Yang Z., Gaidhane A.D., Drgoňa J. et al. Physics-constrained graph modeling for building thermal dynamics // *Energy and AI*. 2024. Vol. 16. No. 100346. DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100346
15. Peng J.Z., Hua Y., Li Y.B. et al. Physics-informed graph convolutional neural network for modeling fluid flow and heat convection // *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35. No. 087117. DOI: 10.1063/5.0161114
16. Liu B., Wang Y., Rabczuk T. et al. Multi-scale modeling in thermal conductivity of Polyurethane incorporated with Phase Change Materials using Physics-Informed Neural Networks // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 220. No. 119565. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119565
17. Zhang M., Guo T., Zhang G. et al. Physics-informed deep learning for structural vibration identification and its application on a benchmark structure // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2024. Vol. 382. No. 20220400. DOI: 10.1098/rsta.2022.0400

## REFERENCES

1. Szabó B.A., Babuška I. *Finite Element Analysis: Method, Verification, and Validation*. 2nd ed. Hoboken, Wiley, 2021; 374.
2. Ereiz S., Duvnjak I., Jiménez-Alonso J.F. Review of finite element model updating methods for structural applications. *Structures*. 2022; 41:684-723. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.05.041
3. Cremonesi M., Franci A., Idelsohn S. et al. State of the Art Review of the Particle Finite Element Method (PFEM). *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020; 27(6):1709-1735. DOI: 10.1007/s11831-020-09468-4
4. Gupta P., Gupta N., Saxena K.K. Predicting compressive strength of geopolymer concrete using machine learning. *Innovation and Emerging Technologies*. 2023; 10:2350003. DOI: 10.1142/S2737599423500032
5. Paudel S., Pudasainee A., Shrestha R.K., Kharel E. Compressive strength of concrete material using machine learning techniques. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023; 15:100661. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100661
6. Pakzad S.S., Roshan N., Ghalehnovi M. Comparison of various machine learning algorithms used for compressive strength prediction of steel fiber-reinforced concrete. *Scientific Reports*. 2023; 13:3646. DOI: 10.1038/s41598-023-30606-y
7. Alyousef R., Rehman M.F., Khan M. et al. Machine learning-driven predictive models for compressive strength of steel fiber reinforced concrete subjected to high temperatures. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02418. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02418

8. Jia Y., Wang J., Shou W., Hosseini M.R., Bai Y. Graph neural networks for construction applications. *Automation in Construction*. 2023; 154:104984. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104984
9. Zhao P., Liao W., Huang Y., Lu X. Beam layout design of shear wall structures based on graph neural networks. *Automation in Construction*. 2024; 158:105223. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105223
10. Li M., Liu Y., Wong B.C.L. et al. Automated structural design optimization of steel reinforcement using graph neural network and exploratory genetic algorithms. *Automation in Construction*. 2023; 146:104677. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104677
11. Wu C., Xu X., Jiang R. et al. Graph-based deep learning model for knowledge base completion in constraint management of construction projects. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2023; 38(6):702-719. DOI: 10.1111/mice.12904
12. Xu C., Cao B. T., Yuan Y., Meschke G. Transfer learning based physics-informed neural networks for solving inverse problems in engineering structures under different loading scenarios. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023; 405:115852. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115852
13. Li Y., Ni P., Sun L., Xia Y. Finite element model-informed deep learning for equivalent force estimation and full-field response calculation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024; 206:110892. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110892
14. Yang Z., Gaidhane A.D., Drgoňa J. et al. Physics-constrained graph modeling for building thermal dynamics. *Energy and AI*. 2024; 16:100346. DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100346
15. Peng J.Z., Hua Y., Li Y.B. et al. Physics-informed graph convolutional neural network for modeling fluid flow and heat convection. *Physics of Fluids*. 2023; 35:087117. DOI: 10.1063/5.0161114
16. Liu B., Wang Y., Rabczuk T. et al. Multi-scale modeling in thermal conductivity of Polyurethane incorporated with Phase Change Materials using Physics-Informed Neural Networks. *Renewable Energy*. 2024; 220:119565. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119565
17. Zhang M., Guo T., Zhang G. et al. Physics-informed deep learning for structural vibration identification and its application on a benchmark structure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2024; 382: 20220400. DOI: 10.1098/rsta.2022.0400





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<sup>1\*</sup>, В.В. Тур<sup>2</sup>, Д.О. Глухов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь;

<sup>2</sup> Брестский государственный технический университет (БГТУ), Брест, Беларусь;

<sup>3</sup> 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. Lazovsky<sup>1\*</sup>, V.V. Tur<sup>2</sup>, D.O. Glukhov<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Brest State Technical University (BSTU), Brest, Republic of Belarus;

<sup>3</sup> Soficlub 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: profturvic@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

