

Учредитель: Ассоциация «Железобетон»
Адрес: Рязанский просп., д. 22, корп. 2,
г. Москва, 109428, Российская Федерация
Издатель: АО «НИЦ «Строительство»
Адрес: 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 1,
г. Москва, 109428, Российская Федерация

Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-76959 от 09.10.2019.

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
Эл № ФС77-86552 от 26.12.2023.

ISSN 0005-9889 (Print)
ISSN 3034-1302 (Online)

Основен: Институт НИИЖБ Госстроя СССР
и ВНИИЖелезобетон
Минстройматериалов СССР

Авторы

опубликованных материалов несут
ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе
и за использование в статьях данных,
не подлежащих открытой публикации.

Редакция

может опубликовать статьи
в порядке обсуждения,
не разделяя точку зрения автора.

Перепечатка

и воспроизведение статей, рекламных
и иллюстративных материалов возможны
лишь с письменного разрешения главного
редактора.

**Редакция не несет ответственности
за содержание рекламы и объявлений.**

Адрес редакции: 2-я Институтская ул., д. 6,
корп. 1, г. Москва, 109428, Российская
Федерация
Тел.: +7(495) 602-00-70, доб. 1022/1023
E-mail: bzhhb.ru@yandex.ru
http://bzhhb.ru

Свободная цена

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

3 (628)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

И.В. БАКЛЫКОВ

**Сравнительный анализ применения трубобетонных конструкций в
гидротехническом строительстве на основе анализа напряженно-
деформированного состояния.**

5

А.К. ЖАЛНИН

**Сравнение расчетной ширины раскрытия трещин
на раннем этапе твердения бетона**

20

И.А. ИВАНОВ

**Восстановление изношенных железобетонных конструкций
материалами с эффектом памяти формы.**

33

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

А.В. БУЧКИН, Г.В. ЧЕХНИЙ, Н.К. РОЗЕНТАЛЬ, С.А. ОРЕХОВ, С.И. ИВАНОВ,
А.И. ПАСТУХОВ

**Опыт применения численных расчетов термонапряженного
состояния бетона в процессе замораживания и оттаивания
образцов по ГОСТ 10060–2012.**

40

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, Н.И. КАРПЕНКО, Н.М. СЕЛЮТИН, Г.А. МОИСЕЕНКО,
И.М. БЕЗГODOV

**Прочностные и деформационные характеристики
высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов
на искусственных и природных пористых заполнителях.**

52

О.В. РАДАЙКИН

**Уточнение положений метода предельных состояний
в части нормирования зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » бетона
при сжатии и растяжении. Часть 1.**

69

С.В. СНИМЦИКОВ, И.П. САВРАСОВ, М.С. ЧАРУШИН

**Количественная оценка качества строительной
продукции с применением программных комплексов
и машинопонимаемых стандартов.**

80

В.В. ТКАЧЕНКО

**Глубина цифровизации самого большого сектора
строительства России – ИЖС**

89

Founder of the journal:

«Reinforced concrete» Association

Address: 22, building 2, Ryazansky prospect,
Moscow, 109428, Russian Federation**Publisher:** JSC Research Center of Construction**Address:** 6, bld. 1, 2nd Institutskaya str.,
Moscow, 109428, Russian FederationRegistered by the Federal Service for
Supervision of Communications and
Information Technologies and mass
communications (ROSKOMNADZOR).

Mass media registration certificate

PI No. FS77-76959 dated October 09, 2019.

Mass media registration certificate

EI No. FS77-86552 dated December 26, 2023.

ISSN 0005-9889 (Print)

ISSN 3034-1302 (Online)

Founded: Institutes of NIIZhB Gosstroy of the
USSR and VNIIZhelezobeton of the USSR
Ministry of Construction Materials

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

3 (628)

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

I.V. BAKLYKOV

**Comparative analysis of the application of concrete-filled
steel tube structures in hydraulic engineering based
on the analysis of the stress-strain state****5**

A.K. ZHALNIN

**Comparison of the estimated crack opening width at an early
stage of concrete hardening.****20**

I.A. IVANOV

**Restoration of worn-out reinforced concrete structures
with materials with shape memory effect****33**

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

A.V. BUCHKIN, G.V. CHEKHNI, N.K. ROZENTAL, S.A. OREKHOV, S.I. IVANOV,
A.I. PASTUKHOV**Experience of using numerical calculations of thermally stressed
state of concrete during freezing and thawing of samples
as per State Standard 10060-2012****40**S.S. KAPRILOV, A.V. SHEYNFELD, N.I. KARPENKO, N.M. SELUTIN, G.A. MOISEENKO,
I.M. BEZGODOV**Strength and deformation characteristics of high-strength
self-sealing lightweight concretes on artificial
and natural porous fillers****52**

O.V. RADAYKIN

**Clarification of the provisions of the limit state method
regarding the normalization of the " $\sigma - \epsilon$ " dependences
of concrete under compression and tension. Part 1****69**

S.V. SNIMSHCHIKOV, I.P. SAVRASOV, M.S. CHARUSHIN

**Quantitative assessment of the quality of construction
products using software packages and machine-readable
standards.****80**

V.V. TKACHENKO

**The depth of digitalization of Russia's largest construction
sector – individual housing construction****89****The authors**of published materials are responsible for the
accuracy of the submitted information, the
accuracy of the data from the cited literature
and for using in articles data which are not
open to the public.**The Editorial Staff**can publish the articles as a matter
for discussion, not sharing the point of view
of the author.**Reprinting**and reproduction of articles, promotional and
illustrative materials are possible only with the
written permission of the editor-in-chief.**The Editorial Staff is not responsible
for the content of advertisements
and announcements.****Editorial address:** 6, bld. 1, 2nd Institutskaya
str., Moscow, 109428, Russian Federation**Tel.:** +7(495) 602-00-70, add. 1022/1023**E-mail:** bzhhb.ru@yandex.ru**http://bzhhb.ru**

Free price

Редакционная коллегия

ЗВЕЗДОВ А.И., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

КУЗЕВАНОВ Д.В., заместитель главного редактора, канд. техн. наук, директор, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

СМИРНОВА Л.Н., научный редактор, канд. техн. наук, доцент, ученый секретарь, АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

АРХИПКИНА А.А., Ассоциация «Железобетон» (Москва, Российская Федерация)

ГУСЕВ Б.В., д-р техн. наук, профессор, президент Российской инженерной академии (РИА), президент Международной инженерной академии (МИА), член-корреспондент РАН (Москва, Российская Федерация)

ЙЕНСЕН О.М., д-р техн. наук, профессор Датского технического университета (Дания)

КАПРИЕЛОВ С.С., д-р техн. наук, заведующий лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», академик РААСН (Москва, Российская Федерация)

КРЫЛОВ С.Б., д-р техн. наук, заведующий лабораторией механики железобетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», академик РААСН (Москва, Российская Федерация)

МАИЛЯН Д.Р., д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

МОРОЗОВ В.И., д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

МЮЛЛЕР Х.С., д-р техн. наук, профессор Университета Карлсруэ, Институт технологии – KIT (Германия)

НЕСВЕТАЕВ Г.В., д-р техн. наук, заведующий кафедрой технологии строительного производства, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

РАХМАНОВ В.А., канд. техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, председатель Совета директоров, ООО «Институт ВНИИЖБ» (Москва, Российская Федерация)

СТЕПАНОВА В.Ф., д-р техн. наук, заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

ТАМРАЗЯН А.Г., д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, советник РААСН (Москва, Российская Федерация)

ТИХОНОВ И.Н., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

ТРАВУШ В.И., д-р техн. наук, главный конструктор, заместитель генерального директора по научной работе, ЗАО «ГОРПРОЕКТ», вице-президент РААСН (Москва, Российская Федерация)

ТРЕКИН Н.Н., д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, АО «ЦНИИПромзданий» (Москва, Российская Федерация)

УШЕРОВ-МАРШАК А.В., д-р техн. наук, профессор Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры (Харьков, Украина)

ФАЛИКМАН В.Р., канд. хим. наук, д-р материаловедения, руководитель центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

ХОЗИН В.Г., д-р техн. наук, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань, Российская Федерация)

Editorial team

ZVEZDOV A.I., Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

KUZEVANOV D.V., Deputy Chief Editor, Cand. Sci. (Engineering), Director of the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

SMIRNOVA L.N., Scientific Editor, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

ARKHIPKIN A.A., Reinforced Concrete Association (Moscow, Russian Federation)

GUSEV B.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Russian Academy of Engineering (RAE), President of International Academy of Engineering (IAE), Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)

JENSEN O.M., Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Danish Technical University (Denmark)

KAPRILOV S.S., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Chemical Additives and Modified Concrete, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

KRYLOV S.B., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

MAILYAN D.R., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

MOROZOV V.I., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, St. Petersburg State University of the Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg, Russian Federation)

MULLER H.S., Dr. Sci. (Engineering), Professor of the University of Karlsruhe, Institute of Technology – KIT (Germany)

NESVETAEV G.V., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Construction Technology, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

RAKHMANOV V.A., Cand. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Chairman of the Board of Directors, "Institute VNIIZhelezobeton" LLC (Moscow, Russian Federation)

STEPANOVA V.F., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

TAMRAZIAN A.G., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Counselor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

TIKHONOV I.N., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

TRAVUSH V.I., Dr. Sci. (Engineering), Chief Designer, Deputy Director General for Research "GORPROEKT" CJSC, Vice-President of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

TREKIN N.N., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director for Research, Tsniipromzdaniy JSC (Moscow, Russian Federation)

USHEROV-MARSHAK A.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor of Kharkov State Technical University of Construction and Architecture (Kharkiv, Ukraine)

FALIKMAN V.R., Cand. Sci. (Chemistry), Dr. of materials, Head of the Center for Scientific and Technical Assistance at Complex Facilities Construction, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

KHOZIN V.G., Dr. Sci. (Engineering), Head of the Building Materials, Products and Structures Technology Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, Russian Federation)

Since June 10, 2024 scientific and technical journal Concrete and reinforced concrete has been included into the List of the Higher Attestation Commission in the following branches of science:

2.1.1 – Building constructions, buildings and structures;

2.1.5 – Building materials and products.

УДК 624.012.45:691.175.54

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19)**И.В. БАКЛЫКОВ**

АО «Институт Гидропроект», Волоколамское шоссе, д. 2, г. Москва, 125993, Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация

Введение. В статье рассматривается использование трубобетона в гидротехническом строительстве, а также проводится сравнение различных конструктивных вариантов с точки зрения напряженно-деформированного состояния и несущей способности.

Цель. Анализ применения трубобетона и различных подходов к его проектированию, а также сравнение напряженно-деформированного состояния различных конструктивных решений.

Материалы и методы. Расчеты железобетонных конструкций были выполнены методом конечных элементов с применением нелинейных моделей в программном обеспечении ANSYS.

Результаты. Результаты расчетов показали, что для монолитного бетонного стержня (без арматуры) несущая способность составила 56,28 кНм, для железобетонного стержня с арматурой несущая способность составила 416,60 кНм, для металлической трубы – 639,07 кНм, для трубобетона (металлическая труба, заполненная бетоном) увеличение несущей способности составило до 768,76 кНм, армированный трубобетон показал наибольшую несущую способность – 1085,50 кНм.

Выводы. Результаты расчетов и сравнительного анализа показывают, что армированный трубобетон является наиболее эффективным с точки зрения несущей способности, хотя и имеет более высокую стоимость. В то же время железобетон и металлические трубы предлагают более экономичный вариант, но с меньшей несущей способностью. Выбор

материала зависит от конкретных требований проекта, включая нагрузки, стоимость и условия эксплуатации.

Ключевые слова: трубобетон, шпунт, расчетные исследования, несущая способность, изгибающий момент, напряженно-деформированное состояние, нелинейный бетон, трещинообразование, гидротехническое сооружение

Для цитирования: Баклыков И.В. Сравнительный анализ применения трубобетонных конструкций в гидротехническом строительстве на основе анализа напряженно-деформированного состояния // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 5–19. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19). EDN: HXGXVQ

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.02.2025

Поступила после рецензирования 31.03.2025

Принята к публикации 03.04.2025

I.V. BAKLYKOV

Hydroproject Institute JSC, Volokolamskoe Shosse, 2, Moscow, 125993, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF CONCRETE—FILLED STEEL TUBE STRUCTURES IN HYDRAULIC ENGINEERING BASED ON THE ANALYSIS OF THE STRESS—STRAIN STATE

Abstract

Introduction. The article examines the use of concrete-filled steel tube (CFST) structures in hydraulic engineering and compares various structural options in terms of their stress-strain state and load-bearing capacity.

Aim. The main goal of the work is to analyze the application of concrete-filled steel tubes and various approaches to their design, as well as to compare the stress-strain states of different structural solutions.

Materials and methods. The calculations of reinforced concrete structures were performed using the finite element method with nonlinear models in ANSYS software.

Results. The calculation results showed that for monolithic concrete pipes (without reinforcement), the load-bearing capacity was 56.28 kNm; for reinforced concrete pipes, the load-bearing capacity was 416.60 kNm; for the metal pipe, it was 639.07 kNm; for the concrete-filled steel pipe (tubular concrete), the load-bearing capacity increased to 768.76 kNm; and for reinforced concrete-filled steel pipe, the highest load-bearing capacity was 1085.50 kNm.

Conclusions. The calculation results and comparative analysis show that reinforced tubular concrete is the most effective in terms of load-bearing capacity, although it has a higher cost. At the same time, reinforced concrete and metal pipes offer a more economical option but with lower load-bearing capacity. The choice of material depends on the specific project requirements, including loads, cost, and operating conditions.

Keywords: concrete-filled steel tube, sheet pile, computational studies, load-bearing capacity, bending moment, stress-strain state, nonlinear deformation of concrete, crack formation, hydraulic structure

For citation: Baklykov I.V. Comparative analysis of the application of concrete-filled steel tube structures in hydraulic engineering based on the analysis of the stress-strain state. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 5–19. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19). EDN: HXGXBXQ

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 11.02.2025

Revised 31.03.2025

Accepted 03.04.2025

Введение

Трубобетон – это строительный материал, представляющий собой бетон, который твердеет внутри металлических труб, фактически создающих несъемную опалубку для бетона. Он находит широкое применение в различных сферах строительства, включая возведение гидротехнических объектов, мостов, трубопроводов, а также для устройства свай и фундаментных конструкций.

Состав трубобетона аналогичен обычному бетону и включает цемент, песок, щебень (или другие заполнители) и воду. Однако его особенностью является то, что бетон заполняется в металлические трубы, которые служат опалубкой, обеспечивая прочность. Кроме того, как будет показано далее, трубы увеличивают несущую способность конструкции в целом.

Трубобетон обладает несколькими важными преимуществами по сравнению с традиционными конструкциями, что делает его популярным в строительстве:

- высокая несущая способность. Бетон, твердеющий в трубах, имеет отличные прочностные характеристики, что делает его идеальным для строительства гидротехнических объектов, котлованов, мостов, фундаментов и других конструкций;

- устойчивость к воздействию воды. Трубобетон активно используется в гидротехнических сооружениях, таких как дамбы и причалы, поскольку он не подвержен коррозии и выдерживает длительное воздействие воды;

- удобство и скорость монтажа. Заполнение бетона в трубчатые формы позволяет значительно сократить время строительства и снизить трудозатраты при возведении объектов.

Однако также стоит отметить и его недостатки:

- сложности с качественным бетонированием;
- увеличение стоимости строительства;
- трудность контроля качества.

Трубобетон является современным и высокоэффективным строительным материалом, который находит широкое применение благодаря своей высокой несущей способности, долговечности и устойчивости к агрессивным внешним воздействиям. Он активно используется в строительстве гидротехнических сооружений, свайных фундаментов, мостов и других объектов.

Для выполнения расчетных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности рассмотренных конструкций применялись нелинейные модели деформирования материалов. В частности, для бетона применялась уже зарекомендовавшая себя модель материала Menetrey – Willam [1–5], которая в достаточной степени позволяет описать поведение бетона.

Модель Menetrey – Willam представляет собой поверхность разрушения с тремя параметрами, описанную следующим уравнением:

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[\sqrt{1.5} \times \frac{\rho}{f_c'} \right]^2 + m \times \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \times f_c'} \times r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \times f_c'} \right] - c = 0, \quad (1)$$

где

$$r(\theta, e) = \frac{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2 \theta + (2 \times e - 1)^2}{2 \times (1 - e^2) \times \cos \theta + (2 \times e - 1) \times \sqrt{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2 \theta + 5 \times e^2 - 4 \times e}} \quad (2)$$

$$m = 3 \times \frac{f_c'^2 - f_t'^2}{f_c' \times f_t'} \times \frac{e}{e + 1}. \quad (3)$$

Уравнение (1) выражается с помощью трех инвариантов напряжений известных как координаты Haigh – Westergaard; m – параметр трения материала, зависящий от прочности на одноосное сжатие f_c' , от прочности на одноосное растяжение f_t' , а также от параметра эксцентриситета e . Эксцентриситет e определяет гладкость поверхности Menetrey – Willam, и его значение влияет на описание разрушения либо при двухосном растяжении, либо при сжатии. В (1) ξ – инвариант гидростатического напряжения, ρ – инвариант девиаторного напряжения, θ – девиаторный полярный угол Лоде. Координаты Haigh – Westergaard (Н – W) записываются как:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_1, \quad I_1 = \sigma_{ii}, \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{2 \times J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad (5)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3 \times \sqrt{3}}{2} \times \frac{J_3}{J_2^{3/2}}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{ik} s_{ki}, \quad (6)$$

где s_{ij} обозначает компоненты девиаторного напряжения; т. е. $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ является символом Kronecker. Следует отметить, что при $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ выполняются следующие соотношения между главными напряжениями σ_{ij} и координатами Н – W:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \times \rho \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2 \times \pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2 \times \pi}{3} \right) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Поверхность, представленная формулой (1), определена для $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$, поэтому простирается во все полярные направления $0 \leq \theta \leq 2\pi$, используя тройную симметрию.

Поверхность разрушения показана на рис. 1.

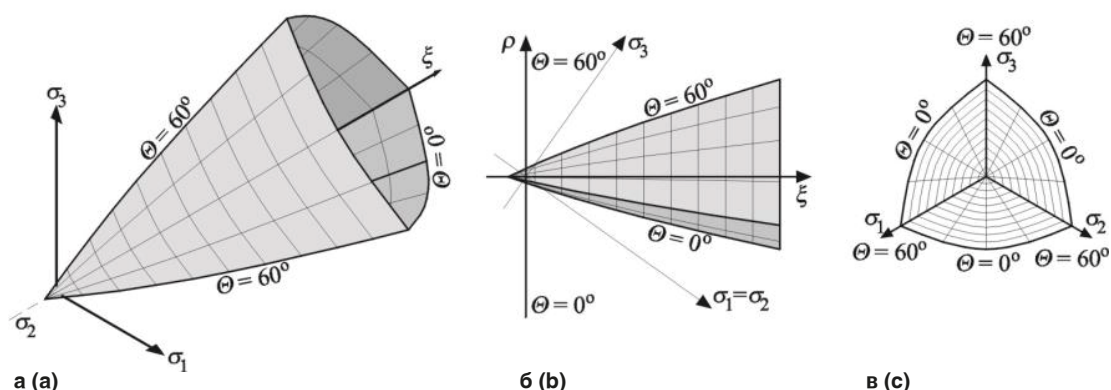


Рис. 1. Поверхность разрушения Menetrey – Willam: а – вид в пространстве главных напряжений; б – вид осевого сечения; в – вид девиаторного сечения

Fig. 1. Menetrey – Willam fracture surface: а – view in the main stresses space; б – view of the axial section; в – view of the deviatoric section

Для металла модель разрушения принята в виде билинейного изотропного упрочнения и описывается двухлинейной зависимостью напряжения σ от деформации ε . Начальный наклон кривой соответствует модулю упругости материала E . После достижения напряжения текучести начинается развиваться пластическая деформация ε_{p1} , зависимость напряжения от деформации продолжается вдоль линии с наклоном, определяемым касательным модулем E_p , показанная на рис. 2.

В работе [6] рассмотрено сравнение круглой и квадратной колонн при центральном сжатии, при этом колонны круглого сечения демонстрируют немного большую несущую способность (1280 кН) по сравнению с квадратными колоннами (1262 кН). Это объясняется более выраженным эффектом обоймы, что улучшает их характеристики при центральном сжатии. Однако при увеличении эксцентриситета ($e/b = 0,125$;

0,25; 0,5) разница в несущей способности круглых и квадратных колонн становится практически незначительной, менее 2 %. Для сравнения вариантов в работе использован программный комплекс Ansys Workbench для численного моделирования с учетом физической нелинейности бетона и стали, что позволило достичь высокой точности результатов. Применена модель Друкера – Прагера и учтен контакт трения между стальной оболочкой и бетонным ядром. Отмечено, что в существующих нормативных документах (СП 266.1325800.2016 [7]) подробно описан расчет только круглых трубобетонных колонн. Для квадратных колонн требуется дальнейшая проработка методик проектирования и расчетов.

В работе [8] рассмотрены трубобетонные колонны и их применение. Отмечено, что трубобетонные колонны, представляющие собой композитную конструкцию из стальной оболочки и бетонного ядра, обладают

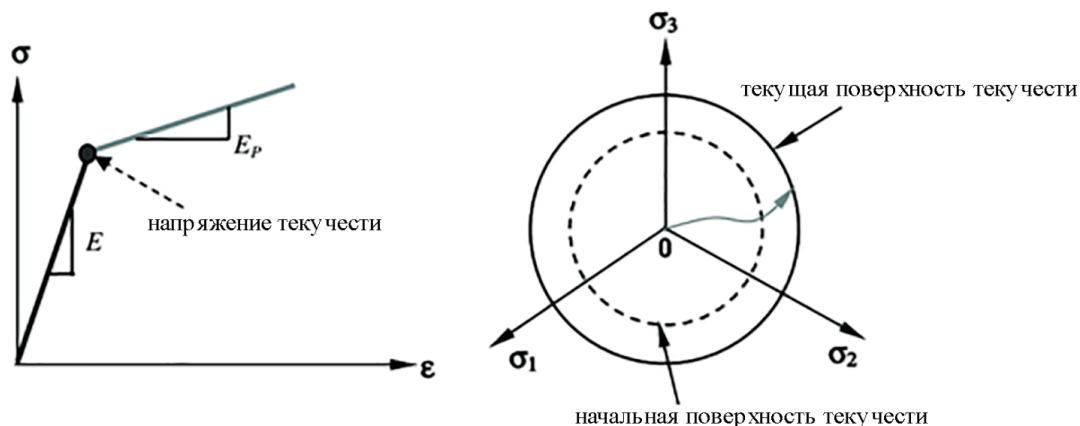


Рис. 2. Поверхность разрушения билинейного изотропного упрочнения
Fig. 2. Fracture surface of bilinear isotropic hardening

высокой несущей способностью и сейсмостойкостью, а также широко применяются в строительстве высотных зданий и сооружений благодаря экономичности, легкости возведения и повышенной надежности. Для анализа несущей способности в работе использован математический аппарат теории упругости для бетонного ядра и механики оболочек для стальной трубы, при этом несущая способность колонны определялась по состоянию разрушения стальной оболочки под действием окружных напряжений. Также отмечено, что использование бетона более высоких марок (М350, М400) и стали с высоким пределом прочности существенно увеличивает несущую способность. Увеличение толщины стенки трубы и радиуса сечения также положительно сказывается на несущей способности. Делается вывод и о практическом применении трубобетона: применение трубобетонных колонн позволяет сократить трудозатраты на этапе строительства и увеличить надежность конструкции.

В работе [9] рассмотрено усиление трубобетонных колонн композитными материалами (FRP) и стальными лентами. В работе отмечается, что усиление с использованием FRP и сварных стальных лент значительно увеличивает несущую способность колонн по сравнению с трубобетонными колоннами (CFST). Например, при усилении FRP (1–4 слоя) или с использованием стальных лент толщиной 3 и 6 мм несущая способность увеличивается на 28,72–64,16 % и 28,46–49,82 % соответственно. Увеличение числа слоев FRP и толщины стальных лент способствует улучшению несущей способности колонн, с приростом до 31,21 % при толщине стальной ленты 6 мм. При этом отмечается, что стоимость усиленных стальными лентами колонн CFST почти на 40 % ниже стоимости колонн с усилением FRP, а их эффективность в плане повышения несущей способности аналогична. Таким образом, с точки зрения затрат усиление стальными лентами является более предпочтительным для инженерной практики, в то время как с точки зрения удобства монтажа усиление FRP предпочтительнее.

В работе [10] рассмотрено поведение колонн CFST при осевом сжимающем воздействии. В ходе эксперимента исследовалось поведение 24 колонн CFST при вертикальной нагрузке до разрушения. Основными переменными были длина, диаметр, прочность стальной трубы и прочность бетона. Результаты показали, что колонны с высоким изгибом (длинные) разрушались от изгиба, в то время как более короткие колонны разрушались за счет сжатия бетона и текучести стальной трубы. Экспериментальные данные сравнивались с прогнозируемыми нагрузками по стандарту (SANS 10162-1 [11]) и Еврокоду 4 (EC4) [12]. Оценка показала, что обе нормативные базы дают консервативные результаты, занижая реальные значения предельных нагрузок на 8,4 и 13,6 % (для SANS) и на 10,5 и 20,2 % (для EC4) соответственно для серий 1 и 2. Это подтверждает, что оба норма-

тивных документа склонны к занижению нагрузки по сравнению с реальными экспериментальными данными. Отмечается, что колонны CFST имеют сочетание преимуществ стали и бетона. Стальная труба действует как постоянная опалубка и обеспечивает горизонтальное ограничение для бетона, что предотвращает локальное выдавливание стали в момент повышенных нагрузок. Это позволяет значительно повысить несущую способность колонн по сравнению с отдельными бетонными или стальными колоннами. В серии 1 экспериментов колонны CFST, имеющие большие отношения длины к диаметру, разрушались в основном из-за изгиба. В серии 2 колонны с меньшими отношениями ($L/d = 5:16$ до $9:84$) разрушались из-за сжатия бетона и текучести стали, а также наблюдалась выпуклость стальной трубы.

Статья [13] посвящена численно-экспериментальным исследованиям прочности сжатых сталежелезобетонных элементов, выполненных с использованием высокопрочного бетона и квадратных стальных труб класса С345. Основное внимание уделено расчету прочности таких конструкций, учитывающему особенности работы материалов в составе трубобетонных сечений. В отличие от круглых труб, в квадратных трубах бетон подвергается неравномерному боковому сжатию, что существенно влияет на его прочность. Исследования включают как численные моделирования с использованием метода конечных элементов, так и экспериментальные испытания образцов. Результаты численных расчетов подтвердили их достоверность с экспериментальными данными, с максимальной разницей в разрушающей нагрузке – менее 4 %. В статье рассматриваются также факторы, влияющие на прочность конструкций, такие как прочность бетона и стали при одноосном сжатии, соотношение толщины стенки обоймы и геометрические параметры труб. Разработанная методика расчета прочности позволяет учитывать основные особенности работы материалов и улучшить точность расчетов трубобетонных конструкций, что важно для их применения в строительстве. Результаты исследования могут быть использованы для разработки нормативных документов и проектирования устойчивых и безопасных конструкций с квадратными трубами.

Цель настоящей работы заключается в проведении сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных конструкций.

Материалы и методы

В работе используются аналитические методы расчета и метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных конструкций.

Результаты

В качестве примера применения трубобетона в строительстве в работе рассмотрены шпунтовые

стены сухого дока (высотой до 20 м), возведенные в 2019 году и успешно функционирующие в условиях Кольского залива (рис. 3).

Как показали предварительные расчеты, основным фактором при оценке несущей способности рассмотренных конструкций является изгибающий момент. Для сравнительной оценки конструктивных вариантов несущая способность рассмотрена для конструкций при действии изгибающего момента.

В работе рассматриваются сравнительные варианты трубобетона в виде:

- стержень сплошного круглого сечения из бетона без арматурного каркаса;
- стержень сплошного круглого сечения из бетона с арматурным каркасом;
- металлическая труба;
- трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном;
- армированный трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном и установкой арматурного каркаса.

Расчет изгибающего момента в шпунтах имеет важное значение, особенно в области гидротехнических и ограждающих конструкций. Шпунты подвергаются различным нагрузкам, включая гидростатическое давление воды, боковое давление грунта и других внешних факторов. Важно точно рассчитывать изгибающий момент и несущую способность в шпунтах, чтобы обеспечить его эксплуатационную надежность.

В качестве бетона был принят тяжелый бетон класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа, $R_{btn} = 1,75$ МПа, $R_b = 17$ МПа, $R_{bt} = 1,15$ МПа, $E_b = 32\,500$ МПа).

Металл принят класса С355 ($R_y = 355$ МПа, $E = 200\,000$ МПа).

Арматура класса А500С ($R_{sn} = 500$ МПа, $R_s = 450$, $E_s = 200\,000$ МПа).

Для всех расчетных моделей принято продольное рабочее армирование в виде стержней диаметром 25 мм (8 Ø 25).

Расчетная схема представлена на рис. 4.

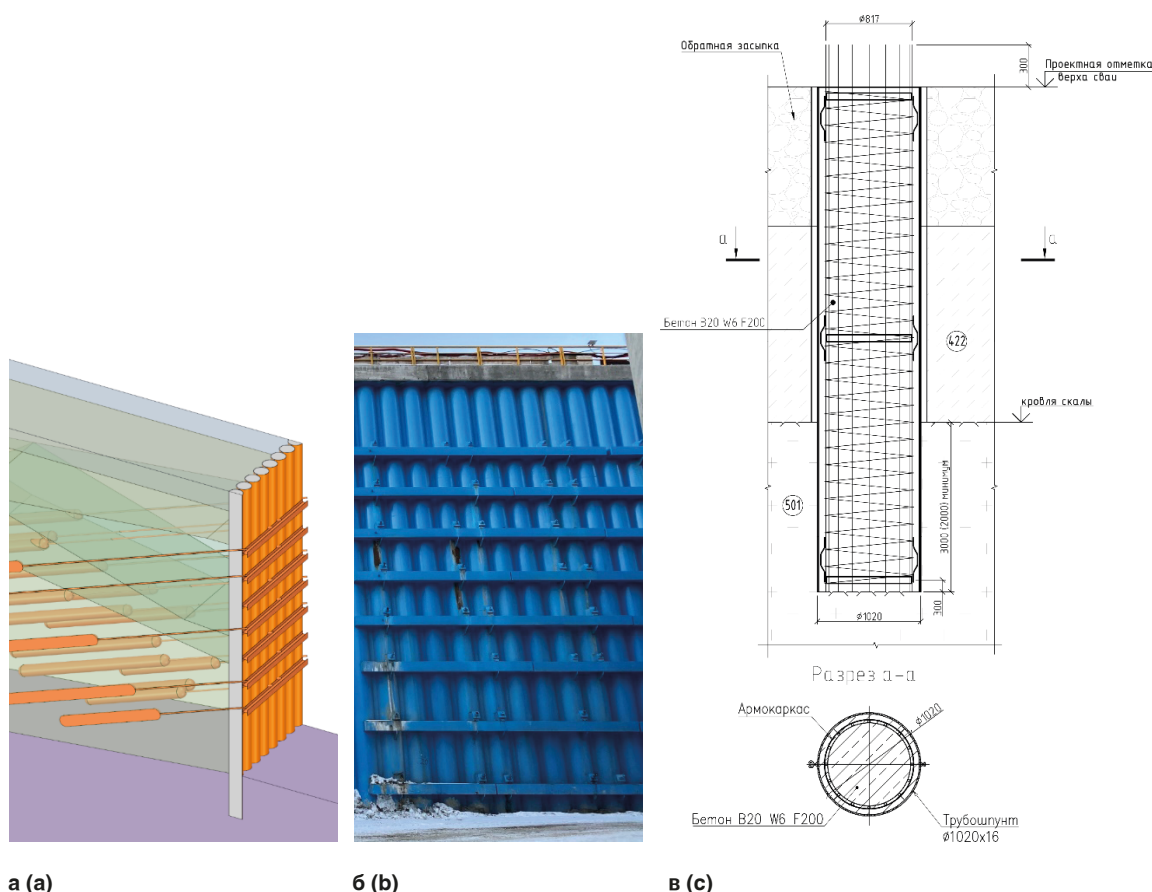


Рис. 3. Шпунтовая стена сухого дока: а – вид модели заанкеренной шпунтовой стены; б – фотография лицевой грани шпунтовой стены; в – конструкция трубошпунта

Fig. 3. Sheet pile wall of the dry dock: а – view of the model of the sheet pile wall; б – photograph of the front face of the sheet pile wall; с – construction of the pipe rod

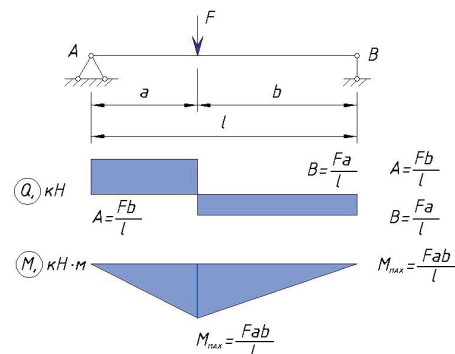


Рис. 4. Расчетная схема

Fig. 4. Calculation scheme

При этом расстояния $a = b = 2,2$ м.

Вариант 1. Стержень сплошного круглого сечения из бетона без арматурного каркаса.

В качестве варианта 1 принят вариант выполнения трубы в виде монолитной конструкции из бетона внешним диаметром 600 мм. Данный вариант выбран для наглядного сравнения армированной и неармированной конструкций.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 5.

Как показали расчеты несущей способности данного бетонного сечения, пиковая несущая способность

в виде максимального момента составляет 56,28 кНм.

Фактически при наступлении момента трещинообразования несущая способность данной конструкции исчерпывается.

Вариант 2. Стержень сплошного круглого сечения из бетона с арматурным каркасом.

Для варианта 2 принята железобетонная конструкция шпунта внешним диаметром 600 мм. Арматурный каркас представлен в виде продольных арматурных стержней диаметром 25 мм в количестве 8 штук.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 6.

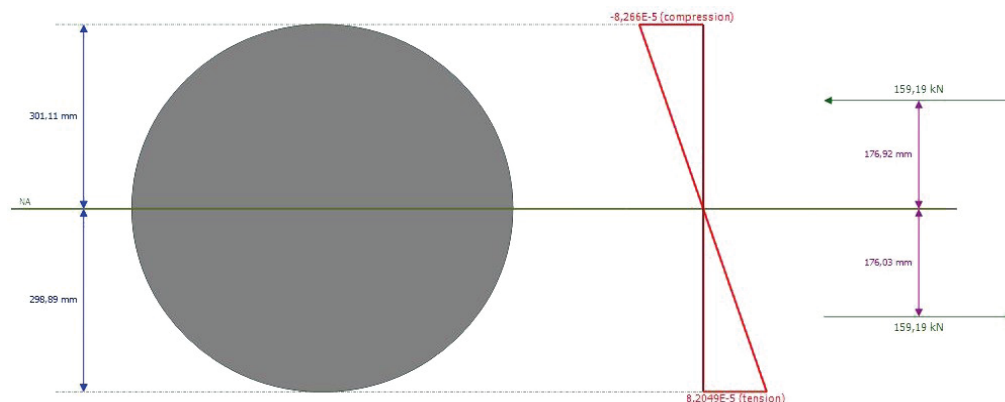


Рис. 5. Вариант 1. Напряжения, МПа, и усилия, кН

Fig. 5. Option 1. Stresses, MPa, and forces, kN

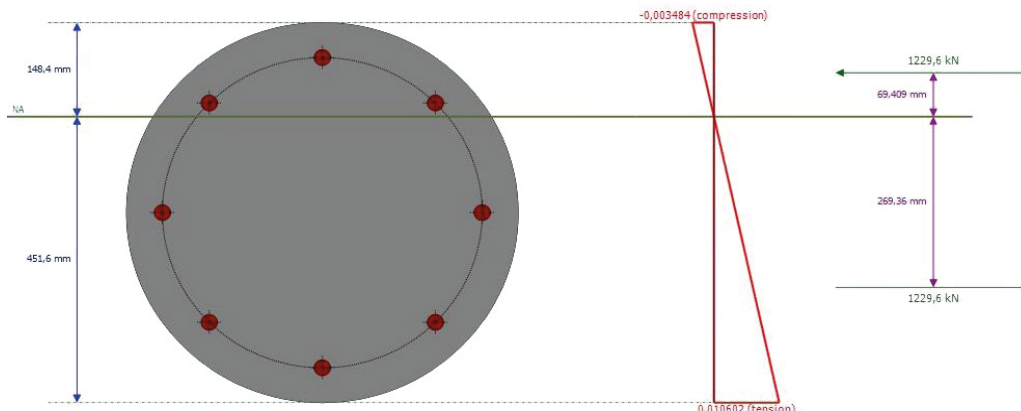


Рис. 6. Вариант 2. Предельные усилия, кН

Fig. 6. Option 2. Ultimate forces, kN

Результаты расчета по варианту 2 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 416,6 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в бетоне представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 22,98 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 2, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 416,6$ кНм.

Полученные расчетом напряжения в арматуре показаны на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что при действующих усилиях в конструкции максимальное растягивающее напряжение составляет 500,62 МПа, что близко к нормативному сопротивлению арматуры класса А500 ($R_s = 500$ МПа). При этом в сжатой зоне бетона напряжения в арматуре составляют до -275,75 МПа.

Таким образом, напряжения в сжатой зоне бетона и напряжения в растянутой арматуре достигли нормативных сопротивлений, т. е. в конструкции достигнуто предельное состояние.

Вариант 3. Металлическая труба.

Для варианта 3 принята металлическая труба внешним диаметром 600 мм и толщиной стенки 10 мм.

Результаты расчета усилий представлены на рис. 9.

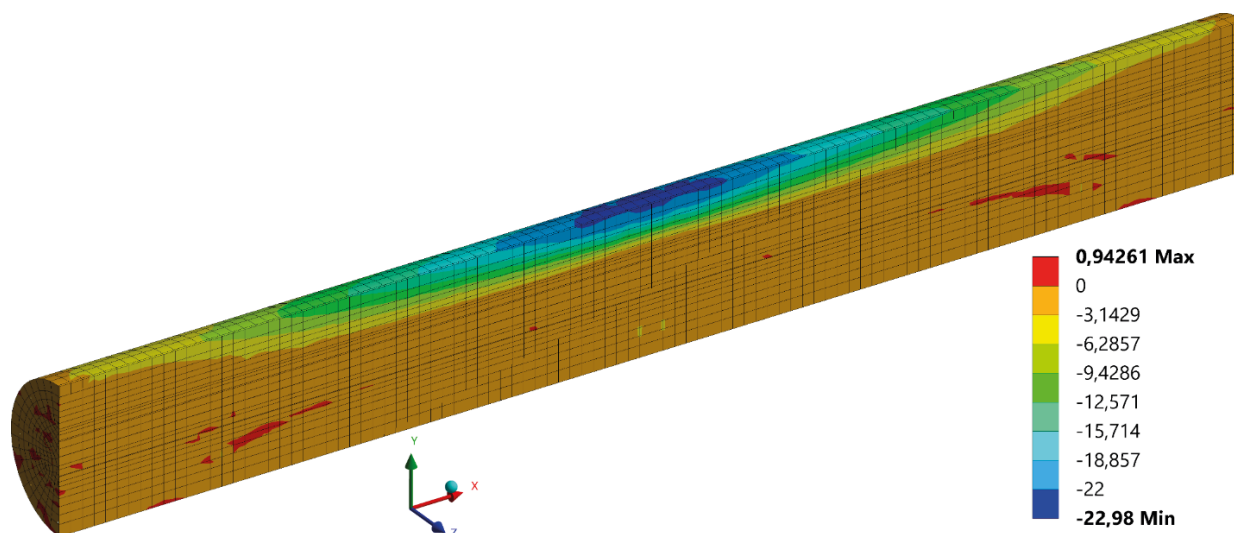


Рис. 7. Вариант 2. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 7. Option 2. Compressive stresses in concrete, MPa

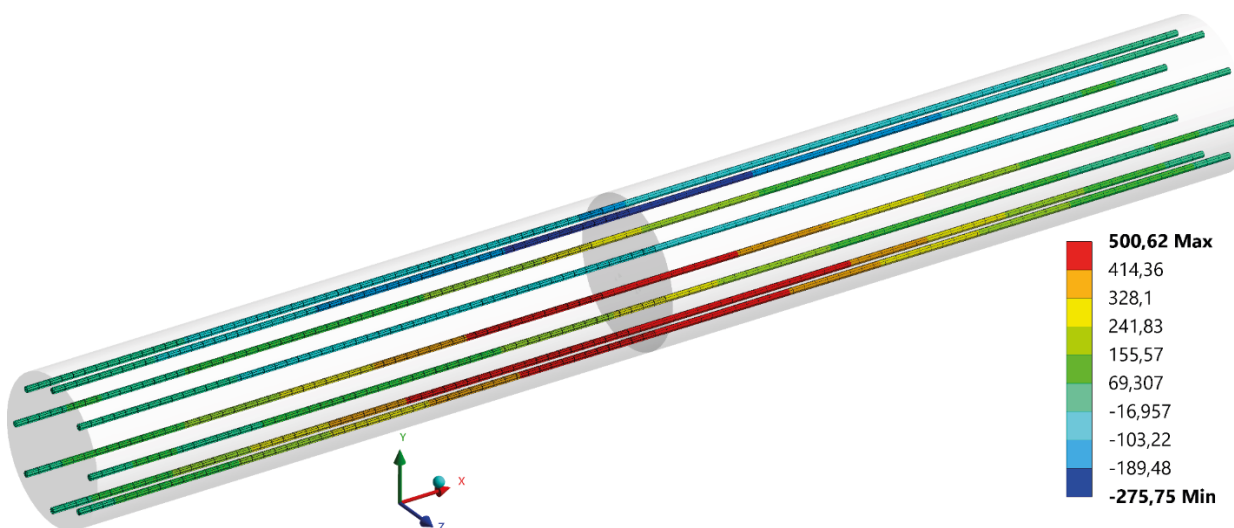


Рис. 8. Вариант 2. Напряжения в арматуре, МПа
Fig. 8. Option 2. Reinforcement, MPa

Результаты расчета по варианту 3 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 639,07 кНм.