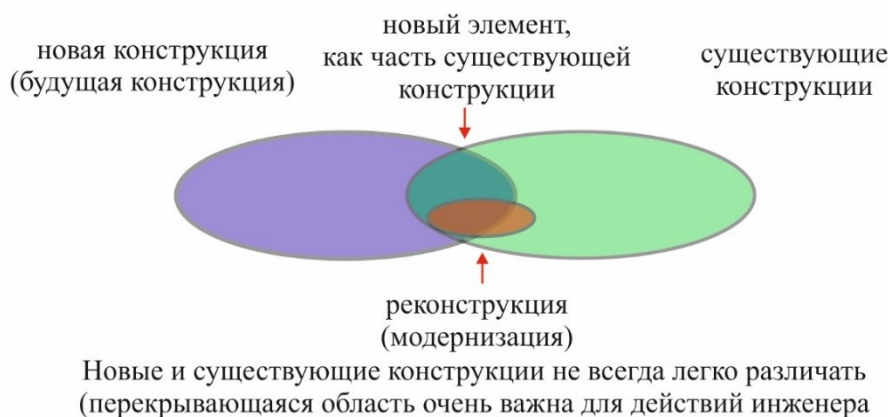
**Viktor V. Tur**, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Building Materials and Concrete Technology, Brest State Technical University (BSTU), 267 Moskovskaja str., Brest, 224017, Republic of Belarus; eLIBRARY SPIN-code: 1741-7652, Scopus: 6507476083, ResearcherID: X- 9477 -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                                 | $\max(1, 8; \beta_{tag,saf})$ ,<br>где $\beta_{tag,saf} = -\Phi^{-1}(1 \times 10^{-3} \cdot t_{ref})$ для всех $A_{col}$                                                                                                                                                                                                 |
| CC2                                 | $\max(2, 3; \beta_{o,t,saf})$ ,<br>где $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(2 \times 10^{-4} \cdot t_{ref})$ при $A_{col} < 100 \text{ м}^2$ ,<br>$\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left( \frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)^{-2}}{0,05} \cdot t_{ref} \right)$ при $A_{col} \geq 100 \text{ м}^2$  |
| CC3                                 | $\max(2, 8; \beta_{o,t,saf})$ ,<br>где $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(5 \times 10^{-5} \cdot t_{ref})$ при $A_{col} < 20 \text{ м}^2$ ,<br>$\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left( \frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,59 \cdot A_{col}^{0,56} - 1)^{-2}}{0,2} \cdot t_{ref} \right)$ при<br>$A_{col} \geq 20 \text{ м}^2$ |

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                                               | $\max(1, 8; \beta_{tag,saf})$ ,<br>where $\beta_{tag,saf} = -\Phi^{-1}(1 \times 10^{-3} \cdot t_{ref})$ for all $A_{col}$                                                                                                                                                                                                  |
| CC2                                               | $\max(2, 3; \beta_{o,t,saf})$ ,<br>where $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(2 \times 10^{-4} \cdot t_{ref})$ for $A_{col} < 100 \text{ м}^2$ ,<br>$\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left( \frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)^{-2}}{0,05} \cdot t_{ref} \right)$ for $A_{col} \geq 100 \text{ м}^2$  |
| CC3                                               | $\max(2, 8; \beta_{o,t,saf})$ ,<br>where $\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1}(5 \times 10^{-5} \cdot t_{ref})$ for $A_{col} < 20 \text{ м}^2$ ,<br>$\beta_{o,t,saf} = -\Phi^{-1} \cdot \left( \frac{5 \times 10^{-5} \cdot (0,59 \cdot A_{col}^{0,56} - 1)^{-2}}{0,2} \cdot t_{ref} \right)$ for<br>$A_{col} \geq 20 \text{ м}^2$ |

Таблица 2

Многоуровневая система оценки надежности согласно СП [12]

| Оце-<br>ноч-<br>ный<br>уро-<br>вень | Модели, применяемые при<br>расчетах сопротивлений                                                                                                                                                          | Методы статических расче-<br>тов для определения<br>эффектов от воздействий                         | Методы оценки<br>надежности                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                   | Модели воздействий и сопротивле-<br>ний, включенные в нормы и строи-<br>тельные правила. Механические свой-<br>ства бетона и арматуры приняты по<br>нормам на основании данных проект-<br>ной документации | Линейно-упругий расчет                                                                              | Оценка конструктивных эле-<br>ментов полувероятностным<br>методом — метод частных ко-<br>эффициентов. Коэффициенты<br>принимают в соответствии<br>нормами и строительными<br>правилами |
| 2                                   |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                        |
| 3                                   |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                        |
| 4                                   | Механические свойства материалов<br>определяют по результатам натурных<br>испытаний ( <i>in-situ</i> )                                                                                                     | Уточненный расчет с уче-<br>том перераспределения<br>усилий (нелинейный или<br>пластический расчет) | Применяют метод частных ко-<br>эффициентов; используют мо-<br>дифицированные значения<br>частных коэффициентов                                                                         |
| 5                                   | Вероятностные модели сопротивле-<br>ний и воздействий                                                                                                                                                      |                                                                                                     | Проверка предельных состоя-<br>ний при помощи полностью<br>вероятностного расчета от-<br>дельных элементов конструк-<br>ций или конструктивной си-<br>стемы в целом                    |

Table 2

Multilevel reliability assessment system according to SP [12]

| Esti-<br>mated<br>level | Models used in resistance<br>calculations                                                                                                                                                                                               | Static calculation methods<br>for determining the effects<br>of impacts                                          | Reliability assessment methods                                                                                                                                                                              |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                       | Load and resistance models included in<br>the norms and building regulations. The<br>mechanical properties of concrete and<br>reinforcement are accepted according<br>to the standards based on the data of the<br>design documentation | Linear-elastic calculation                                                                                       | Evaluation of structural elements<br>by the semi-probabilistic<br>method — the method of partial<br>coefficients. The coefficients are<br>accepted in accordance with the<br>norms and building regulations |
| 2                       |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                             |
| 3                       |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                             |
| 4                       | The mechanical properties of materials<br>are determined based on the results of<br>field tests ( <i>in-situ</i> )                                                                                                                      | Refined calculation taking<br>into account the redistribution<br>of forces (nonlinear or plastic<br>calculation) | The method of partial coeffi-<br>cients is applied; modified values<br>of partial coefficients are used                                                                                                     |
| 5                       | Probabilistic models of resistances and<br>loads                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                  | Verification of limit states using<br>a fully probabilistic calculation<br>of individual structural elements<br>or the structural system as a<br>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 от-каза 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 же-лезобетонного 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 попереч-ного сечения. При обследовании в полевых и лабораторных испытаниях установлены факти-ческие единичные значения следующих базисных переменных: фактического диаметра арма-туры в растянутой зоне с учетом повреждения коррозией; толщины ее защитного слоя; проч-ности 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 ва-риаций определено согласно СП [12], принимая логнормальное (LN) распределение прочности бетона. Статистические параметры для арматуры установлены согласно СН [7]. Учитывая ма-лую изменчивость толщины защитного слоя бетона и диаметра арматуры после коррозионного повреждения (менее 5 %), при дальнейшем анализе в расчетных моделях сопротивлений ис-пользовали средние значения, полученные при проведении обследования. Расчетное значение максимального изгибающего момента в критическом сечении от расчетного сочетания воздей-ствий после изменения плана эксплуатации объекта  $M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$ .

Таблица 3

Значения базисных переменных по результатам натурного обследования

| Но-мер                                                                                                                                                     | Базисная переменная              | Ед. изм. | Выборка единичных результатов испытаний                                                   | Сред-нее значе-ние | Характеристи-ческое 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 проч-ности стандартных кубов на переходной коэффициент 0,8. |                                  |          |                                                                                           |                    |                              |       |

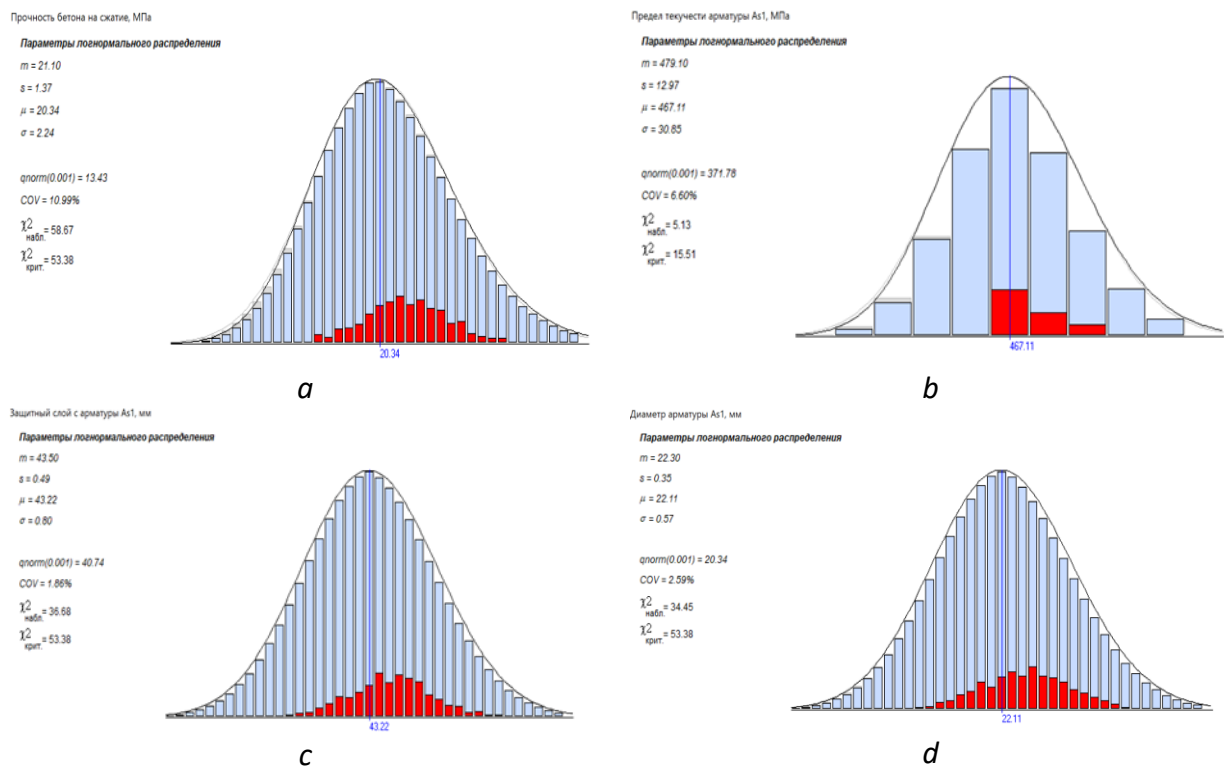
Table 3

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*.