Вариант 4. Трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном.

Для варианта 4 принята конструкция трубобетона из металлической трубы внешним диаметром 600 мм и толщиной стенки 10 мм, заполненной бетоном.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 10.

Результаты расчета по варианту 4 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 768,76 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в металлической трубе представлены на рис. 11.

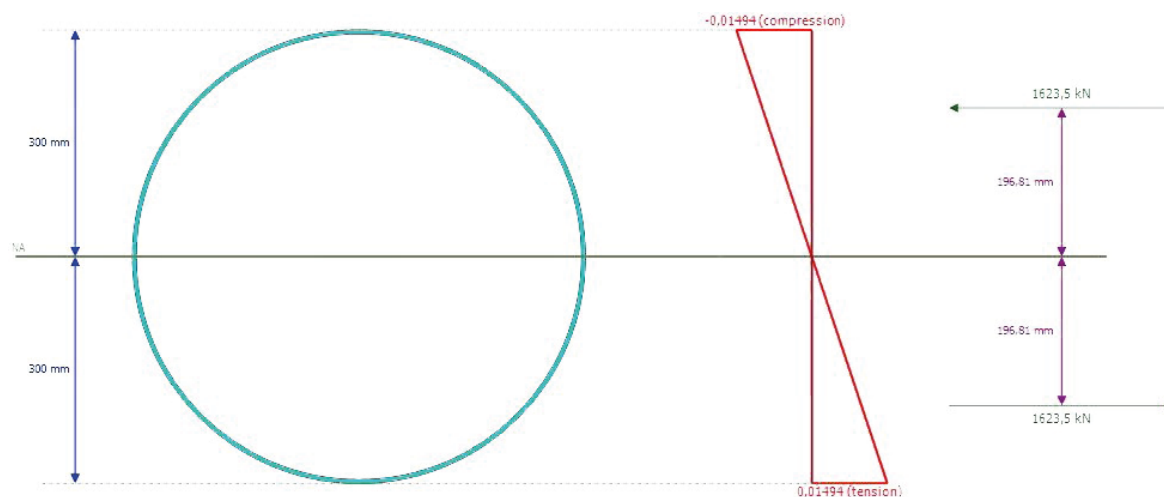


Рис. 9. Вариант 3. Предельные усилия, кН
Fig. 9. Option 3. Ultimate forces, kN

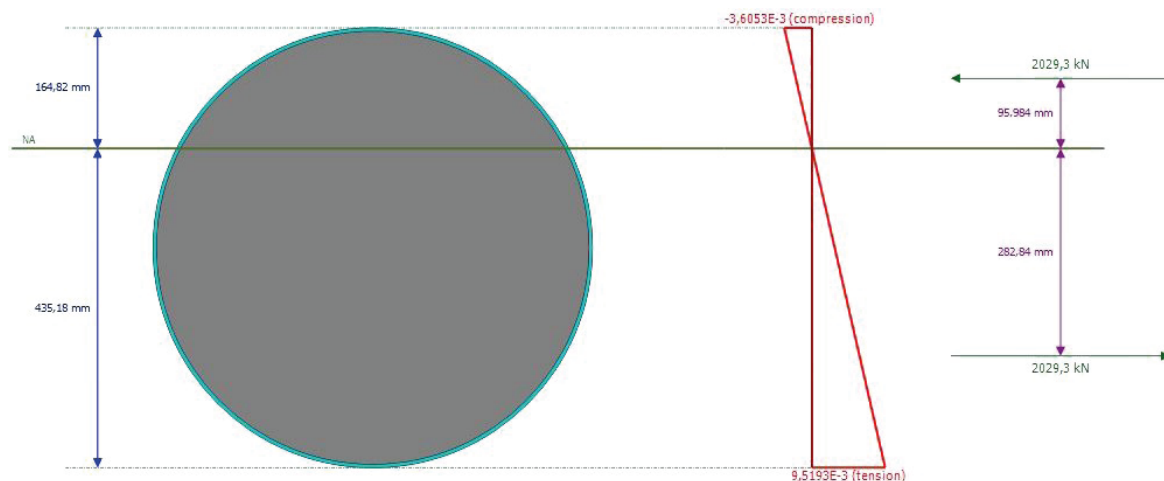


Рис. 10. Вариант 4. Предельные усилия, кН
Fig. 10. Option 4. Ultimate forces, kN

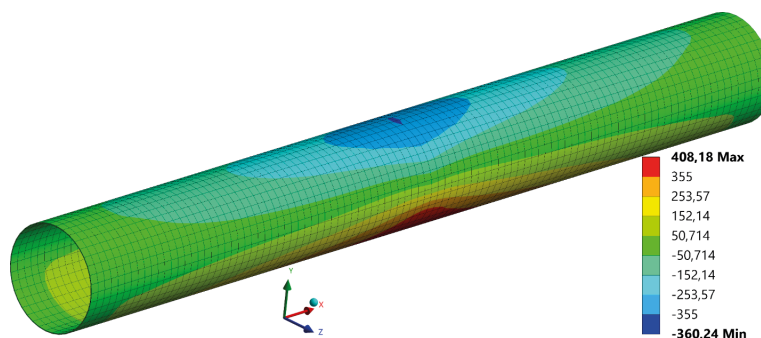


Рис. 11. Вариант 4. Напряжения в металлической трубе, МПа
Fig. 11. Option 4. Stresses in a metal pipe, MPa

Из рис. 11 видно, что максимальные напряжения в металлической трубе в области растяжения и сжатия близки к напряжениям текучести металла $R_y = 355$ МПа.

На рис. 12 представлены напряжения в бетоне.

Из рис. 12 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 26,1 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 4, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 768,76$ кНм.

Вариант 5. Армированный трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном с установкой арматурного каркаса.

Для варианта 5 принята конструкция трубобетона из металлической трубы внешним диаметром 600 мм, толщиной стенки 10 мм, заполненной бетоном, и установкой арматурного каркаса в виде продольных арматурных стержней диаметром 25 мм в количестве 8 штук.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 13.

Результаты расчета по варианту 5 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 1085,5 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в бетоне представлены на рис. 14.

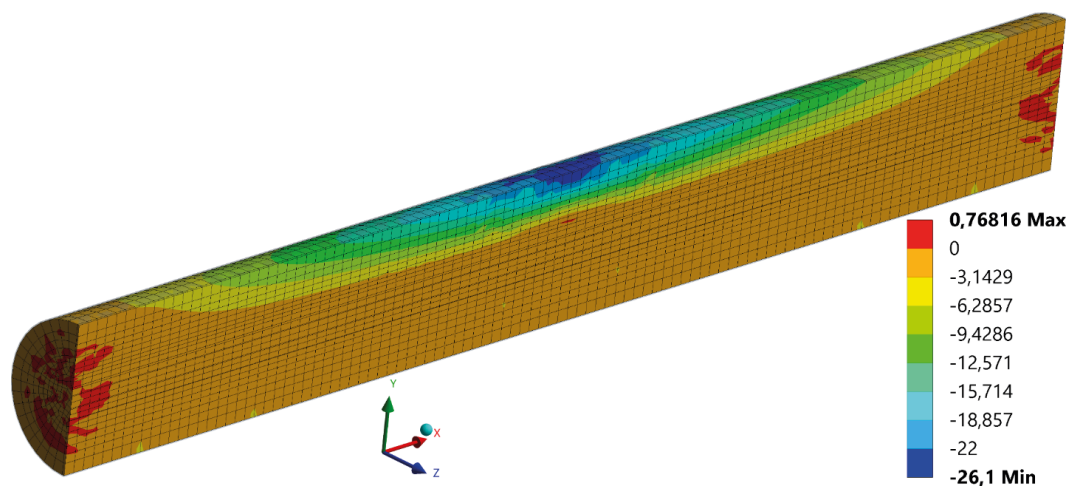


Рис. 12. Вариант 4. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 12. Option 4. Compressive stresses in concrete, MPa

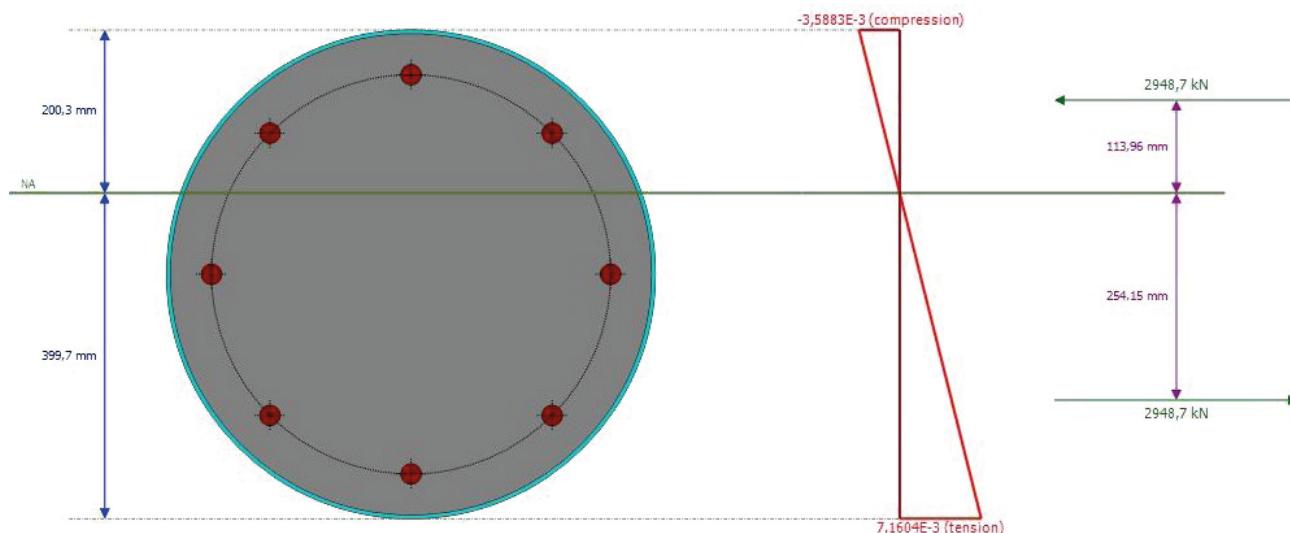


Рис. 13. Вариант 5. Предельные усилия, кН
Fig. 13. Option 5. Ultimate forces, kN

Из рис. 14 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 29,54 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 5, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 1085,5$ кНм.

Полученные расчетом напряжения в арматуре показаны на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что при действующих усилиях в конструкции максимальное растягивающее напряжение составляет 500,57 МПа, что близко к нормативному сопротивлению арматуры класса А500 ($R_s = 500$ МПа). При этом в сжатой зоне бетона напряжения в арматуре составляют до -330,34 МПа.

Результаты расчета сжимающих напряжений в металлической трубе представлены на рис. 16.

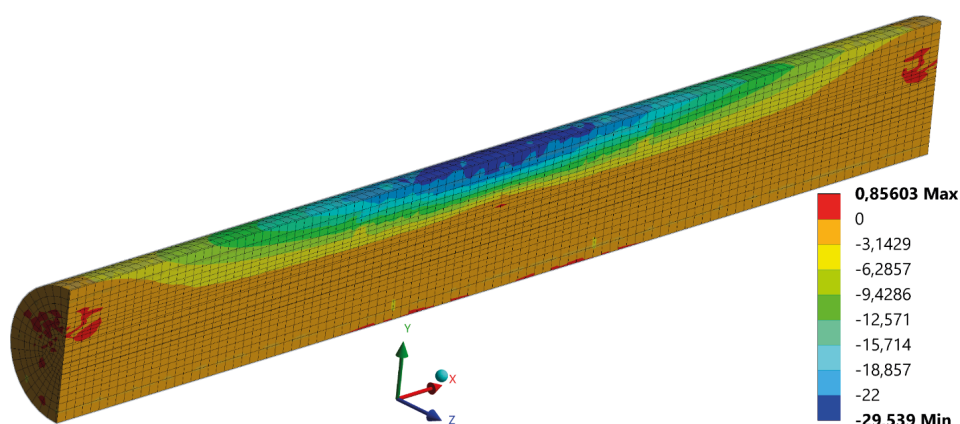


Рис. 14. Вариант 5. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 14. Option 5. Compressive stresses in concrete, MPa

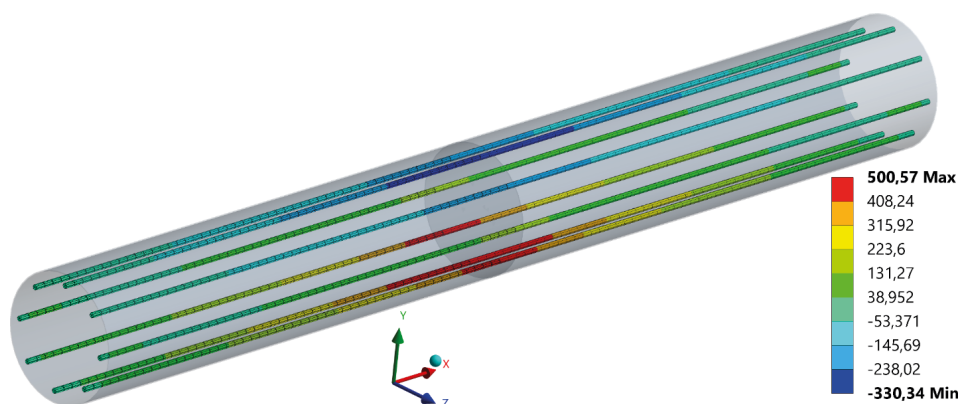


Рис. 15. Вариант 5. Напряжения в арматуре, МПа
Fig. 15. Option 5. Reinforcement stresses, MPa

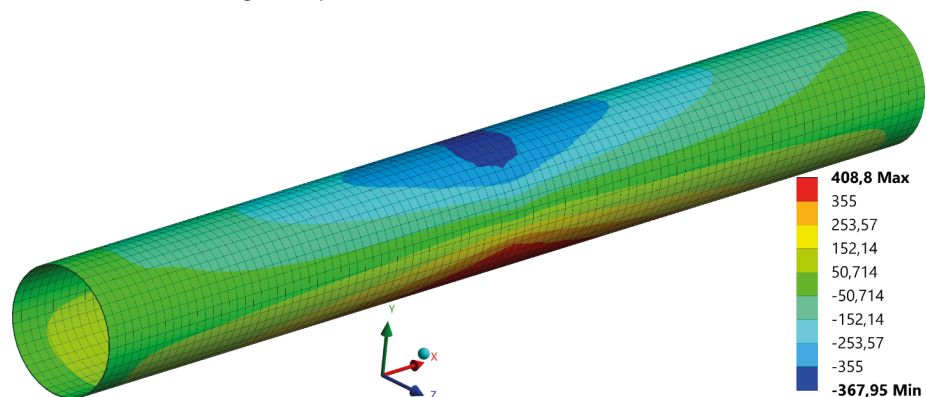


Рис. 16. Вариант 5. Напряжения в металлической трубе, МПа
Fig. 16. Option 5. Stresses in a metal pipe, MPa

Из рис. 16 видно, что максимальные напряжения в металлической трубе в области растяжения и сжатия близки к напряжениям текучести металла $R_y = 355$ МПа.

Таким образом, напряжения в сжатой зоне бетона и напряжения в растянутой арматуре достигли нормативных сопротивлений, т. е. в конструкции достигнуто предельное состояние.

Результаты сравнительных расчетов сведены в табл. 1.

Результаты сводной таблицы также представлены на рис. 17.

Как видно из рис. 17, максимальная несущая способность обнаружилась у армированного трубобетона.

На рис. 18 представлен график изменения момента при его увеличении, максимальная величина является несущей способностью.

Таблица 1
Table 1

Сводная таблица полученных результатов расчета несущей способности
Summary table of the results of the calculation of the load-bearing capacity

№ варианта	Модель	M_{ult} , кНм
1	Бетон	56,28
2	Железобетон (8 Ø 25)	416,60
3	Труба	639,07
4	Трубобетон	768,76
5	Армированный трубобетон (8 Ø 25)	1085,50

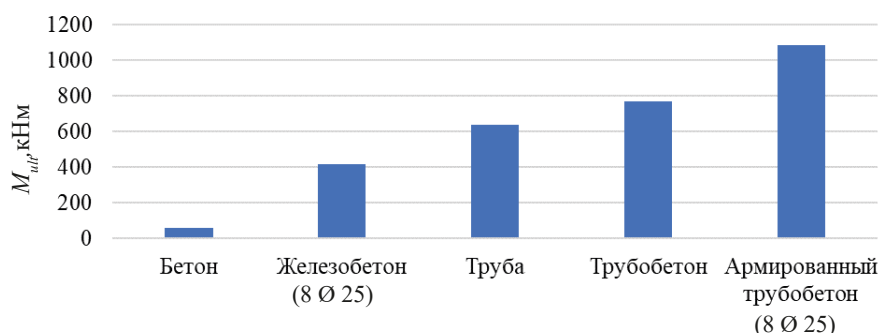


Рис. 17. Сравнение вариантов конструкции шпунта
Fig. 17. Comparison of sheet pile construction options

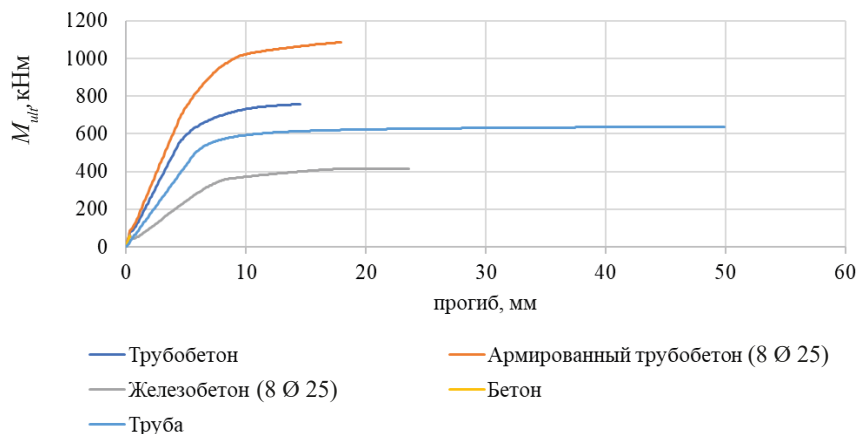


Рис. 18. Изменение момента и определение несущей способности
Fig. 18. Moment change and determination of load-bearing capacity

Таблица 2
Table 2Общая стоимость материалов для изготовления конструкций
Total cost of materials for the manufacture of structures

№ варианта	Модель	M_{ult} , кНм	Стоимость, руб.	Стоимость, руб./кНм
1	Бетон	56,28	1413,50	25,11
2	Железобетон (8 Ø 25)	416,60	3251,90	7,81
3	Труба	639,07	8658,00	13,55
4	Трубобетон	768,76	10025,00	13,04
5	Армированный трубобетон (8 Ø 25)	1085,50	11863,40	10,93

Далее оценим приблизительно стоимость материалов для изготовления конструкций, которые приведены в табл. 2.

Оценка удельной стоимости, кНм, определена делением стоимости материалов на несущую способность конструкции.

Как видно из табл. 2, минимальная стоимость удельной несущей способности у конструкции из железобетона, она составляет 7,81 руб./кНм. Далее по стоимости идет армированный трубобетон с 10,93 руб./кНм. Отношение между данными вариантами по стоимости несущей способности составляет 1,4, при этом увеличивается несущая способность в 2,61 раза.

Выводы

Трубобетон представляет собой бетон, который заливается внутри металлических труб, образующих опалубку. Этот материал используется в различных областях строительства, включая гидротехнические объекты, мосты, трубы, свайные и фундаментные конструкции. Особенность трубобетона – высокая несущая способность, устойчивость к внешним воздействиям, особенно в условиях воздействия воды, что делает его идеальным для гидротехнических сооружений.

Трубобетон обладает рядом важных преимуществ:

- высокая несущая способность;
- устойчивость к воздействию воды, что важно для гидротехнических объектов;
- удобство и скорость монтажа, что снижает время и затраты на строительство.

Для расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций использовались нелинейные модели, такие как модель разрушения бетона Menetrey – Willam и модель для металла с билинейным изотропным упрочнением. Эти методы позволяют более точно моделировать поведение материалов под нагрузкой.