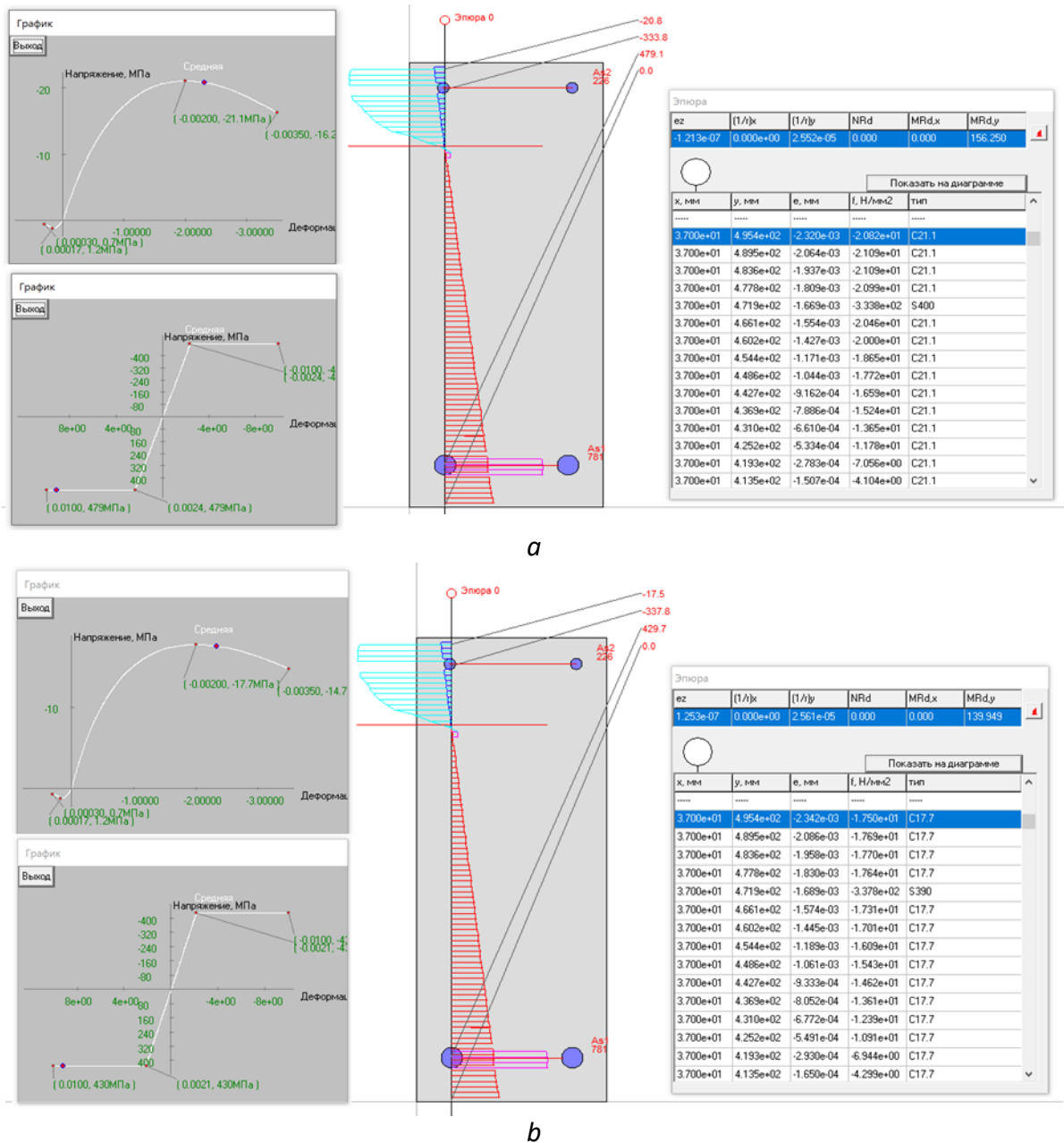
Произведем проверочный расчет обследованной конструкции на 2-м оценочном уровне с использованием нелинейного расчета с использованием деформационной модели в соответствии с положениями СП [18]. Нелинейный анализ сопротивления изгибаемых конструкций выполняем при средних значениях характеристик свойств 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  $\gamma_R$ . 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  $\gamma_R$  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:

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

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:

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

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

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.