В статье рассмотрены различные варианты конструкций, включая:

- монолитные бетонные и железобетонные стержни;

– металлическую трубу;

– трубобетонные конструкции с использованием металлических труб и бетона (как с армированием, так и без него).

Каждая из этих конструкций была исследована с точки зрения ее несущей способности.

Результаты расчетов. Для монолитных бетонных стержней (без арматуры) несущая способность составила 56,28 кНм. Железобетонный стержень продемонстрировал несущую способность 416,6 кНм. Для металлической трубы – 639,07 кНм. Трубобетон продемонстрировал увеличение несущей способности до 768,76 кНм. Армированный трубобетон показал наибольшую несущую способность – 1085,5 кНм.

Оценка стоимости материалов показала, что минимальная стоимость несущей способности на кНм достигается при использовании железобетона (7,81 руб./кНм). Армированный трубобетон оказался дороже (10,93 руб./кНм), но с увеличением несущей способности в 2,61 раза по сравнению с железобетоном.

Результаты расчетов и сравнительного анализа показывают, что армированный трубобетон является наиболее эффективным с точки зрения несущей способности при действии изгибающего момента, хотя и имеет более высокую стоимость. В то же время железобетон и металлические трубы предлагают более экономичный вариант, но с меньшей несущей способностью. Выбор материала зависит от конкретных требований проекта, включая нагрузки, стоимость и условия эксплуатации.

Список литературы

1. Menetrey P.H., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995, vol. 92, pp. 311–318.
2. Баклыков И.В. Результаты расчетных исследований железобетонных конструкций с использованием системы внешнего усиления на основе композитных материалов // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 22–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH.

3. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Кузнецов С.Ю., Балагуров В.Б., Баклыков И.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций из легкого высокопрочного бетона (применительно к конструкции батопорта сухого дока) // *Природообустройство*. 2021. № 4. С. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-58-66>. EDN: EFOLES.
4. Баклыков И.В. Численный анализ поведения изгибаемых железобетонных балок, изготовленных из легкого высокопрочного бетона, с разным коэффициентом армирования // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-84-89>. EDN: PZPVAI.
5. Rubin O., Bellendir E., Antonov A., Baklykov I. Computational and experimental substantiation of strengthening reinforced concrete structures with composite materials of power plants under seismic action. *Buildings*. 2024, vol. 14, issue 7, 1971. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14071971>.
6. Ляпкало А.С. Сравнение несущей способности трубобетонных колонн круглого и квадратного сечения // *Молодой ученый*. 2024. № 48 (547). С. 17–22. URL: <https://moluch.ru/archive/547/119756/>.
7. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. Москва, 2016.
8. Колмогоров Г.Л., Акулова А.А. Прочность и предельная несущая способность трубобетонных колонн // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2016. № 2 (45). С. 29–33.
9. Shi You Zhang, Kun-Peng Miao, Yang Wei, Xiaoming Xu, Bing Luo, Weizhou Shi. Experimental and Theoretical Study of Concrete-Filled Steel Tube Columns Strengthened by FRP/Steel Strips Under Axial Compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023, vol. 17, issue 1, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00556-2>.
10. Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. *Thin-Walled Structures*. 2012, vol. 56, pp. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.008>.
11. SANS 10162-1:2011. The structural use of steel. Part 1: Limit-states design of hot-rolled steelwork. SABS Standards Division.
12. EN 1994-1-1:2004 (English). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete. European Committee for Standardization.
13. Крылов С.Б., Корнюшина М.П. Численно-экспериментальные исследования прочности сжатых сталежелезобетонных элементов, выполненных с использованием высокопрочного бетона и труб квадратного сечения из стали класса С345 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 6. С. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-63>.

References

1. Menetrey P.H., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995, vol. 92, pp. 311–318.
2. Baklykov I.V. Results of computational studies of reinforced concrete structures using an external reinforcement system based on composite materials. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2024, no. 5 (624), pp. 22–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH.
3. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Kuznetsov S.Yu., Balagurov V.B., Baklykov I.V. Experimental studies of reinforced concrete structures made of light high-strength concrete (applicable to the design of the dry floating bulkhead). *Prirodoobustroystvo*. 2021, no. 4, pp. 58–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-58-66>. EDN: EFOLES.
4. Baklykov I.V. Numerical analysis of the behavior of bendable reinforced concrete beams made of lightweight high strength concrete with different reinforcement coefficients. *Prirodoobustroystvo*. 2022, no. 4, pp. 84–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-84-89>. EDN: PZPVAI.
5. Rubin O., Bellendir E., Antonov A., Baklykov I. Computational and experimental substantiation of strengthening reinforced concrete structures with composite materials of power plants under seismic action. *Buildings*. 2024, vol. 14, issue 7, 1971. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14071971>.
6. Lyapkalo A.S. Comparison of the load-bearing capacity of round and square section tubular concrete columns *Young Scientist*. 2024, no. 48 (547), pp. 17–22. URL: <https://moluch.ru/archive/547/119756/> (In Russian).
7. СП 266.1325800.2016. Composite steel and concrete structures. Design rules. Moscow, 2016. (In Russian).
8. Kolmogorov G.L., Akulova A.A. Strength and ultimate bearing capacity of tubular concrete columns. *Processing of continuous and layered materials*. 2016, no. 2 (45). pp. 29–33. (In Russian).
9. Shi You Zhang, Kun-Peng Miao, Yang Wei, Xiaoming Xu, Bing Luo, Weizhou Shi. Experimental and Theoretical Study of Concrete-Filled Steel Tube Columns Strengthened by FRP/Steel Strips Under Axial Compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023, vol. 17, issue 1, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00556-2>.
10. Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. *Thin-Walled Structures*. 2012, vol. 56, pp. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.008>.
11. SANS 10162-1:2011. The structural use of steel. Part 1: Limit-states design of hot-rolled steelwork. SABS Standards Division.

12. EN 1994-1-1:2004 (English). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. . European Committee for Standardization.
13. Krylov S.B., Korniyushina M.P. Numerical and experimental studies of the strength of compressed steel-reinforced concrete elements made using high-strength concrete and square steel pipes of class C345. *Seismostoikoe Stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 6, pp. 53–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-63>.

**Информация об авторе /
Information about the author**

Игорь Вячеславович Баклыков, канд. техн. наук, главный специалист отдела расчетных исследований гидротехнических сооружений, АО «Институт Гидропроект», Москва
e-mail: moscow_igor88@mail.ru

Igor V. Baklykov, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist of the Department of Computational Studies of Hydraulic Structures, Hydroproject Institute JSC, Moscow
e-mail: moscow_igor88@mail.ru

УДК 624.012

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32)**А.К. ЖАЛНИН**

АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН НА РАННЕМ ЭТАПЕ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Аннотация

Введение. Расчет ширины раскрытия трещины является одним из требований к эксплуатационной надежности железобетонных конструкций. Возникновение трещин в железобетонных элементах происходит как при эксплуатационных нагрузках, так и в начальный период набора прочности из-за низкой прочности бетона на растяжение и характера его работы в целом. Возрастающая скорость строительства требует учитывать термонапряженное состояние не только массивных, но и обычных конструкций в раннем возрасте бетона, в том числе выполнять расчет ширины раскрытия трещин на этапе набора прочности, для обеспечения проектных и эксплуатационных характеристик конструкций и оценки возможности нагружения конструкций, бетон которых пока не достиг своих эксплуатационных характеристик.

Цель. Исследование направлено на анализ необходимости учета особенности бетона в раннем возрасте (соотношение прочности и модуля деформаций отличается от проектного возраста) при расчете ширины раскрытия трещин.

Материалы и методы. В работе проведен анализ методов расчета, заложенных в нормативных документах. Выполнены расчеты ширины раскрытия трещин для железобетонных сечений с разным процентом армирования. Выполнено сравнение расчетных методик и полученных значений ширины раскрытия трещин по различным нормативным документам для бетона на ранних стадиях твердения, а также выполнена оценка влияния изменения модуля упругости на процесс трещинообразования. Анализ выполнен с учетом как нормативного модуля упругости бетона (28 суток), так и его сниженного значения на 7 суток. Используются данные экспериментальных исследований для верификации результатов.

Результаты. Установлено, что снижение модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения (до 24 %) приводит к увеличению расчетной ширины трещин (до 11 %) при идентичной прочности.

Выводы. Результаты исследования подчеркивают необходимость учета изменения модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения при проектировании конструкций. Это позволит более точно прогнозировать ширину раскрытия трещин, включая температурно-усадочные, и обеспечит повышение надежности железобетонных конструкций в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: железобетон, ширина раскрытия трещин, модуль упругости бетона в период твердения, температурно-усадочные трещины, трещиностойкость конструкций, гидратация

Для цитирования: Жалнин А.К. Сравнение расчетной ширины раскрытия трещин на раннем этапе твердения бетона // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 20–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32). EDN: YAKLXG

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.04.2025

Поступила после рецензирования 29.05.2025

Принята к публикации 05.06.2025

A.K. ZHALNIN

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

COMPARISON OF THE ESTIMATED CRACK OPENING WIDTH AT AN EARLY STAGE OF CONCRETE HARDENING

Abstract

Introduction. The calculation of the crack opening width is one of the requirements for the operational reliability of reinforced concrete structures. Cracks in reinforced concrete elements occur both under operating loads and during the initial period of strength gain due to the low tensile strength of concrete and the nature of its operation in general. The increasing speed of construction requires taking into account the thermally stressed state of not only massive, but also conventional structures at an early age of concrete, including calculating the crack opening width at the strength gain stage to ensure the design and operational characteristics of structures and assess the possibility of the loading of the structures whose concrete has not yet reached its operational characteristics.

Aim. The study is aimed at analyzing the need to take into account the features of concrete at an early age (the ratio of strength and modulus of deformation differs from the design age) when calculating the crack opening width.

Materials and methods. The paper analyzes the calculation methods laid down in the regulatory documents. Calculations of crack opening widths for reinforced concrete sections with different percentages of reinforcement have been performed. A comparison of the calculation methods and the obtained values of the crack opening width according to various regulatory documents for concrete in the early stages of hardening was performed, as well as an assessment of the effect of changes in the modulus of elasticity on the cracking process. The analysis was performed taking into account both the standard modulus of elasticity of concrete (28 days) and its reduced value on day 7. Experimental research data was used to verify the results.

Results. It was found that a decrease in the modulus of elasticity of concrete in the early stages of hardening (up to 24 %) leads to an increase in the estimated crack width (up to 11 %) with identical strength.

Conclusions. The results of the study emphasize the need to take into account the changes in the modulus of elasticity of concrete in the early stages of hardening when designing the structures. This will make it possible to more accurately predict the crack opening width, including temperature and shrinkage, and will increase the reliability of reinforced concrete structures during operation.

Keywords: reinforced concrete, crack opening width, modulus of elasticity of concrete during hardening, temperature-shrinkage cracks, crack resistance of structures, hydration

For citation: Zhالنin A.K. Comparison of the estimated crack opening width at an early stage of concrete hardening. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 20–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32). EDN: YAKLXG

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 09.04.2025

Revised 29.05.2025

Accepted 05.06.2025

Введение

До 1940-х годов развитие теории железобетона направлялось в основном по пути рассмотрения вопросов расчета прочности. В 1931 г. профессором А.Ф. Лолейтом [1] созданы предпосылки для создания теории прочности железобетона, которые дали толчок большому количеству исследований по расчету прочности железобетона.

После 1940-х годов метод расчета трещин, основанный на работах В.И. Мурашева [2], был включен в нормативные документы. В исследованиях было предложено учитывать пластическую работу бетона растянутой зоны при образовании трещин с помощью прямоугольной эпюры напряжений.

В соответствии с СП 63.13330.2018 [3] для определения ширины раскрытия обычных трещин используется произведение средних относительных деформаций арматуры на участке между трещинами и длины этого участка. Чтобы найти средние относительные деформации арматуры между трещинами, необходимо учитывать работу растянутого бетона между ними. Относительные деформации арматуры внутри трещин определяются с помощью условно упругого расчета железобетонного элемента, используя приведенный модуль деформации сжатого бетона с учетом неупругих деформаций бетона сжатой зоны, либо по нелинейной деформационной модели. Расстояние между трещинами определяется из условия, что разность усилий в продольной арматуре в сечении с трещиной и между трещинами должна быть удержана усилиями сцепления арматуры с бетоном на длине этого участка.

Данный подход согласуется с международными методами расчета ширины трещин в изгибаемых элементах, где итоговое значение определяется как произведение максимального расстояния между трещинами и средней деформации растянутой арматуры. Ширина трещины зависит от характера и расположения арматуры, пересекающей трещины, и связи между стержнями, находящимися в зоне растяжения бетона. Многочисленные исследования были посвящены разработке методов прогнозирования ширины трещин в изгибаемых железобетонных элементах, в частности Салигер [4] в своих работах 1936 года предложил фундаментальные принципы анализа трещинообразования, заложив основы для последующих исследований, Томас [5] в тот же период разработал теоретическую модель, связывающую ширину трещин с деформациями арматуры, Бромс [6] существенно дополнил эти подходы, предложив методику расчета расстояния между трещинами, а Бэйс [7, 8] внес значительный вклад в развитие вероятностных методов оценки параметров трещинообразования.

Существующий в Еврокоде 2 [9] метод расчета ширины трещин использует эмпирический подход со статистическим анализом экспериментов. На этой основе устанавливаются уравнения, которые пред-

сказывают наблюдения, сделанные в экспериментах, с принятой вероятностью превышения. Базовый документ [9] определяет этот подход как основу для расчета ширины трещин. По сей день проводятся обширные исследования, посвященные статистическому анализу старых и новых экспериментов. АСІ в свою очередь также основана на обширных методах статистического анализа экспериментальных данных нескольких исследователей [10, 11].

Все представленные верификационные работы и расчетные методики ширины раскрытия трещин были выполнены В.И. Мурашевым с набравшим полную прочность бетоном и с полным модулем деформации бетона, как и перечисленные зарубежные исследования.

Таким образом, остается неизученным в полной мере вопрос о допустимости применения методики, указанной в [3], при решении задачи в период набора прочности бетона, когда изменяется соотношение модулей деформации бетона к модулю деформации арматуры в отличную сторону от испытываемых моделей, а также присутствуют термические напряжения от процесса гидратации, что наиболее критично для массивных железобетонных конструкций.

Теория, заложенная в [3], основана на предпосылках теории Мурашева, в работе которого проводился анализ и испытания изгибаемых балок, без освещения вопроса трещинообразования в массивных железобетонных конструкциях.

В статье проводится исследование нескольких формул, предложенных различными строительными нормами и правилами для расчета ширины трещины в железобетонных изгибаемых элементах. Дополнительно к этому в тех нормах, где это возможно, расчет выполнен для разной стадии твердения с разным модулем деформации бетона. Кроме того, было проведено сравнение уравнений для обсуждения различных факторов и параметров, влияющих на ширину трещины.

Методы расчета ширины раскрытия трещин по разным нормам

Теория Мурашова в СП 63.13330.2018 [3]

Ширина раскрытия трещин определяется из условия равенства удлинения арматуры в пределах расстояния между трещинами l_s и суммы удлинения растянутого бетона в этих пределах и ширины трещины (рис. 1):

$$E_{sm}l_s = \varepsilon_{bm}l_s + \alpha_{crc} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s \Psi_{s1}$ – «средняя» деформация арматуры;
 Ψ_{s1} – коэффициент учитывающего работу растянутого бетона между трещинами;
 ε_s – деформации арматуры;

$l_s = \frac{0,5A_{bt}}{A_s d_s}$ – расстояние между трещинами, где A_{bt} – площадь сечения растянутого бетона непосредственно перед образованием трещин, т. е. определяемое при действии момента M_{crc} .

С ростом напряжений влияние работы растянутого бетона между трещинами уменьшается, т. е. значения ε_{sm} и ε_s сближаются, и значение Ψ_s приближается к 1,0 (рис. 2).

Итоговый вид уравнения ширины раскрытия трещин приобретает вид (2), дополнительно добавляя коэффициенты действия нагрузки, профиля армирования и характера загрузки:

$$A_{crc} = \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (2)$$

где σ_s – напряжения в растянутой арматуре изгибаемых элементов;

E_s – модуль деформации арматуры.

Выражая ε_{bm} через $\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s}$, а $\varepsilon_s = \sigma/E_s$, получаем:

$$\Psi_s = \Psi_{s1} - \frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \alpha, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$ – отношение модуля деформации арматуры к модулю деформации бетона;

$$\Psi_s = \Psi_{s1} - \frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b};$$

Ψ_{s1} – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между трещинами.

Часть выражения $(\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b})$, за малостью величины, была опущена в работе Мурашева, а Ψ_s в итоге приравнена к Ψ_{s1} с небольшим эмпирическим упрощением для разных НДС. Для изгибаемых – $\Psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M}$, для центрально растянутых – $\Psi_s = 1 - 0,8 \frac{N_{crc}}{N}$.

Часть уравнения $\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b}$ из определения Ψ_s , выведенная из теории, является линейной функцией отношения бетона к арматуре и линейной функцией отношения параметров бетона к параметрам армирования.

Верификация методики, а следовательно, и упрощения была определена из ряда испытаний балок, выполненных в 1947–1948 годах.

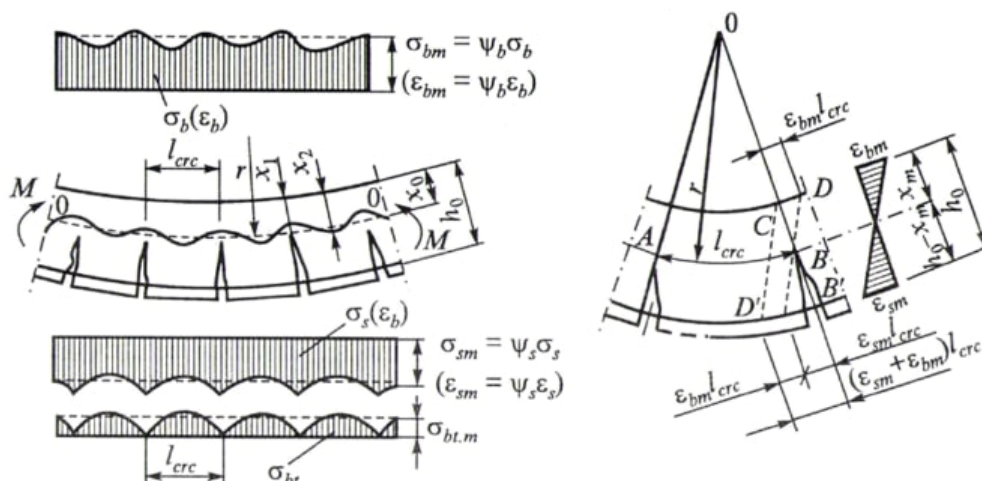


Рис. 1. Неравномерность напряжений арматуры в зонах образования трещин [2, 3]

Fig. 1. Unevenness of the reinforcement stresses in crack formation zones [2, 3]



Рис. 2. Теоретические и опытные значения коэффициента Ψ_s для испытанных балок [2]

Fig. 2. Theoretical and experimental values of the Ψ_s coefficient for the tested beams [2]

Все испытанные конструкции достигли набора прочности.

Определение прочности анкеровки на выдергивание в 1937 году также было выполнено в бетоне с полным набранным модулем упругости.

Ширина раскрытия трещин по Еврокоду 2 [9]

Существующий в [9] метод расчета ширины трещин использует эмпирический подход со статистическим анализом экспериментов. На этой основе устанавливаются уравнения, которые предсказывают наблюдения, сделанные в экспериментах, с принятой вероятностью превышения. Базовый документ [9] определяет этот подход как основу для расчета ширины трещин. По сей день проводятся обширные исследования, посвященные статистическому анализу старых и новых экспериментов.

Еврокод 2 [9] формирует следующую ширину раскрытия трещин w_k , определяющуюся по формуле:

$$W_k = S_{r,max} \times (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \quad (4)$$

где $S_{r,max}$ – максимальное расстояние между трещинами;

ϵ_{sm} – средние относительные деформации арматуры при определяющем сочетании воздействий, включая влияние вынужденных деформаций и учитывая работу бетона на растяжение. Учитывается только дополнительная относительная деформация, выходящая за нулевое значение деформаций бетона на том же уровне;

ϵ_{cm} – средняя относительная деформация бетона между трещинами.

Значение $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ определяется по формуле:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \times \frac{f_{ct,eff}}{p_{p,eff}} (1 + \alpha_e \times p_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (5)$$

где σ_s – напряжение в растянутой арматуре сечения с трещиной;

α_e – отношение модулей деформации арматуры к бетону E_s/E_{cm} ,

$$p_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1 A'_p}{A_{c,eff}}, \quad (6)$$

где A'_p – площадь сечения предварительно напрягаемых и пост-напрягаемых арматурных элементов в пределах эффективной площади $A_{c,eff}$;

$A_{c,eff}$ – эффективная площадь растянутого бетона, окружающего арматуру или напрягающие элементы, с высотой $h_{c,eff}$, причем $h_{c,eff}$ принимается как меньшее значение $2,5 \times (h - d)$; $(h - x)/3$; $h/2$;

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{\xi \times \sigma_s}{\sigma_p}}, \quad (7)$$

здесь ξ – отношение прочностей сцепления напрягаемой и арматурной стали согласно [9, табл. 6.2];

σ_s – наибольший диаметр арматурной стали;

σ_p – эквивалентный диаметр напрягающих элементов.

k_t – коэффициент, зависящий от длительности действия нагрузки.

Максимальное расстояние между трещинами определяется:

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \sigma / \rho_{p,eff}, \quad (8)$$

где σ – диаметр стержня;

c – защитный слой бетона для продольной арматуры;

k_1 – коэффициент, учитывающий свойства сцепления арматуры;

k_2 – коэффициент, учитывающий распределения относительных деформаций: 0,5 – для изгиба, 1 – для чистого растяжения.

Ширина раскрытия трещин по ACI 318 [14]

До 1999 года требования по контролю трещин при изгибе в ACI основывались на так называемом методе z-фактора, разработанном Гергелем и Лутцем [10]. Их работа была основана на обширных методах статистического анализа экспериментальных данных нескольких исследователей. Уравнение, предложенное ранней версией ACI 318-95 [11], приняло следующий вид:

$$W_{max} = 0,076 \beta f_s^3 \sqrt{d_c A} \cdot 10^{-3} \text{ мм}, \quad (9)$$

где W_{max} – наиболее вероятная максимальная ширина раскрытия трещин;

d_c – толщина защитного слоя от крайнего растягивающегося волокна до ближайшего стержня;

f_s – напряжения в арматуре;

$\beta = \frac{h - x}{d - x}$ – отношение расстояния между нейтральной осью и растягивающей плоскостью до расстояния между нейтральной осью и арматурой, 1,2 в балках можно использовать для сравнения ширины трещин, полученных при изгибе и осевом растяжении;

A – площадь бетона, симметричного арматурной стали, делится на количество стержней.

Выражение ширины изгибной трещины в приведенном выше уравнении, где $\beta = \frac{h - x}{d - x} = 1,2$, используется в ACI 318-95 [11] в следующей форме:

$$z = f_s^3 \sqrt{d_c A}. \quad (10)$$

Для усилий допускается максимальное значение $z = 3064,5 \text{ Н/мм}$, что соответствует предельной ширине

трещины 0,41 мм. ACI 318-95 [11] также ограничивает значение z до 2539,2 Н/мм для внешнего воздействия, что соответствует ширине трещины 0,33 мм. Когда конструкции подвергаются очень агрессивному воздействию или спроектированы водонепроницаемыми, комитет ACI 350 [13] ограничивает значение z до 1700 Н/мм, что соответствует ширине трещины 0,2 мм.

В издании 1999 года ACI решил значительно упростить требования по борьбе с трещинами из-за увеличения количества доказательств, свидетельствующих о снижении корреляции между шириной трещины и коррозией арматуры. ACI внес изменения в расчет ширины раскрытия трещин, в которых ведется расчет максимального расстояния между стержнями, а не z -фактор (связанный с шириной трещины).

ACI 318-05 [14], ACI 318-08 [12] предложили следующее уравнение для раскрытия ширины трещин:

$$s = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2,5c \leq 300 \left(\frac{280}{f_s} \right), \quad (11)$$

где s – максимальное расстояние между арматурой, ближайшей к растянутой грани;

c – наименьшее расстояние от поверхности арматуры до растянутой поверхности (защитный слой);

f_s – напряжения в арматуре.

Ширина раскрытия трещин по BS 8110-2 [15]

Согласно BS 8110-2 [15] ширина изгибных трещин в конкретной точке поверхности элемента зависит прежде всего от трех факторов и основана на эмпирических уравнениях:

– близость к рассматриваемой точке арматурных стержней, перпендикулярных трещинам; бетонное покрытие;

– близость нейтральной оси к рассматриваемой точке; $h - x$;

– средняя поверхностная деформация в рассматриваемой точке.

В BS 8110-2 [15] рекомендуется, чтобы деформация в растянутой арматуре ограничивалась значением $0,8 \frac{f_y}{E_s}$ (т. е. 0,8 предела текучести стали), а ширина расчетной поверхностной трещины не должна превышать соответствующее значение. Растрескивание не должно приводить к порче внешнего вида. Таким образом, для видимых элементов расчетная максимальная ширина трещины не должна превышать 0,3 мм. Также образование трещин не должно приводить к коррозии стали, поэтому для элементов, находящихся в агрессивной среде, расчетная максимальная ширина трещины не должна приводить к потере работоспособности конструкции.

Уравнение имеет общий вид:

$$W_d = \frac{3 \alpha_{cr} \varepsilon_m}{1 + 2 \left(\frac{\alpha_{cr} - c_{\min}}{h - x} \right)}, \quad (12)$$

где α_{cr} – расстояние от рассматриваемой точки до поверхности ближайшего продольного стержня;

ε_m – средняя деформация на уровне, на котором рассматривается трещина;

$c_{\min}$ – минимальный защитный слой растянутой арматуры;

h – общая высота элемента;

x – высота нейтральной оси.

Согласно BS 8110-2 [15] при оценке деформаций модуль упругости бетона следует принимать равным половине начального значения.

Модуль упругости в разных нормах

Модуль упругости бетона (E_c) – это характеристика, которая показывает способность материала сопротивляться деформации под воздействием нагрузки. Он определяется как отношение напряжения к соответствующей деформации и отражает жесткость бетона.

При проектировании бетонных конструкций важно определить модуль упругости. Для этого используется линейный анализ элементов на основе теории упругости.

Согласно разделу 19.2.2 ACI 318 [12], модуль упругости бетона оценивается следующим образом:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (МПа)}. \quad (13)$$

Модуль упругости бетона по EN (Еврокоду) [9] можно оценить с помощью следующего выражения:

$$E_{cm} = 22 \left[\frac{\sqrt{f'_{cm}}}{10} \right]^{0,3}, \quad (14)$$

где E_{cm} – средний модуль упругости;

f'_{cm} – средняя прочность бетона на сжатие через 28 дней в соответствии с [9, табл. 3.1].

По [15] значение модуля упругости в возрасте 28 дней бетона приведено в BS 8110: Часть II 1985:

$$E_{c,28} = k_0 + 0,2 f_{cu,28}, \quad (15)$$

где k_0 – составляет 20 кН на квадратный миллиметр для бетона нормальной массы;

$f_{cu,28}$ – прочность бетона на сжатие через 28 дней.

Рассчитаем модули упругости бетона для прочности на 28 суток 25 МПа на 1, 3 и 7 суток по стандартам EN 1992-1-1 [9], ACI 318 [12], BS 8110 [15] и СП 63.13330.2018 [3].

Для построения графиков сравнения разных возрастов примем ориентировочную таблицу роста прочности бетона по дням (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Прочность бетона на различных этапах твердения
Concrete strength at various stages of hardening

Время твердения, сутки	Прочность, % от R
1	30–40 %
3	50–60 %
7	65–75 %
28	100 %

Таблица 2
Table 2

Модули упругости бетона на различные сутки по разным нормам
Modules of elasticity of concrete for different days according to different standards

Сроки, сутки	EN 1992-1-1 [9], ГПа	ACI 318 [12], ГПа	BS 8110 [15], ГПа	СП 63.13330.2018 [3], ГПа
1	19,2	14,8	16,0	19,5
3	23,7	18,9	20,5	24,0
7	26,5	21,8	22,8	27,0
28	31,0	28,3	27,5	32,14

Используем средние значения из этого диапазона (табл. 1) для расчетов:

На 1 сутки – 8,75 МПа, что составляет 35 % от прочности на 28 сутки.

На 3 сутки – 13,75 МПа, что составляет 55 % от прочности на 28 сутки.

На 7 сутки – 17,5 МПа, что составляет 70 % от прочности на 28 сутки.

Пересчитаем значения модулей упругости для каждого срока (по прочности) и стандарта (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что величина модуля упругости для различных нормативных документов бетона од-

ной и той же прочности отличается как на этапе набора прочности, так и на этапе 28 суток.

Модуль упругости бетона различается (рис. 3) в зависимости от используемого нормативного документа. На начальных этапах твердения (1, 3, 7 сутки) и на 28 сутки значения модулей упругости по различным стандартам отличаются.

Сравнение стандартов:

– EN [9] и СП [3] демонстрируют близкие значения, что отражает схожие подходы;

– ACI [12] показывает более консервативные значения, особенно на ранних сроках.

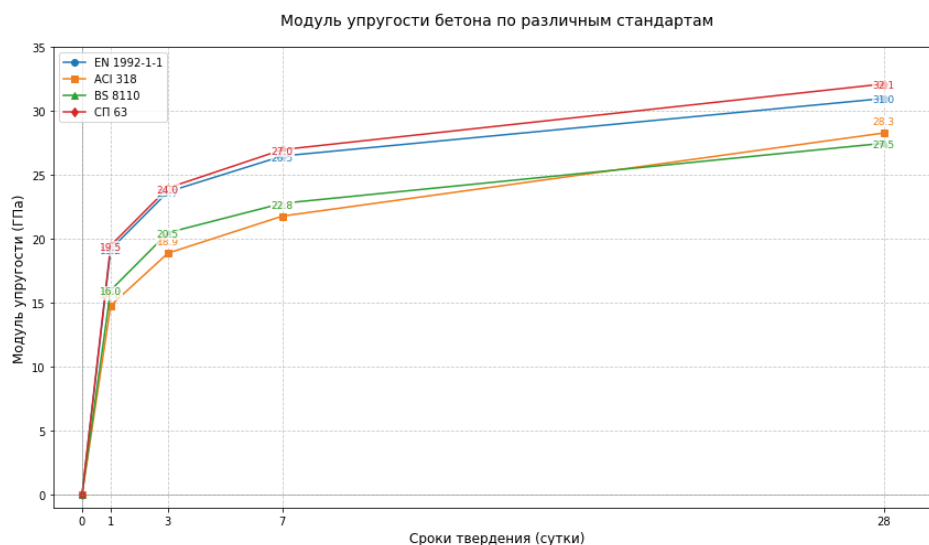


Рис. 3. График, отображающий модули упругости бетона по различным стандартам на 1, 3, 7 и 28 суток для бетона 25 Н/мм²
Fig. 3. Graph showing the elastic modulus of concrete according to various standards on days 1, 3, 7 and 28 for concrete of 25 N/mm²

Причины различий в значениях:

- Различные стандарты основываются на различных методологиях и эмпирических данных, полученных в результате исследований и практических наблюдений в разных странах и условиях.
- В разных стандартах могут использоваться различные типы испытаний и методы измерения.
- В различных регионах могут использоваться разные материалы и учитываться различные климатические и строительные условия, что влияет на расчетные формулы и коэффициенты.
- Некоторые стандарты могут быть более консервативными, закладывая большие запасы для обеспечения безопасности конструкций.

Сравнение ширины раскрытия трещин по разным нормам для разного процента армирования при полном проектном модуле

В этом разделе выполнен расчет ширины раскрытия трещин пяти различных железобетонных сечений (рис. 4), имеющих разные значения коэффициента армирования, разное распределение стержней и класса прочности арматуры. В расчет приняты параметры бетона с модулем деформации, равным 31 ГПа в соответствии с EN, и прочностью бетона на сжатие 25 Н/мм². Для 28 суток результаты представлены на рис. 5.

Прикладываемые усилия действующего момента приравнены к $2M_{crc}$.

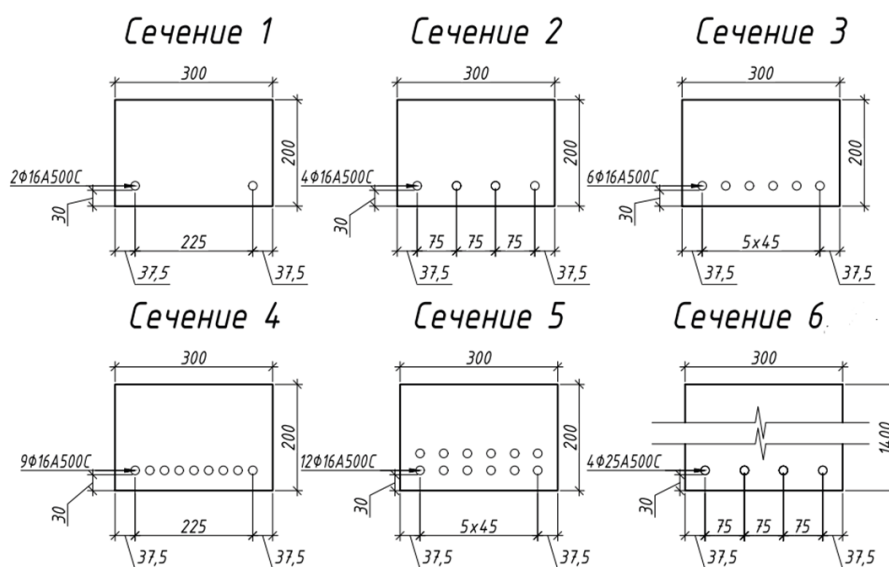


Рис. 4. Типы рассчитываемых сечений

Fig. 4. Types of calculated cross sections

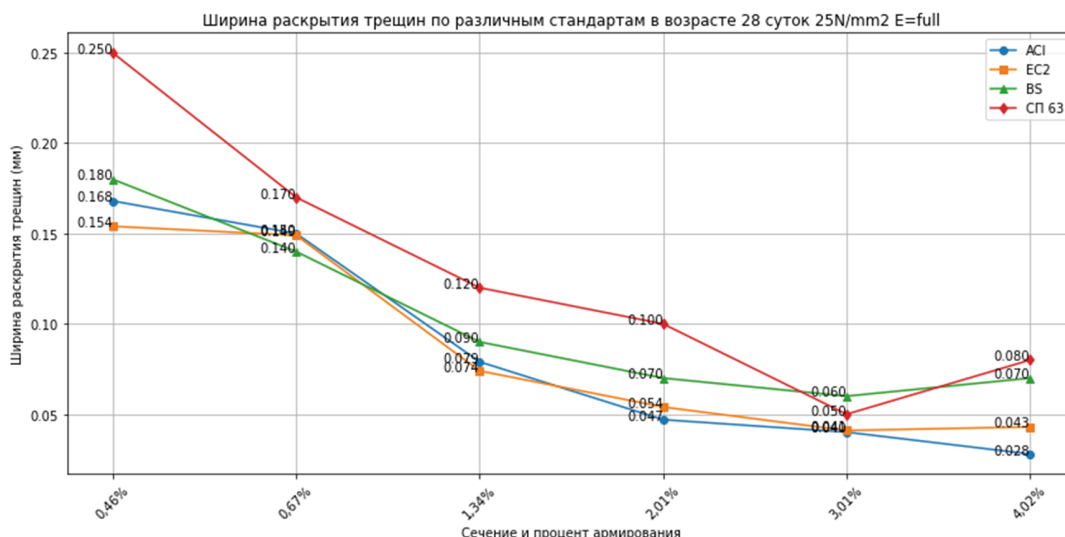


Рис. 5. Ширина раскрытия трещин по различным стандартам (слева направо увеличение процента армирования)

Fig. 5. Crack opening width according to various standards (from left to right, the increase of the percentage of reinforcement)

Таблица 3

Table 3

Ширина раскрытия трещин для бетона проектного возраста с прочностью 25 Н/мм² и полным модулем упругости для 28 суток
Crack opening width for design-age concrete with a strength of 25 N/mm² and a full modulus of elasticity for 28 days

									$F_c = 25 \text{ Н/мм}^2, F_y = 500 \text{ Н/мм}^2, E = \text{full}$ (28 суток)			
Сечение	Высота, h , мм	Ширина, b , мм	Армирова- ние		% армирования	$M_{кр}$, прод., тм	$M_{лп}$, тм	$2M_{кр}$	ACI [12]	EC2 [9]	BS [15]	СП 63 [3] $R_{bn}=25\text{Н/}$ мм^2
			кол- во	диа- метр					Max шир. раскр., мм	Ширина раскр., мм	Ширина раскр., мм	$a_{кр}$, мм
Сечение 1	200	300	2	16	0,67019	0,583	2,51	1,166	0,157	0,149	0,18	0,17
Сечение 2	200	300	4	16	1,34037	0,721	3,89	1,442	0,079	0,074	0,09	0,12
Сечение 3	200	300	6	16	2,01056	0,85	4,13	1,7	0,047	0,054	0,07	0,1
Сечение 4	200	300	9	16	3,01584	1,02	4,31	2,04	0,0401	0,041	0,06	0,05
Сечение 5, армату- ра в два ряда	200	300	12	16	4,02112	0,907	3,99	1,814	0,028	0,043	0,07	0,08
Сечение 6	1400	300	4	25	0,46749	31,6	109	63,2	0,168	0,154	0,14	0,25

Сравнение результатов расчетов, приведенных в табл. 3, по различным стандартам:

– **ACI [12]** в целом показывает меньшие значения ширины раскрытия трещин по сравнению с другими стандартами, особенно для сечений 3, 4 и 5.

– **Еврокод 2 [9]** и **BS 8110 [15]**. Значения ширины раскрытия трещин по этим стандартам близки друг к другу и часто ниже, чем у [3] (B25), но выше, чем у ACI [12].

– **СП 63.13330.2018 [3]**. Значения находятся между другими стандартами, иногда сопоставимы с [9, 15].

Тенденции изменения ширины раскрытия трещин:

Увеличение количества арматуры приводит к уменьшению ширины раскрытия трещин по всем стандартам, что подтверждает ожидаемое поведение, так как большее армирование ограничивает раскрытие трещин.

Различные стандарты используют различные методики расчета и эмпирические данные, что приводит к различиям в результатах. Например, в ACI [12] могут быть более консервативные допущения по раскрытию трещин, могут учитывать условия эксплуатации и прочие факторы, влияющие на образование трещин.

В разных странах могут быть разные требования к конструкциям в зависимости от местных условий, климата, сейсмической активности и других факторов, что также влияет на значения раскрытия трещин.

График позволяет визуально оценить и сравнить поведение различных стандартов в отношении ширины раскрытия трещин в бетоне для различных условий армирования и размеров сечений.

Сравнение ширины раскрытия трещин по разным нормам для разного процента армирования эквивалентного по прочности бетона на раннем этапе

Для оценки влияния раннего модуля на трещинообразование рассмотрим случай, когда бетон имеет проектную прочность (25 Н/мм^2), но сниженный модуль упругости ($23,9 \text{ ГПа}$, 7 суток). Это соответствует данным исследований [16] для бетона с $w/c = 0,4$.

Воспользуемся данными, представленными в исследованиях [16], выполненных факультетом гражданского строительства Корейского института передовых наук и технологий, в которых были получены результаты для бетона типа 1, который на третьи сутки имел $31,6 \text{ Н/мм}^2$, при этом модуль упругости его

составлял $23,9 \text{ ГПа}$. Данные параметры подходят нам для сравнения в указанной конфигурации. Отметим, что в соответствии с представленными исследованиями [16] (рис. 6) полный модуль, заложенный в нормативных документах, на ранних сроках не коррелирует модулю соответствующей прочности. Примем данные одного из испытаний, показывающие при $24,5 \text{ Н/мм}^2$ значение модуля $23,4 \text{ ГПа}$ на 7 суток. Это бетон с $w/c = 0,4$ и условиями твердения 10°C .

Ширина раскрытия трещин для балок при соответствующей прочности, но сниженного модуля из-за начального периода твердения, отличается от ширины раскрытия трещин при той же прочности, но полностью набранном модуле на 28 суток (табл. 4).