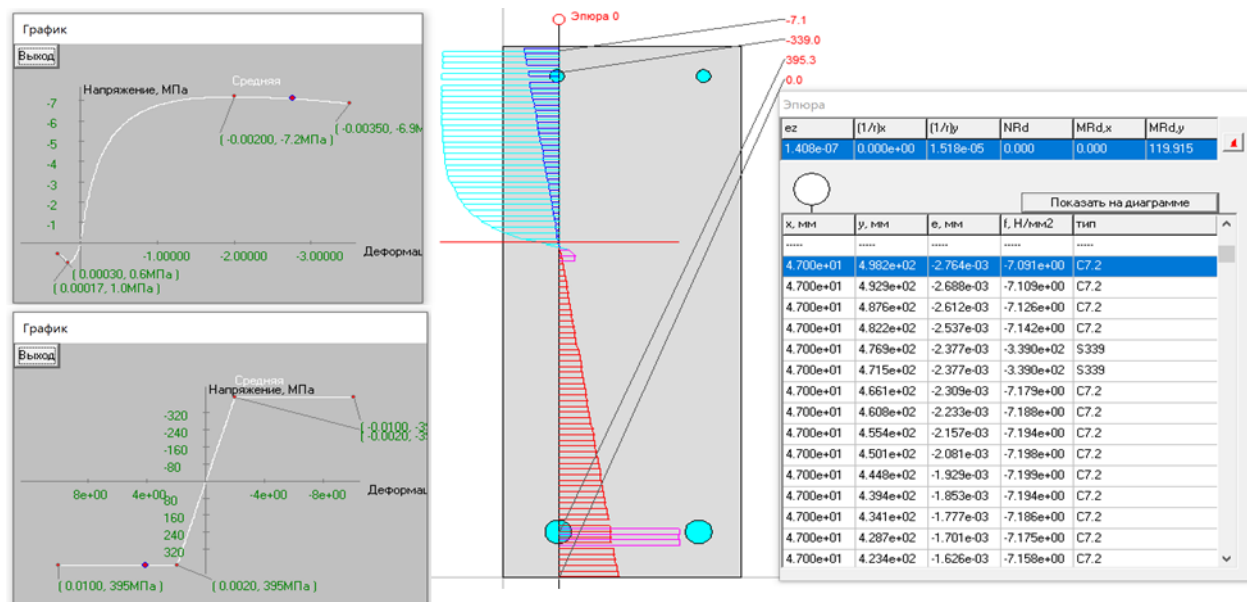
Выполним проверочный расчет на 4-м оценочном уровне с использованием нелинейного расчета по деформационной модели, и выполняя калибровку частных коэффициентов безопасности для бетона и арматуры в соответствии с СП [12]. Частный коэффициент безопасности для материалов определяем по формуле:

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

где  $\gamma_{Rd}$  — 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 —  $\gamma_{Rd,1} = 1,025$ ;  $\gamma_{Rd,2} = 1,05$ ;

$\gamma_m$  — частный коэффициент, учитывающий изменчивость свойств материала ( $\gamma_m$ ), 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:

$$\begin{aligned} \beta_{o,t} &= -\Phi^{-1} \left( \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1)}{0,05} \cdot t_{ref} \right) = \\ &= -\Phi^{-1} \left( \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot (0,27 \cdot 980^{0,5} - 1)}{0,05} \cdot 10 \right) = \Phi^{-1}(0,075) = 1,83 \end{aligned} \quad (6)$$

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

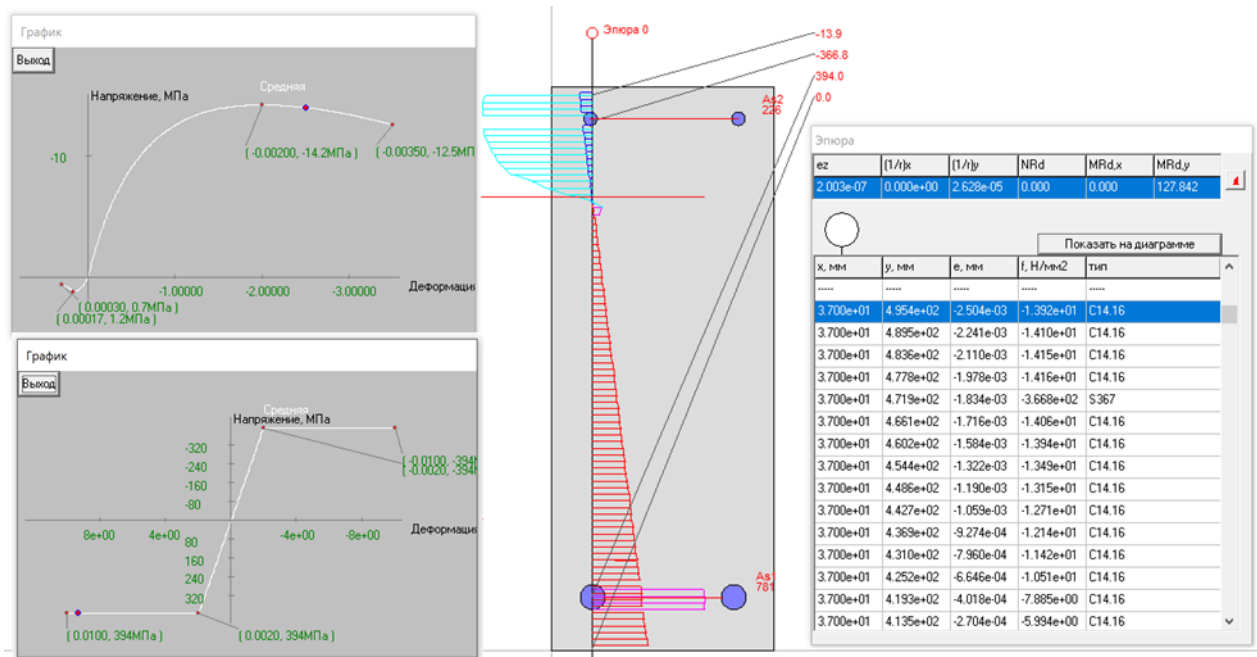
$$\begin{aligned} \text{для бетона: } \gamma_m &= \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,11)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,11)} = \frac{0,819}{0,798} = 1,03; \\ \text{для арматуры: } \gamma_m &= \frac{\mu_x \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,066)}{\mu_x \cdot (1 - 0,8 \cdot 2,3 \cdot 0,066)} = \frac{0,891}{0,879} = 1,014. \end{aligned}$$

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

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

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

Для выполнения расчета по деформационной модели на 4-м уровне с учетом откалиброванных коэффициентов расчетное сопротивление бетона равно:  $f_{cd} = 17,7/1,25 = 14,16 \text{ МПа}$ ; арматуры:  $(A_{s1}) \text{ — } f_{sd} = 429,7/1,09 = 394 \text{ МПа}$ ;  $(A_{s2}) \text{ — } 400/1,09 = 367 \text{ МПа}$ . Измеряемые при обследовании геометрические параметры принимаем равными их средним значениям. Расчетный изгибающий момент изгибаемого элемента равен  $M_{Rd} = 127,84 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$  — 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  $980 \text{ м}^2$  на период времени отнесения отказа  $t_{ref} = 10 \text{ лет}$ . 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 ( $M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ). Индекс надежности, полученный вероятностным расчетом, составил  $\beta = 2,5 > \beta_{0,t} = 1,83$  — 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                                                       |                                                                             | Вероятность разрушения = 2.5%                                               |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                                                   | Изгибающий момент                                                                                 | kNm                                                                                               | Изгибающий момент                                                                                 | kNm                                                                                               | Объем эксперимента                                                          | 1000000                                                                     |                                                                             |  |
| Исх. дан. расч. прогиба                                                                           |                                                                                                   |                                                                                                   | Усилие продольного сжатия                                                                         | kN                                                                                                | Усилие продольного сжатия                                                                         | kN                                                                                                | Индекс надежности                                                           |                                                                             | β = 2.50                                                                    |  |
|                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                                                   | Козф. вариаций по нагрузке                                                                        | %                                                                                                 |                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 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 s арматуры As1, мм                                                                  | Защитный слой s1 арматуры As2, мм                                                                 | Предварительное напр. арматуры As1, мм                                      | Предварительное напр. арматуры As2, мм                                      | Тестовый параметр                                                           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input checked="" type="checkbox"/> Логнормальный<br><input checked="" type="checkbox"/> Таблично | <input type="checkbox"/> Логнормальный<br><input type="checkbox"/> Таблично | <input type="checkbox"/> Логнормальный<br><input type="checkbox"/> Таблично | <input type="checkbox"/> Логнормальный<br><input type="checkbox"/> Таблично |  |
| 20.6                                                                                              | 467                                                                                               |                                                                                                   | 22.3                                                                                              |                                                                                                   | 42.7                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 21.6                                                                                              | 465                                                                                               |                                                                                                   | 22.2                                                                                              |                                                                                                   | 42.8                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 19.7                                                                                              | 473                                                                                               |                                                                                                   | 22.1                                                                                              |                                                                                                   | 44.0                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 19.5                                                                                              | 481.7                                                                                             |                                                                                                   | 23.0                                                                                              |                                                                                                   | 43.4                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 21.1                                                                                              | 475                                                                                               |                                                                                                   | 22.0                                                                                              |                                                                                                   | 44.0                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 21.3                                                                                              | 492                                                                                               |                                                                                                   | 22.5                                                                                              |                                                                                                   | 44.1                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 23.6                                                                                              | 500                                                                                               |                                                                                                   | 22.4                                                                                              |                                                                                                   | 43.7                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 23.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.8                                                                                              |                                                                                                   | 43.2                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 22.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.7                                                                                              |                                                                                                   | 42.8                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 20.0                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.6                                                                                              |                                                                                                   | 44.1                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 20.2                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.1                                                                                              |                                                                                                   | 43.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 19.6                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.0                                                                                              |                                                                                                   | 43.2                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 20.3                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 21.9                                                                                              |                                                                                                   | 43.4                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 22.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 22.0                                                                                              |                                                                                                   | 44.15                                                                                             |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| 20.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   | 21.9                                                                                              |                                                                                                   | 43.5                                                                                              |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                                       | гистограмма                                                                 | гистограмма                                                                 | гистограмма                                                                 |  |
| <input type="checkbox"/> Параметрически                                                           | <input type="checkbox"/> Параметрически                                                           | <input checked="" type="checkbox"/> Параметрически                                                | <input type="checkbox"/> Параметрически                                                           | <input checked="" type="checkbox"/> Параметрически                                                | <input type="checkbox"/> Параметрически                                                           | <input checked="" type="checkbox"/> Параметрически                                                | <input type="checkbox"/> Параметрически                                     | <input type="checkbox"/> Параметрически                                     | <input type="checkbox"/> Параметрически                                     |  |
| среднее                                                                                           | среднее                                                                                           | среднее                                                                                           | среднее                                                                                           | 12                                                                                                | среднее                                                                                           | 36                                                                                                | среднее                                                                     | среднее                                                                     | среднее                                                                     |  |
| По классу                                                                                         | По классу                                                                                         | По классу                                                                                         | По классу                                                                                         |                                                                                                   | По классу                                                                                         |                                                                                                   | По классу                                                                   | По классу                                                                   | По классу                                                                   |  |
| S310                                                                                              | S300                                                                                              | S400                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                                                   |                                                                             |                                                                             |                                                                             |  |
| коэффициент вариации, %                                                                           | коэффициент вариации, %                                                                           | коэффициент вариации, %                                                                           | коэффициент вариации, %                                                                           | 2                                                                                                 | коэффициент вариации, %                                                                           | 2                                                                                                 | коэффициент вариации, %                                                     | коэффициент вариации, %                                                     | коэффициент вариации, %                                                     |  |
| m = 21.10<br>s = 1.37<br>m95 = 20.34<br>s95 = 2.24<br>x0.05 = 16.66                               | m = 479.00<br>s = 12.95<br>m95 = 467.02<br>s95 = 30.80<br>x0.05 = 416.36                          | m = 420.76<br>s = 12.62<br>m95 = 420.76<br>s95 = 12.62<br>x0.05 = 400.00                          | m = 22.30<br>s = 0.35<br>m95 = 22.11<br>s95 = 0.57<br>x0.05 = 21.16                               | m = 12.00<br>s = 0.24<br>m95 = 12.00<br>s95 = 0.24<br>x0.05 = 11.61                               | m = 43.50<br>s = 0.49<br>m95 = 43.22<br>s95 = 0.80<br>x0.05 = 41.90                               | m = 36.00<br>s = 0.72<br>m95 = 36.00<br>s95 = 0.72<br>x0.05 = 34.82                               | m = 0.00<br>s = 0.00<br>m95 = 0.00<br>s95 = 0.00<br>x0.05 = 0.00            | m = 0.00<br>s = 0.00<br>m95 = 0.00<br>s95 = 0.00<br>x0.05 = 0.00            |                                                                             |  |