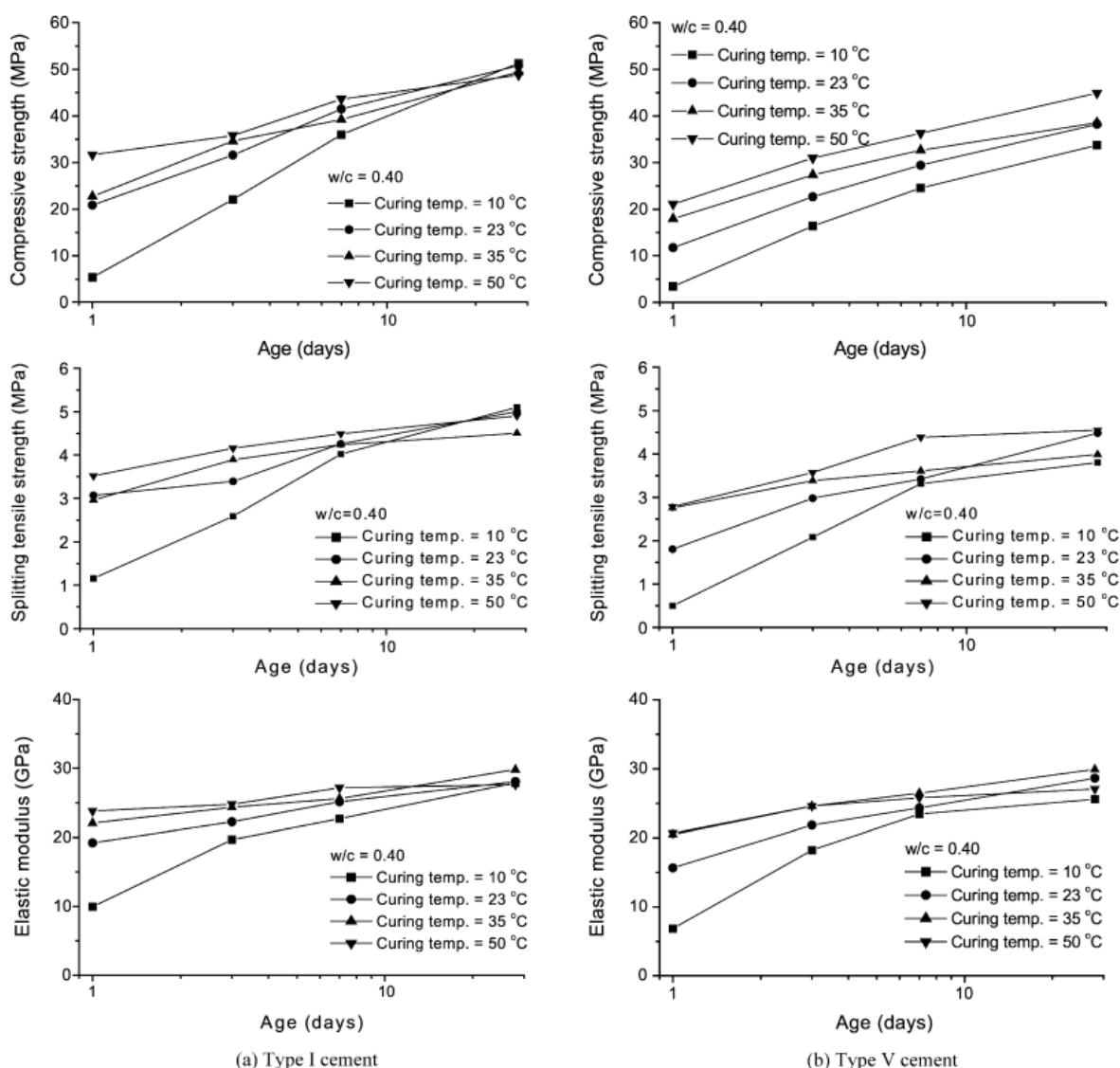


Рис. 6. Прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости образцов на раннем этапе твердения [16]
Fig. 6. Compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity of samples at an early stage of hardening [16]

Таблица 4

Table 4

Ширина раскрытия трещин для бетона промежуточного возраста с прочностью 25 Н/мм² и неполным модулем упругости для 7 суток

Crack opening width for intermediate-aged concrete with a strength of 25 N/mm² and an incomplete modulus of elasticity for 7 days

									$F_c = 25 \text{ Н/мм}^2, F_y = 500 \text{ Н/мм}^2, E = 23,9 \text{ ГПа (7 суток)}$			
Сечение	Высота, h , мм	Ширина, b , мм	Армирование		% армирования	$M_{cr, \text{ прод.}}, \text{ тм}$	$M_{ult}, \text{ тм}$	$2M_{cr}$	ACI [12]	EC2 [9]	BS [15]	СП 63 [3] $R_{bn} = 25 \text{ Н/мм}^2$
			кол-во	диа-метр					Мак шир. раскр., w , мм	Ширина раскр., мм	Ширина раскр., w , мм	$a_{cr}, \text{ мм}$
Сечение 1	200	300	2	16	0,67019	0,583	2,51	1,166	0,159	0,144	0,17	0,19
Сечение 2	200	300	4	16	1,34037	0,721	3,89	1,442	0,0808	0,073	0,08	0,14
Сечение 3	200	300	6	16	2,01056	0,85	4,13	1,7	0,048	0,053	0,07	0,11
Сечение 4	200	300	9	16	3,01584	1,02	4,31	2,04	0,041	0,04	0,05	0,06
Сечение 5, арматура в два ряда	200	300	12	16	4,02112	0,907	3,99	1,814	0,028	0,042	0,06	0,09
Сечение 6	1400	300	4	25	0,46749	31,6	109	63,2	0,17	0,15	0,14	0,26



Рис. 7. Ширина раскрытия трещин по различным стандартам в возрасте 7 суток 25 Н/мм², E = 23,9 ГПа
Fig. 7. The crack opening width according to various standards at the age of 7 days 25 N/mm², E = 23.9 GPa

Как видно из графиков (рис. 8), снижение модуля упругости с 31 ГПа (28 суток) до 23,9 ГПа (7 суток) при сохранении прочности 25 Н/мм приводит к увеличению ширины раскрытия трещин в среднем до 11 % (например, для сечения 1 по СП 63.13330.2018 [3] – с 0,17 до 0,19 мм). Это объясняется уменьшением жесткости бетона, что подтверждается исследованиями [16], где показано, что модуль упругости на ранних сроках нелинейно зависит от прочности.

Выводы

Соотношение модуля упругости и прочности бетона в раннем возрасте может существенно отличаться от соотношения в проектном возрасте (до 24 %), что приводит к изменению (до 11 %) ширины раскрытия трещин, рассчитанной по методикам нормативных документов различных стран.

Выявленное различие методик расчета различных стандартов (EN 1992-1-1 [9], ACI 318 [12], BS 8110 [15] и СП 63.13330.2018 [3]) приводит к значительному отличию расчетной ширины раскрытия трещин. Это связано с различиями в подходах и эмпирических данных, заложенных в расчетных уравнениях.

Наибольшие расхождения между стандартами наблюдаются при низком проценте армирования (сечение 1: ACI [12] – 0,16 мм, СП 63 [3] – 0,19 мм). Это связано с разными подходами к учету пластичности

бетона. ACI [12] использует консервативные допущения, минимизируя расчетные значения, СП 63 [3] и EN2 [9] учитывают работу растянутого бетона между трещинами, что дает более высокие результаты.

На основе проведенных расчетов предложено учитывать изменение модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения при проектировании железобетонных конструкций. Это позволит более точно прогнозировать ширину раскрытия трещин, в том числе температурно-усадочных, возникающих в раннем возрасте бетона.

Список литературы / References

1. Лолейт А.Ф. Курс теории проектирования железобетона для строительных техникумов, основы теории и проектирования. Москва–Ленинград: Государственное издательство, 1925. 262 с.
1. Loleit A.F. Course of theory of reinforced concrete design for construction technical schools, fundamentals of theory and design. Moscow–Leningrad: State Publishing House, 1925, 262 p. (In Russian).
2. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. Москва: Издательство Министерства строительства предприятий машиностроения, 1950. 268 с.

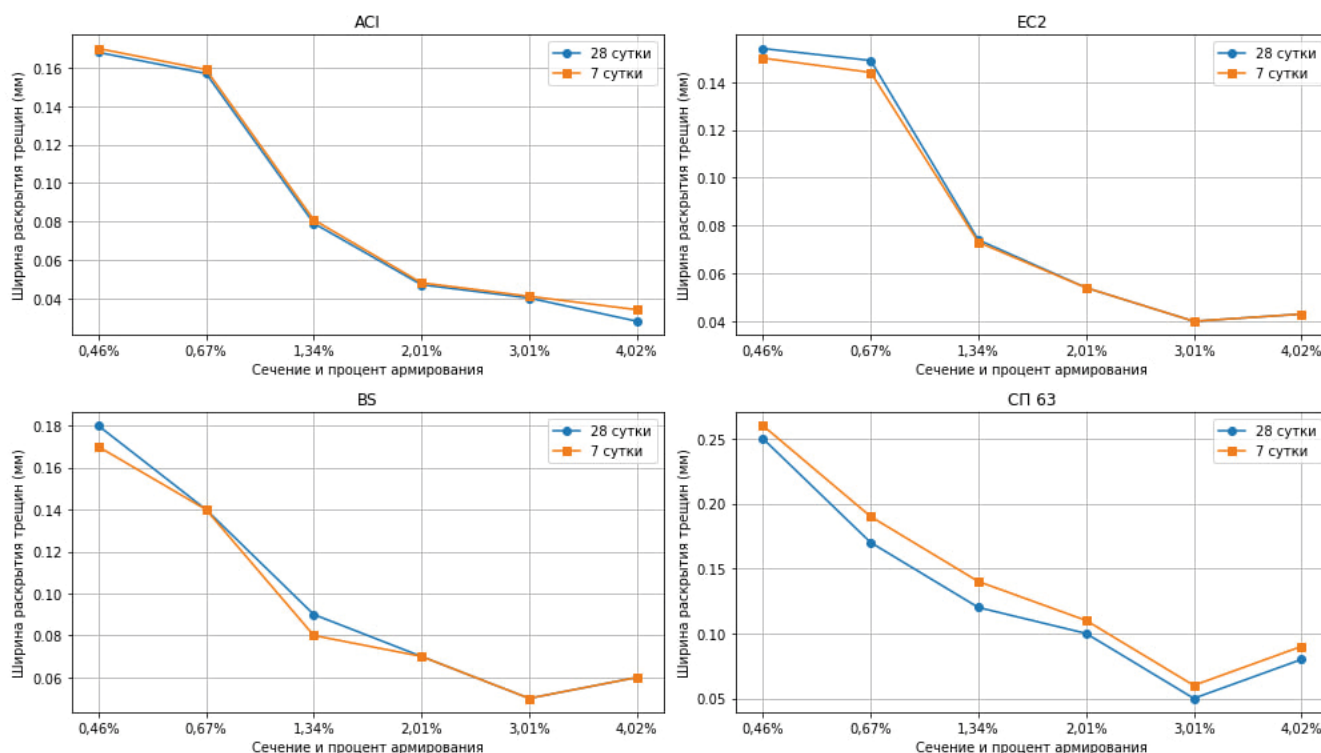


Рис. 8. Графики сравнения ширины раскрытия трещин по различным стандартам идентичной прочности на разных этапах твердения и разным модулем упругости при идентичной прочности

Fig. 8. Graphs comparing the crack opening width according to different standards of identical strength at different stages of hardening and different modulus of elasticity at identical strength

2. Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete. Moscow: Publishing House of the Ministry of Construction of the Mechanical Engineering Enterprises, 1950, 268 p. (In Russian).
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2). Москва, 2018.
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003 (with Changes No. 1, 2). Moscow, 2018. (In Russian).
4. Saliger R. High grade steel in reinforcement concrete. *2nd Congress, International Association for Bridges and Structural Engineering*, Preliminary Publication, Berlin-Munich, 1936, pp. 293–315.
5. Tomas F.G. Cracking in reinforced concrete. *Structural Engineer*. 1936, no. 7, vol. 14, pp. 298–320.
6. Broms B.B. Crack width and crack spacing in reinforced concrete members. *Journal of American Concrete Institute*. 1965, no. 10, vol. 62, pp. 1237–1256.
7. Mr Bayes, Mr Price. An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the Late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a Letter to John Canton, A. M. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1763, vol. 53, pp. 370–418. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1763.0053>.
8. Base G.D., J.B. Read, Beeby A.W., Taylor H.P.J. An Investigation of the Crack Control Characteristics of Various Types of Bar in Reinforced Concrete Beams. Research Report No. 18, Parts I and II, Cement and Concrete Association, London, 1966.
9. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
10. Gergely P., Lutz L.A. Maximum Crack Width in RC Flexural Members, Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete. SP-20, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 87–117.
11. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95). American Concrete Institute, Detroit, 1995.
12. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08). American Concrete Institute, Detroit, 2008.
13. Concrete sanitary engineering structures, a report by ACI committee 350. *ACI Structural Journal*. 1983, vol. 80, pp. 467–486.
14. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, Detroit, 2005.
15. BS 8110-2:1985. Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. 1997, British Standard Institution, London, 1998.
16. Jin-Keun Kim, Sang Hun Han, Young Chul Song. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cement and Concrete Research*. 2002, vol. 32, no. 7, pp. 1087–1094. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00744-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00744-5)
17. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 270 с.
17. Trapeznikov L.P. Thermal crack resistance of massive concrete structures. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, 270 p. (In Russian).

**Информация об авторе /
Information about the author**

Абузарр Каримович Жалнин, аспирант,
АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: abduzarr@mail.ru
Abuzarr K. Zhalnin, Postgraduate Student,
JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: abduzarr@mail.ru

УДК 691–4

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-33-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-33-39)**И.А. ИВАНОВ**

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Ключевская улица, д. 40В,
Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, 670013, Российская Федерация

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МАТЕРИАЛАМИ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Аннотация

Введение. В работе показана технология натяжения арматуры, по концам которой прикреплены отрезки арматуры из металла с памятью формы, а также показаны технологии, сопоставимые с предложенной. Показаны примеры применения таких технологий в реставрации железобетонных изделий и при натяжении арматуры на бетон.

Цель. Упростить и удешевить реставрационные работы по восстановлению изношенных железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Проведены патентные поиски по зарубежным патентам по данному направлению, а также изучены научные статьи за последние 5 лет.

Результаты. Подана заявка на патент и обосновано применение данной технологии на практике.

Выводы. Данная технология легко осуществима на практике и может снизить стоимость восстановительных работ.

Ключевые слова: сплав с эффектом памяти формы, сплав с разнообразными свойствами, перспективы сплавов, разнообразие сплавов, арматура, натяжение, арматура с двух- и трехзаходной резьбой, реставрация, цена

Для цитирования: Иванов И.А. Восстановление изношенных железобетонных конструкций материалами с эффектом памяти формы // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 33–39. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-33-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-33-39). EDN: XEQBDK

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.02.2025

Поступила после рецензирования 05.04.2025

Принята к публикации 10.04.2025

I.A. IVANOV

East Siberia State University of Technology and Management, Klyuchevskaya str., 40V, Republic of Buryatia,
Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

RESTORATION OF WORN—OUT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT

Abstract

Introduction. The paper shows the reinforcement tension technology, at the ends of which metal reinforcement segments with shape memory are attached, and also shows technologies comparable to the proposed one. Examples of the use of such technologies in the restoration of reinforced concrete products and in the stretching of reinforcement on concrete are shown.

Aim. To simplify and reduce the cost of restoration work to restore worn-out reinforced concrete structures.

Materials and methods. Patent searches for foreign patents in this area have been conducted, as well as scientific articles from the last 5 years have been studied.

Results. A patent application has been filed and the application of this technology in practice has been substantiated.

Conclusions. This technology is easily feasible in practice and can reduce the cost of restoration work.

Keywords: shape memory alloy with various properties, prospects of such alloys and their diversity, reinforcement, tension, reinforcement with two- and three-way threads, restoration, price

For citation: Ivanov I.A. Restoration of worn-out reinforced concrete structures with materials with shape memory effect. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 33–39. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-33-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-33-39). EDN: XEQBDK

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the work on the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 13.02.2025

Revised 05.04.2025

Accepted 10.04.2025

На то, что преднапряженный железобетон (ЖБ) имеет множество недостатков, обратили внимание совсем недавно: ограниченный срок работы арматуры, неравномерное натяжение в криволинейных расположениях арматуры, повышенная цена ЖБ изделия, сложность с натяжением арматуры в коротких ЖБ изделиях, много отходов арматуры, во многих изделиях нет связи арматуры с основной массой бетона, или она чисто символическая и т. д. Но все эти вопросы были связаны с новым строительством, а, например, такое направление, как реставрация, обходили стороной. Часто это уникальные здания, которые достойны сохранения еще на 100 или 200 лет, ведь у нас есть

здания с тысячелетней и даже более историей. Надо помочь им продолжить свое существование.

Предложенные в последнее время технологии ремонта ЖБ изделий при реставрации уникальных зданий сделали большой шаг вперед в этом направлении.

На рис. 1 и 2 представлены два снимка ЖБ изделий, которым почти сто лет. Видно, что арматура гладкая, без натяжения, защитный слой местами отсутствует, при обследовании бетона выяснилось, что было потеряно 30 % прочности.



Рис. 1. Бурятия, г. Улан-Удэ, подвал дома № 17 по ул. Октябрьская. Постройка 1935 г., фото сделано автором в 2021 г.

Fig. 1. Buryatia, Ulan-Ude, basement of house No. 17 on the Oktyabrskaya Street. Built in 1935, the photo was taken by the author in 2021



Рис. 2. Бурятия, г. Улан-Удэ, перекрытие подвала школы № 29. Постройка 1937 г. Гладкая арматура оголена в середине изделия. Фото сделано автором в 2015 г.

Fig. 2. Buryatia, Ulan-Ude, the ceiling of the basement of school No. 29. Built in 1937. The smooth reinforcement is exposed in the middle of the product. The photo was taken by the author in 2015

Замена балки, если это обычное здание, очень и очень трудоемкое мероприятие, а если это уникальное здание, в котором замена балки – это больше чем сейсмика, то есть возможность, что от уникальности останется только название объекта.

Швейцарские исследователи предложили следующее: арматуру из металла с памятью формы (никель + титан) нужно брать меньше длины арматуры, указанной в технологической карте, потом нагреть до плюс 600 °С и резко охладить (сухой лед CO₂ минус 70 °С или сжиженный газ минус 160 °С), арматуру растянуть до проектных размеров и уложить в предварительно сделанный канал по низу балки на глубину 2–3 диаметра арматуры, закрепить анкерами и подать ток, который должен нагреть арматуру до плюс 400 °С, арматура уменьшится по длине и по достижении проектной прочности (прочность до ее растяжения) нагрев нужно прекратить, идет торкетирование арматуры. Нагрев арматуры до 400 °С происходит, только если арматура состоит из никеля и титана, а сейчас уже создан и применяется металл с памятью формы, который «вспоминает» свою первоначальную форму при плюс 160 °С, вполне приемлемая для бетона температура (Fe + Mn + Si + Cr + Ni).

Для справки: цена никеля в порошке 2 миллиона рублей за тонну.

Другой предложенной технологией укрепления ЖБ изделия является наложение плоской ленты из металла с памятью формы в зоне растяжения балки и закрепления ее концов на торцах изделия (рис. 3). Недостаток такой технологии в том, что возникают трудности с закреплением полосы на торцах изделия.

Также была предложена технология натяжения арматуры на бетон (при реставрации), но она не прижилась, ведь гайку надо закручивать динамометрическим ключом, но им трудно работать, так как конец балки (чаще всего) находится в стене, а разобрать и восстановить ее – это нарушение внешнего и внутреннего видов объекта.

Были предложения применять многозаходную резьбу в устанавливаемой арматуре, мотивируя тем, что за один оборот гайки (трехзаходная резьба) она перемещается в 3 раза дальше, чем если бы это была резьба однозаходная. Утверждалось, что она надежнее в работе и в фиксации гайки. Некоторые исследователи отстаивают это утверждение до сих пор. Попытаемся разобраться (рис. 4).



Рис. 3. Плоская арматура

(<https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/4781/820/memorijske-legure-bi-mogle-da-promene-oblik-gradjevine-industrije>)

Fig. 3. Flat reinforcement

(<https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/4781/820/memorijske-legure-bi-mogle-da-promene-oblik-gradjevine-industrije>)

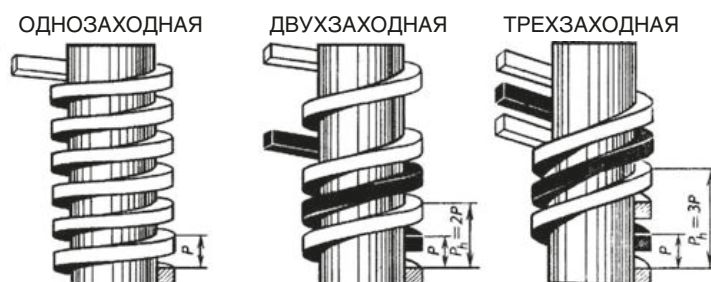


Рис. 4. P – шаг резьбы, у двухзаходной и особенно у трехзаходной наклон резьбы больше, чем у однозаходной, что ведет к самораскручиванию гаек (<https://cherch.ru/>)

Fig. 4. P – thread pitch, in two-way and especially in three-way, the thread slope is greater than in single-way, which leads to self-unwinding of the nuts (<https://cherch.ru/>)

Там, где нужно надежное и редкое откручивание гаек, везде однозаходная резьба: кривошип в ДВС, там же головки цилиндров; траки на гусеницах бульдозеров; металлические конструкции на мостах; соединения рельс и т. д.

Многозаходная резьба нужна там, где частое использование разъемных соединений: авторучки; буровые трубы; объектив фотоаппарата – наводка на резкость (у многозаходной резьбы нет люфта) и т. д.

К какой категории отнести многозаходную резьбу на арматуре, где ее замена нужна (самое малое) через 50–70 лет?

Последнее предложение наших строителей по возвращению к жизни старых (на грани аварийного износа) ЖБ изделий. Следует заметить, что реставрация ценных зданий имеет свою специфику: ее поручают только лучшим специалистам; применяют передовые и давно забытые технологии; повышенная цена; привлечение специалистов из других областей – художники, камнетесы, историки, архивариусы и т. д. И конечно, здесь в первых рядах строители.

Вот одно из их предложений (рис. 5).

Предлагаемая технология работает следующим образом: к арматуре (2) прикрепляют отрезки (3, 4),

изготовленные из металла с памятью формы, перед этим их нагревают, резко охлаждают и доводят до состояния мартенсита, растягивают до рабочих параметров и соединяют с арматурой (2) муфтами (5 и 6). Принципиальная схема соединительной муфты показана на рис. 6. Соединенную арматуру вместе с муфтами (5 и 6) вставляют в полость (9) и фиксируют анкерами (7 и 8). К концам этой арматуры подсоединяют клеммы и пропускают ток для нагрева. Арматура, изготовленная из металла с памятью формы, сокращается и натягивает отрезок (2). После этого полость (9) инъецируется, а ЖБ изделие готово к работе.

Преимущество этого способа перед существующими – резкое уменьшение цены ЖБ изделия, что поспособствует его внедрению. Способ может применяться при реставрации архитектурных объектов, а также при натяжении арматуры на бетон. Отпадает необходимость натягивать арматуру гайкой – очень сложно определить предел текучести арматуры при натяжении, если производится натяжение на упор, то теряется часть арматуры (вырезается) между упором и ЖБ изделием. Следует также отметить, что арматура с памятью формы на 20–30 % прочнее обычной арматуры, поэтому эти участки арматуры можно делать тоньше, что также способствует удешевлению изделия.

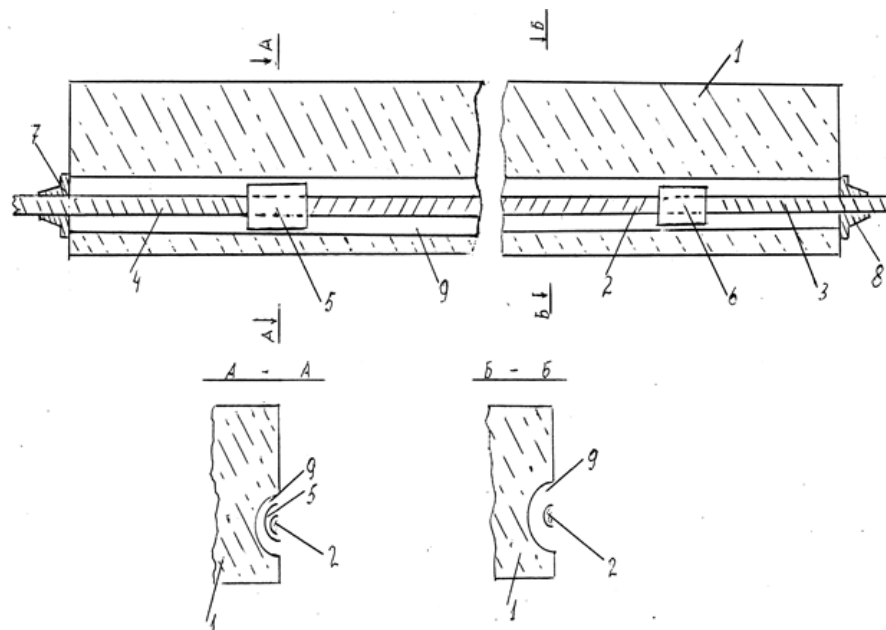


Рис. 5. Предлагаемая технология поясняется чертежом, где: 1 – бетон; 2 – обычная арматура, которая не обладает памятью формы; 3, 4 – арматура из металла, обладающая памятью формы, которая соединена с арматурой (2) муфтами (5 и 6); 7, 8 – анкеры, фиксирующие составную арматуру с двух ее сторон (концов); 9 – полость, в которой располагается составная арматура (2–4) с муфтами (5 и 6)

Fig. 5. The proposed technology is explained by the drawing, where: 1 – concrete; 2 – conventional reinforcement that does not have shape memory; 3, 4 – metal reinforcement with shape memory that is connected to the reinforcement (2) by couplings (5 and 6); 7, 8 – anchors that fix the composite reinforcement on both its sides (ends); 9 – the cavity in which the composite reinforcement (2, 3, 4) with couplings (5 and 6) is located

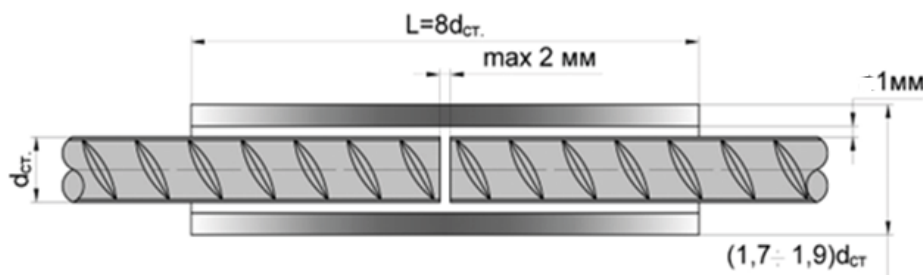


Рис. 6. Основные параметры соединительной муфты для арматуры
Fig. 6. Basic parameters of the coupling for reinforcement

По этой технологии, по предварительным расчетам, арматура с памятью формы составляет около 20 % от общей длины арматуры в ЖБ изделии.

Максимальная обратимая деформация, которую могут выдержать эти металлы (с памятью формы) без обратимых повреждений, составляет 8 %.

Сейчас ведутся работы по переходу сплавов металлов в исходное положение при помощи магнитного поля. Уже есть значительные успехи. У этой технологии (арматура из металла с памятью формы) большие перспективы.

Список литературы

1. Гамбаров Г.А. и др. Балочные конструкции, усиленные трехосно предварительно напряженными элементами // *Предварительно-напряженные конструкции с непрерывным армированием*. Труды НИИЖБ. Москва: Стройиздат, 1970. С. 85–92.
2. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М. и др. Новое о прочности железобетона. Москва: Стройиздат, 1977. 272 с.
3. Гервик Б. Предварительно напряженные железобетонные конструкции в строительстве. Москва: Стройиздат, 1978. 336 с.
4. ГОСТ 22362-77. Конструкции железобетонные. Методы измерения силы натяжения арматуры. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1977.
5. Градюк И.И., Стасюк М.И. Раскрытие и закрытие трещин в изгибаемых элементах со смешанным армированием // *Бетон и железобетон*. 1983. № 3. С. 29–30.
6. Мадатян С.А. Общие тенденции производства и применения обычной и напрягаемой арматуры // *Бетон и железобетон*. 1997. № 1. С. 2–5.
7. Ганс Мелль. Предварительно напряженный железобетон. История развития конструкции, изготовление, области применения. Москва: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958.
8. Иванов И.А. Современное состояние преднапряженного железобетона // *Строительство: новые технологии – новое оборудование*. 2023. № 10. С. 39–45.
9. Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Правила проектирования / Методическое пособие. Москва, 2017.
10. Васильев П.И. Вопросы развития теории железобетона // *Бетон и железобетон*. 1980. № 4. С. 26–27.
11. Иванов И.А. Способ натяжения арматуры, изготовленной из металла с памятью формы, в железобетонных конструкциях. Патент RU 2 765 004 С2. Оpubл. 24.01.2022.
12. Иванов И.А. Способ натяжения арматуры не обладающей памятью формы арматурой, изготовленной из металла с памятью формы. Заявка РФ № 2024136661. Оpubл. 05.12.2024.

References

1. Gambarov G.A. et al. Beam structures reinforced with triaxially prestressed elements. *Prestressed Structures with Continuous Reinforcement*. Proceedings of NIIZHB. Moscow: Stroyizdat Publ., 1970, pp. 85–92. (In Russian).
2. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Krylov S.M. et al. New about strength of reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1977, 272 p. (In Russian).
3. Gerwick B. *Prestressed reinforced concrete structures in construction*. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978, 336 p. (In Russian).
4. State Standard 22362-77. Reinforced concrete structures. Methods for determination of reinforcement tensioning tendon. Moscow: Publishing house of standards, 1977. (In Russian).
5. Gradyuk I.I., Stasiuk M.I. Crack opening and closing in bending elements with mixed reinforcement. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1983, no. 3, pp. 29–30. (In Russian).
6. Madatyan S.A. General tendencies of production and application of the conventional and tensioned armature. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1997, no. 1, pp. 2–5. (In Russian).
7. Hans Möll. *Entwicklung, Konstruktionen, Herstellungsverfahren und Anwendungsgebiete*, Berliner Union, 1954. (In German).

8. Ivanov I.A. Current state of prestressed reinforced concrete. *Construction: new technologies – new equipment*. 2023, no. 10, pp. 39–45. (In Russian).
9. Reinforced concrete monolithic structures with prestressed reinforcement without bonding with concrete. Design rules / Methodical manual. Moscow, 2017. (In Russian).
10. Vasiliev P.I. Questions of the development of the theory of reinforced concrete. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1980, no. 4, pp. 26–27. (In Russian).
11. Ivanov I.A. Method for tensioning reinforcement made of metal with shape memory in reinforced concrete structures. Patent RU 2 765 004 C2. Publ. date 24.01.2022. (In Russian).
12. Ivanov I.A. A method of tensioning fittings with non-shape memory fittings made of metal with shape memory. Application of the Russian Federation No. 2024136661. Publ. date 05.12.2024. (In Russian).

**Информация об авторе /
Information about the author**

Игорь Алексеевич Иванов, д-р техн. наук, доцент, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ

e-mail: ivanova-2006@mail.ru

Igor A. Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Lecturer at the Department of Industrial and Civil Engineering, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude

e-mail: ivanova-2006@mail.ru

УДК 691.32:620.193.01

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51)

**А.В. БУЧКИН¹, Г.В. ЧЕХНИЙ^{1,✉}, Н.К. РОЗЕНТАЛЬ², С.А. ОРЕХОВ¹,
С.И. ИВАНОВ¹, А.И. ПАСТУХОВ¹**

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПО ГОСТ 10060–2012

Аннотация

Введение. На основании выполненных экспериментальных исследований морозостойкости бетона по режиму ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) с различными способами оттаивания образцов рассчитаны коэффициенты перехода (K) от марки бетона по морозостойкости, определенной при оттаивании в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия или при обдуве емкостей с образцами теплым воздухом, к марке бетона, определенной стандартным методом с оттаиванием образцов в ванне с раствором 5%-ного хлорида натрия. Расчетным методом термонапряженного состояния бетона показано, что изменение методики проведения испытаний бетона на морозостойкость, включая способ оттаивания образцов после замораживания, может стать причиной недостоверной оценки качества бетона.

Цель. Численный расчет термонапряженного состояния испытываемых образцов-кубов выполнен с целью выявления особенностей различных способов оттаивания бетонных образцов после замораживания и уточнения разработанных переходных коэффициентов для назначения марки бетона по морозостойкости.

Материалы и методы. Выполнен численный расчет процесса замораживания и оттаивания бетонных образцов в процессе испытания на морозостойкость ускоренным третьим методом по ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) в программном комплексе

ATENA. По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады температуры между ядром и поверхностью кубов и определены максимальные растягивающие напряжения на их поверхности в момент наибольших перепадов температуры.

Результаты. Численный расчет термонапряженного состояния испытываемых образцов в процессе замораживания и различных режимов оттаивания при определении морозостойкости бетона ускоренным третьим методом подтвердил результаты экспериментальных лабораторных работ и показал, что режим оттаивания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор качественно отличается от остальных рассмотренных способов оттаивания и является наиболее «жестким» вследствие возможности образования поверхностных трещин на бетонной поверхности образцов в процессе испытания.

Выводы. Опыт применения численных расчетов термонапряженного состояния испытываемых образцов показал возможность (по мере накопления экспериментальных данных) использовать их для прогнозирования морозостойкости бетона.

Ключевые слова: морозостойкость, способ оттаивания, термонапряженное состояние, численный расчет, переходный коэффициент, температурный режим испытания, растягивающие напряжения, критическое значение

Для цитирования: Бучкин А.В., Чехний Г.В., Розенталь Н.К., Орехов С.А., Иванов С.И., Пастухов А.И. Опыт применения численных расчетов термонапряженного состояния бетона в процессе замораживания и оттаивания образцов по ГОСТ 10060-2012 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 40–51. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51). EDN: MDMMNA

Вклад авторов

Бучкин А.В. – общее руководство, написание статьи.
Чехний Г.В. – постановка работы, написание статьи.
Розенталь Н.К. – написание статьи.
Орехов С.А. – испытания бетона.
Иванов С.И. – разработка программы выполнения расчетов.
Пастухов А.И. – выполнение расчетов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.2025

Поступила после рецензирования 28.04.2025

Принята к публикации 01.05.2025

**A.V. BUCHKIN¹, G.V. CHEKHNI^{1,✉}, N.K. ROZENTAL², S.A. OREKHOV¹,
S.I. IVANOV¹, A.I. PASTUKHOV¹**

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

EXPERIENCE OF USING NUMERICAL CALCULATIONS OF THERMALLY STRESSED STATE OF CONCRETE DURING FREEZING AND THAWING OF SAMPLES AS PER STATE STANDARD 10060–2012

Abstract

Introduction. Based on the experimental studies of the frost resistance of concrete according to the accelerated third method of State Standard 10060-2012 (with Change No. 1) with various methods of samples thawing, the coefficients of transition (K) from the grade of concrete frost resistance determined during thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride or when blowing sample containers with warm air, to the grade of concrete determined by the standard method of thawing samples in a bath with a solution of 5 % sodium chloride. The calculation method of the thermally stressed state of concrete has shown that a change in the methodology for concrete testing for the

frost resistance, including the method of thawing samples after freezing, can lead to an unreliable assessment of the quality of concrete.

Aim. The numerical calculation of the thermally stressed state of the tested cube samples was performed in order to identify the features of various methods of concrete samples thawing after freezing and to refine the developed transition coefficients for assigning a grade of concrete for frost resistance.

Materials and methods. A numerical calculation of the process of concrete samples freezing and thawing during the frost resistance test using the accelerated third method according to State Standard 10060-2012 (with Change No. 1) in the ATENA software package has

been performed. Based on the results of calculating the theoretical temperature values, the temperature differences between the core and the surface of the cubes were determined and the maximum tensile stresses on their surface were determined at the time of the greatest temperature differences.

Results. Numerical calculation of the thermally stressed state of the tested samples during freezing and various thawing modes when determining the frost resistance of concrete using the accelerated third method confirmed the results of experimental laboratory work and showed that the thawing mode when sample containers are not fully immersed in the solution differs qualitatively from the other thawing methods considered and is the most "rigid" due to the possibility of formation of surface cracks on the concrete surface of the samples during the testing process.

Conclusions. The experience of applying of the numerical calculations of the thermally stressed state of the tested samples has shown that, as experimental data accumulate, they can be used to predict the frost resistance of concrete.

Keywords: frost resistance, thawing method, thermally stressed state, numerical calculation, transition coefficient, test temperature mode, tensile stresses, critical value

For citation: Buchkin A.V., Chekhni G.V., Rozental N.K., Orekhov S.A., Ivanov S.I., Pastukhov A.I. Experience of using numerical calculations of thermally stressed state of concrete during freezing and thawing of samples as per State Standard 10060-2012. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 40–51. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51). EDN: MDMMNA

Authors contribution statement

Buchkin A.V. – general guidance, writing an article.

Chekhni G.V. – setting up the work, writing the article.

Rozental N.K. – writing an article.

Orekhov S.A. – concrete testing.

Ivanov S.I. – development of a program for performing calculations.

Pastukhov A.I. – calculations performing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.03.2025

Revised 28.04.2025

Accepted 01.05.2025

Изучению морозостойкости бетонов посвящено значительное количество работ, так как этот вид физической коррозии является доминирующим в строительной практике.

Многочисленными работами были установлены основные факторы, от которых зависит морозостойкость бетонов. К ним следует отнести структуру материала, количество пор и характер пористости, степень водонасыщения, температуру замораживания, скорость замораживания и оттаивания и др. Следствием является разработка многочисленных методов испытаний бетона на морозостойкость.

Применение косвенных методов оценки морозостойкости не позволяет надежно определить марку бетона по морозостойкости. Методы многократного замораживания и оттаивания, наиболее надежные в своей основе, позволяют только приближенно оценить морозостойкость бетона в различных условиях эксплуатации конструкций [1]. Поэтому для повышения надежности результатов стандартные методы требуют более детальной регламентации процесса испытаний.

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена работа по оценке влияния различных способов оттаивания образцов на марку бетона по морозостойкости по режиму ускоренного третьего метода по ГОСТ 10060-2012 [2]. При этом режим замораживания образцов, выдерживания при температуре минус 50 °С и оттаивания до температуры минус 10 °С был одинаков. Различные способы оттаивания образцов после достижения в бетоне температуры минус 10 °С – воздушное оттаивание в условиях обдува емкостей с испытуемыми образцами теплым воздухом и оттаивание при неполном погружении емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия (далее – раствор) – рассматривали в качестве альтернативных методов оттаивания в сравнении со стандартным методом согласно требованиям обязательного приложения Б «Определение коэффициентов перехода при испытании образцов бетона на морозостойкость различными методами».

Исследования морозостойкости бетона выполнены на двух группах бетона, различающихся по классу прочности от В25 до В45 и маркам по морозостойкости от F₁200–F₁300 до F₁400–F₁500. В каждую группу входило по 6 серий бетонов. В основу выбора составов бетона положены полученные ранее результаты исследований морозостойкости тяжелых бетонов. Образцы всех серий твердели в одинаковых условиях. Разброс значений плотности отдельных образцов в серии до их насыщения не превышал ±25 кг/м³ от среднего значения согласно [2, п. 4.10].

За критерий оценки степени повреждения бетона в результате циклического замораживания и оттаивания принято снижение прочности бетона основных образцов, равное 5 %, по сравнению с прочностью контрольных образцов, не подвергавшихся замораживанию.

Достоверность результатов обеспечивалась достаточной повторяемостью испытаний (12 составов бетона с различной прочностью и структурой) и метрологической аттестацией средств измерений и испытательного оборудования.

Исследования показали, что способ оттаивания образцов при неполном погружении в раствор является наиболее «жестким» по сравнению со стандартным способом оттаивания в ванне при полном погружении емкостей с образцами в раствор.

В ходе эксперимента потеря массы образцов всех серий не достигла критического значения стандарта (не более 2 %).

На основании экспериментальных данных рассчитаны переходные коэффициенты к стандартному способу:

Для бетонов с марками по морозостойкости F₁200–F₁300:

$K = 0,7$ (неполное погружение);

$K = 0,8$ (в условиях обдува теплым воздухом).

Для бетонов с марками по морозостойкости F₁400–F₁500:

$K = 0,6$ (неполное погружение);

$K = 0,9$ (в условиях обдува теплым воздухом).

Исследования показали нецелесообразность введения единых переходных коэффициентов для изученных способов оттаивания в автоматических климатических камерах. Для каждой марки бетона по морозостойкости и для альтернативного метода оттаивания должен быть рассчитан свой переходный коэффициент, что и допускается согласно [2, п. 4.1].

С целью выявления особенностей различных способов оттаивания бетонных образцов после замораживания и уточнения разработанных переходных коэффициентов при назначении марки бетона по морозостойкости выполнен численный расчет термонапряженного состояния (ТНС) испытуемых образцов-кубов размерами 100 × 100 × 100 мм.

Численный расчет процесса замораживания – оттаивания производился в программном комплексе ATENA [3], позволяющем моделировать поведение бетонных изделий, включая разрушение, растягивание и растрескивание в уникальной графической среде. Использованный программный комплекс не предназначен для моделирования гидродинамических условий вокруг бетона, поэтому моделирование жидкости с помощью твердого тела имеет некоторую погрешность, при этом позволяет качественно оценить разницу между различными исследуемыми условиями оттаивания бетона. Пространственная модель повторяла геометрию образцов-кубов, характеристики материалов и температурно-влажностные условия эксперимента. Расчет образования и ширины раскрытия трещин выполняется как для бетонного неармированного элемента.

На первом этапе рассчитывали температуру в ядре и на поверхности куба для заданного режима замораживания – оттаивания. На втором этапе рассчитывали растягивающие напряжения на поверхности куба при различных режимах оттаивания.

Расчетные модели включали в себя конечные элементы, моделирующие бетон контрольных образцов, и конечные элементы, моделирующие раствор, окружающий образец, уровень которого устанавливался в зависимости от испытания. Через конечные элементы, моделирующие раствор, происходит отведение тепла от бетона испытываемого образца.