*a*

Функция предельного состояния, кНм

### Параметры нормального распределения

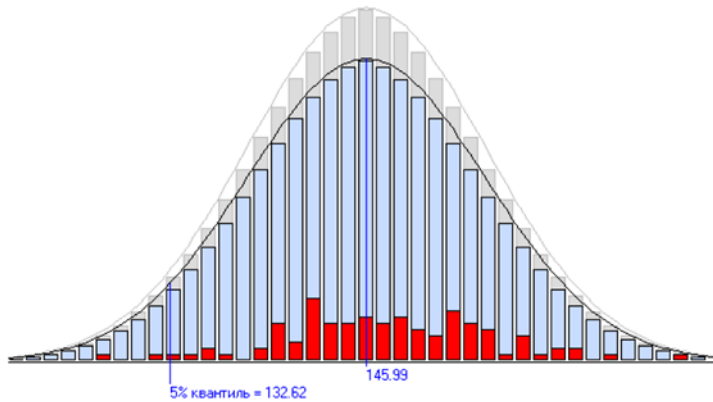
 $m = 147.37$  $s = 6.96$ 
$$\mu = 145.99$$
$$\sigma = 8.13$$
$$qnorm(0.05) = 132.62$$
$$qnorm(0.001) = 120.87$$

COV = 5.57%

 $\chi^2 = 0.50224$ 

набл. \_\_\_\_\_

ж? \_\_\_\_\_

 $\chi^2_{\text{крит.}} = 53.38$ 

*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 measurment // *Structural Safety*. 2020. Vol. 84. P. 101939.
3. *Leque J., Straub D.* Reliability analysis and updating of dtntriorating systems with dynamic Bayesian network // *Structural Safety*. . 2016. Vol. 62. Pp. 34–46.
4. ТР 2009/013/БҮ\*. 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.* Оценивание 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. *Себешиев 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).

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Железобетонные конструкции» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, представляющие международный интерес. Статьи публикуются для широкой международной читательской аудитории.

Статьи принимаются по следующим тематикам:

- Обоснование, исследование и разработка новых типов несущих и ограждающих железобетонных конструкций.
- Обоснование, разработка и оптимизация конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, экономической и конструкционной безопасности на основе математического моделирования с использованием автоматизированных средств исследований и проектирования.
- Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.
- Разработка и совершенствование методов и систем контроля качества строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации, усиления и восстановления.
- Методы оценки, мониторинга и диагностики технического состояния, усиление и восстановление конструкций и элементов эксплуатируемых зданий и сооружений.
- Оптимальное проектирование железобетонных конструкций.
- Исследование конструктивной безопасности и живучести строительных систем при проектных и запроектных воздействиях.
- Разработка методов расчета железобетонных конструкций при различных силовых и средовых воздействиях, прогнозирование сроков их службы.
- Снижение рисков и обеспечение надежности и конструктивной безопасности зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера (огневых, различных динамических, аварийных ударных) и запроектных воздействиях.
- Развитие теории расчета железобетонных конструкций.
- Сейсмостойкость зданий и сооружений.
- Компьютерное моделирование в строительстве.

К рассмотрению принимаются статьи со структурой, соответствующей международному стандарту **IMRAD**.

1. **Введение (Introduction)**. Раздел, который начинается с описания объекта исследования, затем формулируется актуальность исследования. Приводится обзор мировой литературы, подтверждающий отсутствие в литературных источниках решения данной задачи и указывающий предшественников, на исследованиях которых базируется работа. Формулируется постановка цели исследования, вытекающая из результатов обзора литературы и содержащая перечень намеченных к решению задач.

2. **Метод (Methods)**. В данном разделе подробно описывается выбранный метод исследования. Метод должен быть расписан таким образом, чтобы другой исследователь был способен его воспроизвести.

3. **Результаты и обсуждение (Results and Discussion)**. Результаты рекомендуется представлять преимущественно в виде таблиц, графиков и других иллюстраций. Этот раздел включает анализ полученных результатов, их интерпретацию, сравнение с результатами других авторов.

4. **Заключение (Conclusions)**, в котором кратко подводятся итоги научного исследования. Заключение содержит нумерованные выводы, кратко формулирующие основные научные результаты статьи как установленные авторами зависимости (связи) между параметрами объекта исследования. Выводы должны логически соответствовать поставленным в начале статьи задачам.

5. **Благодарности (Acknowledgement)**. Данный раздел не является обязательным, в нем выражается благодарность за финансовую, информационную и другую поддержку, оказанную в ходе написания статьи.

Представительный список литературы к обзору состояния исследований в мировой научной литературе по рассматриваемой в статье проблеме (раздел **Введение**) характеризует актуальность и качественный уровень проведенных автором исследований. Данные рекомендации составлены согласно общемировым тенденциям и способствуют большей открытости научных публикаций, а также улучшают показатели статей и их авторов в базах данных.

Рекомендации по полноте и представительности:

1. **Объем**. В список литературы рекомендуется включать ссылки на научные статьи, монографии, сборники статей, сборники конференций, электронные ресурсы с указанием даты обращения, патенты. Рекомендуемый объем списка литературы — 20–40 источников, не считая труднодоступных и нормативных источников, а также ссылок на интернет-ресурсы, не являющиеся научными периодическими изданиями. Под труднодоступными источниками понимаются отчеты, альбомы типовых решений и другие подобные источники, отсутствующие в ка-

талогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ). Под нормативными источниками понимаются законы, ГОСТы, СНиПы, СП, а также их иностранные аналоги. Под интернет-ресурсами понимаются сайты в сети Интернет, публикующие информацию без осуществления научного рецензирования. Труднодоступные и нормативные источники рекомендуется упоминать в тексте статьи. Настоятельно не рекомендуем включать в список литературы ссылки на диссертации, авторефераты диссертаций, учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций и другую учебную литературу.

2. Актуальность. Для представительного обзора литературы необходимо, чтобы источники были актуальными. Рекомендуем иметь в списке литературы не менее 8 публикаций, опубликованных за последние 10 лет, 5 из них — не старше 3 лет.

3. География. Согласно требованиям журнала, обзор литературы должен подтверждать отсутствие решения поставленной цели в мировой литературе, в связи с чем рекомендуем иметь в списке литературы не только российские, но и иностранные публикации. Рекомендуемый объем — не менее половины от общего числа источников в списке литературы. Под иностранными источниками понимаются публикации, опубликованные в иностранном журнале (не российском). Язык публикации в данном случае не имеет значения.

4. Уровень публикаций. Рекомендуется, чтобы не менее 6 из иностранных и не менее 6 из российских источников были включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science;
- Scopus;
- Российский индекс научного цитирования.

5. Самоцитирование. В рамках ограничения самоцитирования **не рекомендуется включать более 5 источников, автором или соавтором которых являются авторы статьи.**

Цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания источников в тексте. Порядковый номер в тексте заключается в квадратные скобки (например, [9], [11, 12], [16–20]). Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы.

Просим Вас при ссылке на источник использовать его официальные метаданные как на русском, так и на английском языке, указанные в источнике. Приветствуется указывать DOI в случае его наличия.

Список литературы на русском языке должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008.

Рекомендуется при оформлении списка литературы использовать приложение Mendeley для Windows или Mac — <https://www.mendeley.com> Стиль оформления русскоязычного списка литературы — Russian GOST R 7.0.5–2008 (numeric).

В списке литературы на английском языке русскоязычные источники, не имеющие перевода на английский язык, указываются в транслитерации и с приблизительным переводом на английский язык в квадратных скобках. Транслитерация осуществляется по системе Библиотеки Конгресса США (ALA-LC).

Рекомендуемый объем статей: от 15 000 до 30 000 знаков с пробелами.

Гарнитура шрифта — Times New Roman. Размер шрифта основного текста — 12; заглавия — 14; аннотации, подписочных надписей, содержания таблиц, списка литературы — 10, междустрочный интервал — одинарный, абзацный отступ — 0,75 см.

**С полной версией требований к оформлению научных статей можно ознакомиться на сайте:**  
**<https://g-b-k.ru>**