Для материала, моделирующего бетон, задавались все основные физические характеристики, необходимые для расчета ТНС: плотность, теплоемкость, теплопроводность, модуль упругости, прочность бетона на растяжение и др. Значения теплопроводности и теплоемкости бетона приняты по СП 50.13330.2012 [4].

Для раствора, моделирующего жидкую среду вокруг бетона, задавались основные физические характеристики, определяющие отвод от бетона тепла: плотность, теплоемкость и теплопроводность. Параметры раствора, значение теплопроводности и теплоемкости бетона приняты по справочным данным [5].

Воздушная среда, в которой происходило оттаивание, моделировалась коэффициентами теплоотдачи с поверхности бетона, контактирующей с воздушной средой [5].

Режим испытания бетона на морозостойкость уточнен с помощью комплекса измерительного многоканального TDS-530, позволяющего производить измерения температуры с использованием первич-

ных преобразователей – термометров сопротивления ТС-Б.

Термометры сопротивления (датчики) были установлены в бетонные образцы-кубы размерами $100 \times 100 \times 100$ мм (в центре, на верхней, нижней и боковых гранях), а также в емкости для замораживания с раствором (вблизи образцов-кубов), в центре морозильной камеры (в воздушной среде), а также в раствор в ванне для оттаивания образцов. Температуру по термометрам сопротивления и по воздуху климатической камеры фиксировали каждые 30 минут.

Результаты подбора режимов испытания в климатических камерах тепла и холода приведены на рис. 1–3. Заштрихованная область на графиках указывает допустимые границы цикла замораживания и оттаивания по температуре датчика в растворе по ГОСТ 10060-2012 [2].

Граничные условия рассчитывали по формуле 13 [5] с учетом циркуляции раствора в ванне для оттаивания. Модель эксперимента включала точки мониторинга температуры, повторяющие положения датчиков температуры в натурном эксперименте (ядро, верхняя, нижняя и боковые грани). Был произведен расчет трех циклов замораживания и оттаивания, модели отличались тепловым воздействием в среде морозильной камеры, динамикой изменения характеристик бетона и раствора в процессе замораживания и оттаивания.

Граничные условия для принятых режимов оттаивания приведены в табл. 1.

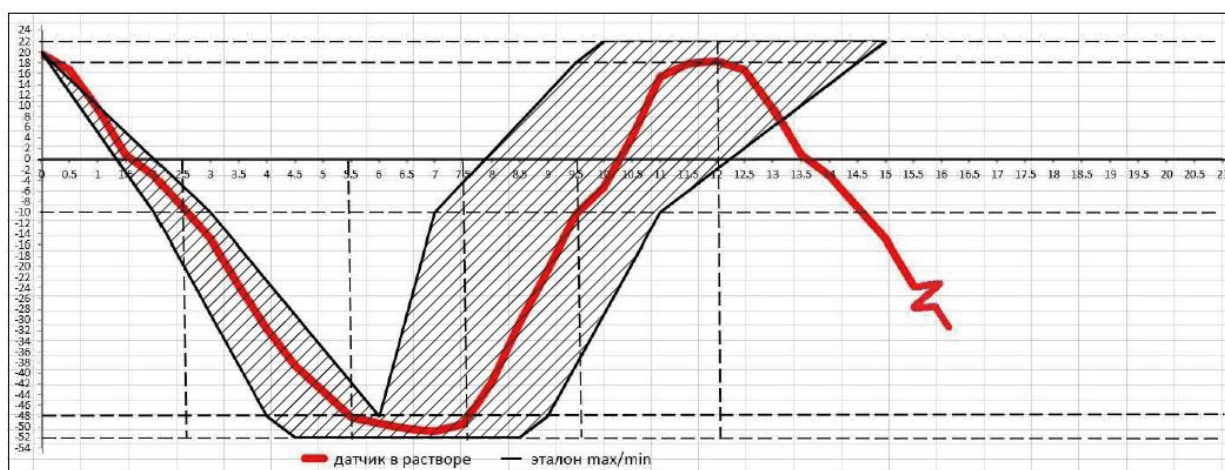


Рис. 1. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях полного погружения емкостей с образцами в ванну для оттаивания с раствором 5%-ного хлорида натрия

Fig. 1. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing under conditions of complete immersion of sample containers in a thawing bath with a solution of 5 % sodium chloride

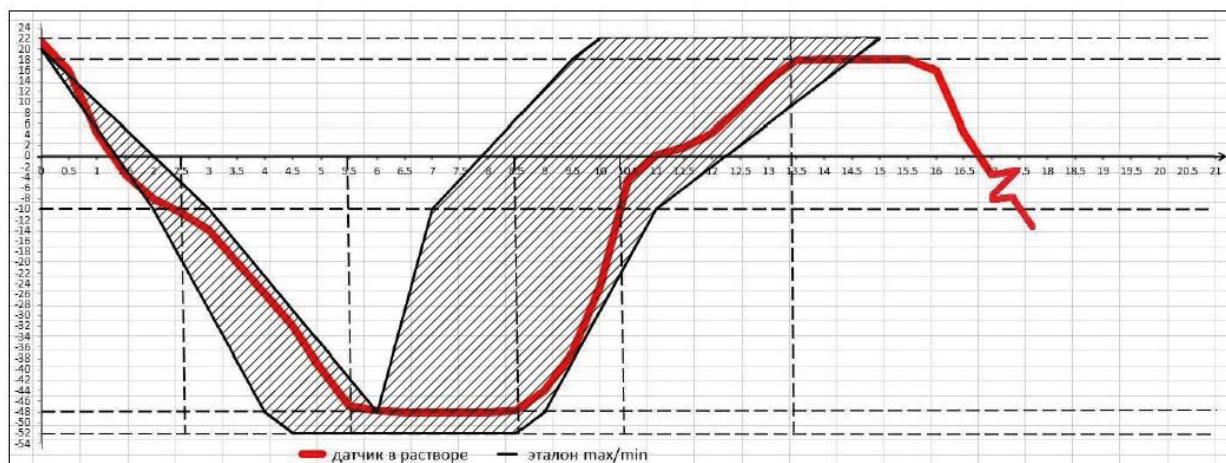


Рис. 2. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия

Fig. 2. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride

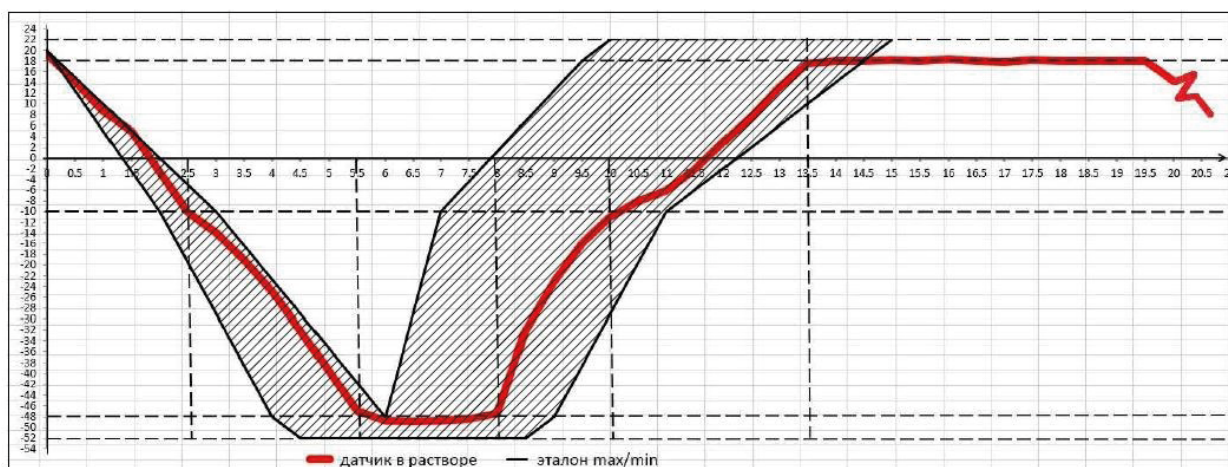


Рис. 3. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание емкостей с образцами в условиях обдува теплым воздухом в автоматической климатической камере

Fig. 3. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing of sample containers under conditions of warm air blowing in an automatic climate chamber

Таблица 1
Table 1

Граничные условия для принятых режимов оттаивания
Boundary conditions for accepted thawing modes

№ п/п	Описание	Коэффициент теплоотдачи, α , Вт/м ² °С
1	Теплоотдача образца в процессе замораживания	20–25
2	Теплоотдача образца при оттаивании в растворе 5%-ного хлорида натрия для неполного и полного погружений емкости с образцом	23,5
3	Теплоотдача образца в результате обдува теплым воздухом	15

По результатам расчета получены теоретические графики температуры для каждого метода замораживания – оттаивания в четырех точках мониторинга, шаг записи температурных значений – 2 минуты. Графики температуры приведены на рис. 4–6, значения температуры, полученные посредством численного расчета, показаны пунктирной линией, значения температуры, полученные по результатам натурного эксперимента, показаны сплошной линией.

Сравнение перепадов температуры между ядром кубов и поверхностью (нижней, верхней, боковой), полученных посредством численного расчета для различных режимов замораживания – оттаивания, приведено на рис. 7.

По данным, представленным на рис. 4–6, следует, что полученные по результатам расчета распределения температуры на поверхности и в глубине бетонных образцов-кубов достаточно близки к результатам измерений температуры в реальных образцах (рис. 1–3). На большинстве участков отличие не превышает 3–5 °С, хотя и достигает 10 °С в отдельных точках на отдельных этапах. При этом полученная по результатам расчетов наибольшая температурная нагрузка возникает при режиме «неполное погружение».

По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады темпера-

туры между ядром и поверхностью образцов-кубов (рис. 7), а также определены максимальные напряжения в них.

Результаты расчетов напряжений на поверхности и в ядре сечений кубов в момент наибольших перепадов температуры для рассмотренных режимов приведены на рис. 8. На рисунке желтым и красным цветами выделены области растягивающих напряжений, зеленым и синим цветами – области сжимающих напряжений. Визуализация результатов расчетов программой выполняется в виде изополей изменения напряжений от максимального до минимального значений, поэтому для каждого из рассмотренных режимов характер изополей практически одинаковый, изменяются значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений. Поэтому на рис. 8 один раз приведен характер изополей и приведены диапазоны изменения напряжений для каждого из режимов.

По данным, представленным на рис. 8б, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 1,07 МПа. Полученное значение практически совпало с расчетной прочностью бетона на растяжение $R_{bt} = 1,05$ МПа, отличие составляет менее 2 %. Трещины на поверхности бетона не образуются.

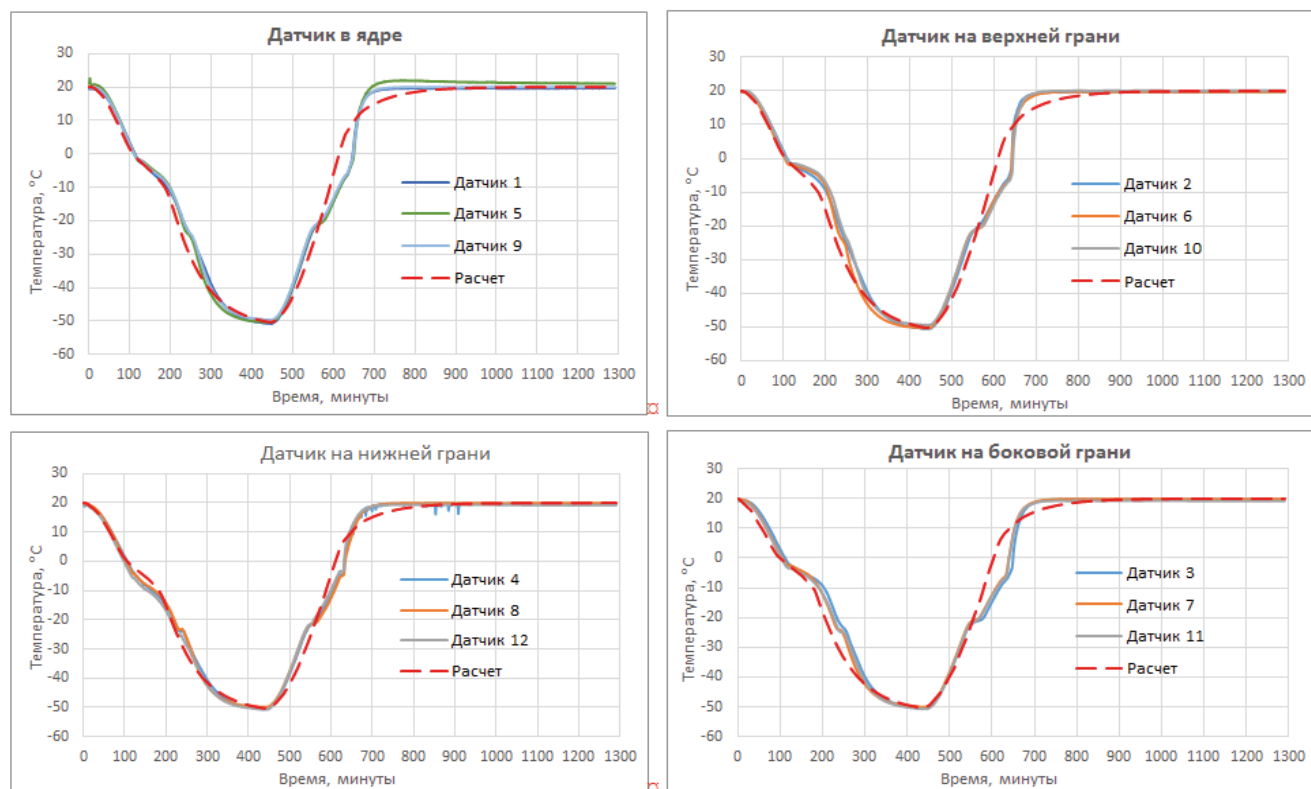


Рис. 4. Температурные графики эксперимента «полное погружение»
Fig. 4. Temperature graphs of the "full immersion" experiment

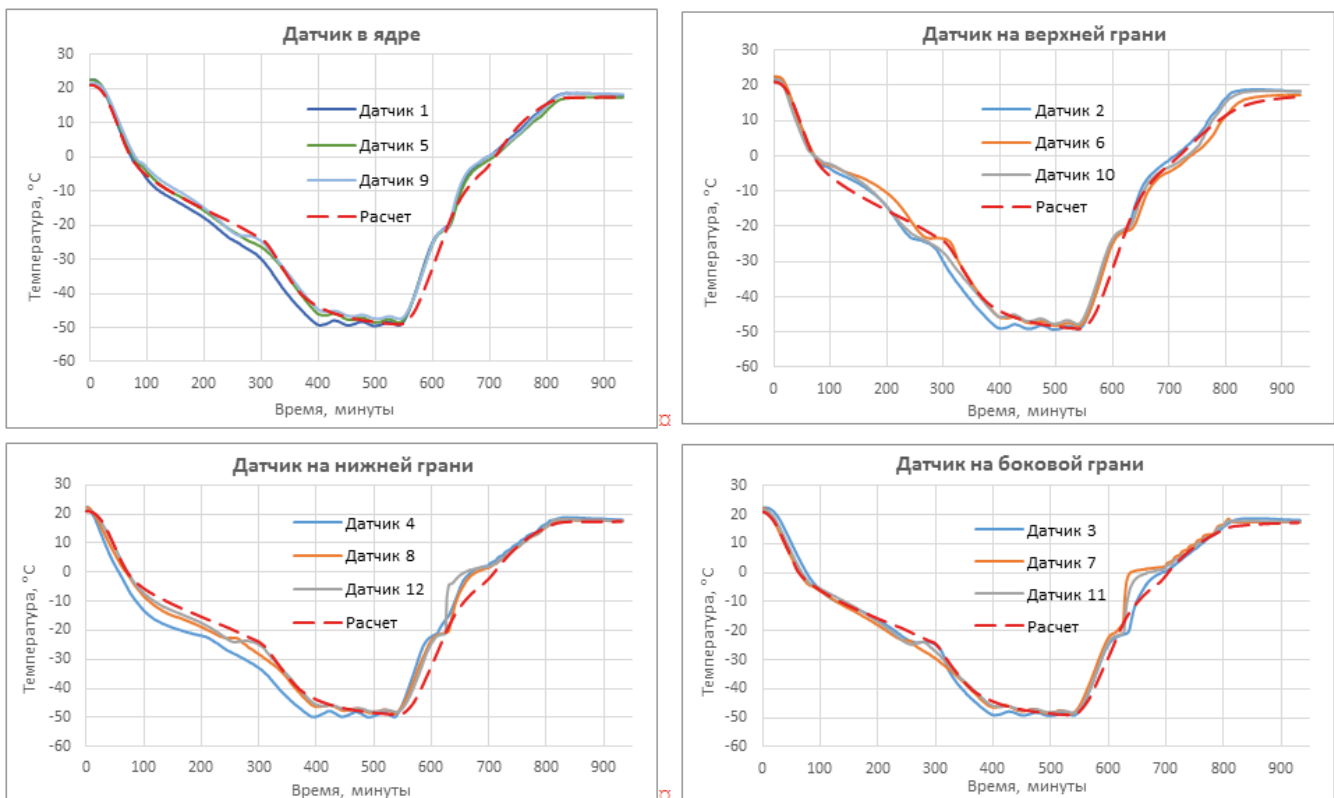


Рис. 5. Температурные графики эксперимента «неполное погружение (раствор)»
Fig. 5. Temperature graphs of the "incomplete immersion (solution)" experiment

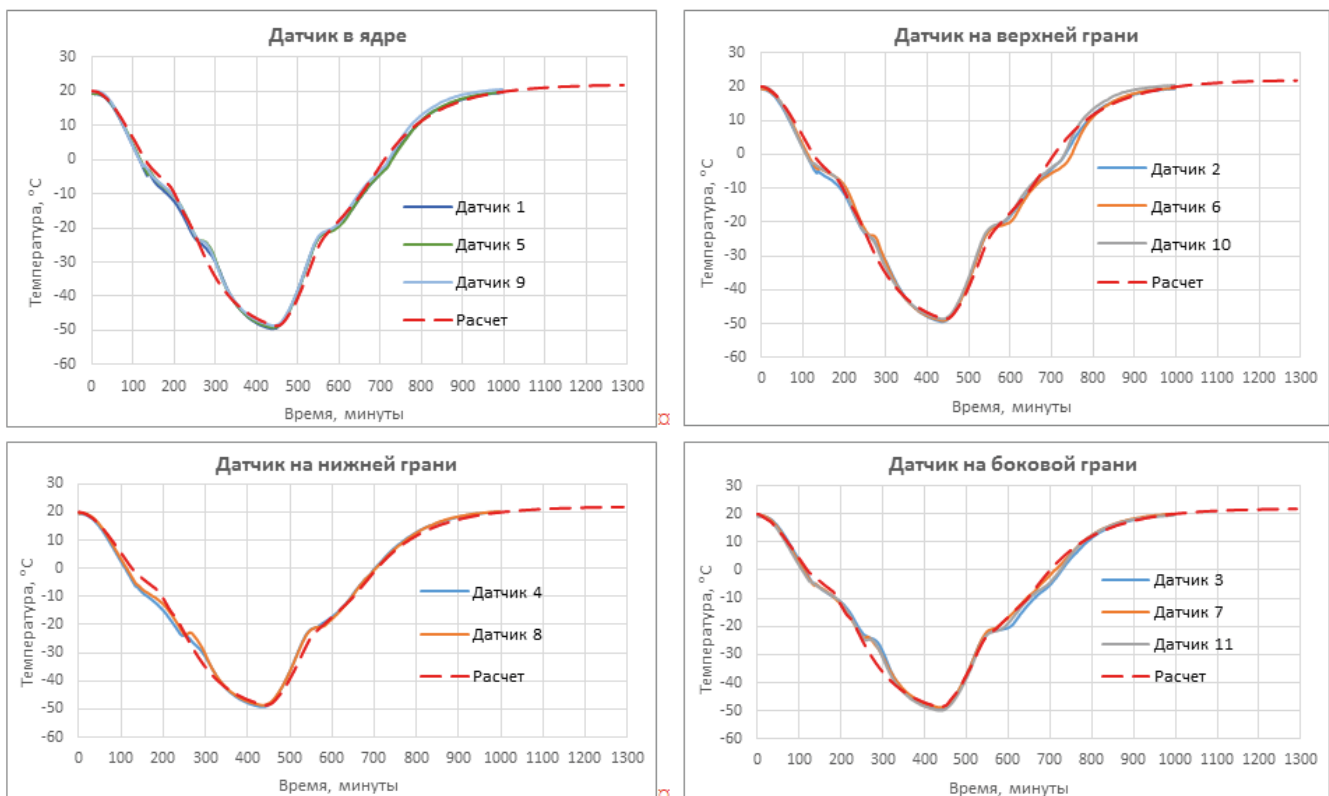


Рис. 6. Температурные графики эксперимента «воздушное оттаивание»
Fig. 6. Temperature graphs of the "air thawing" experiment

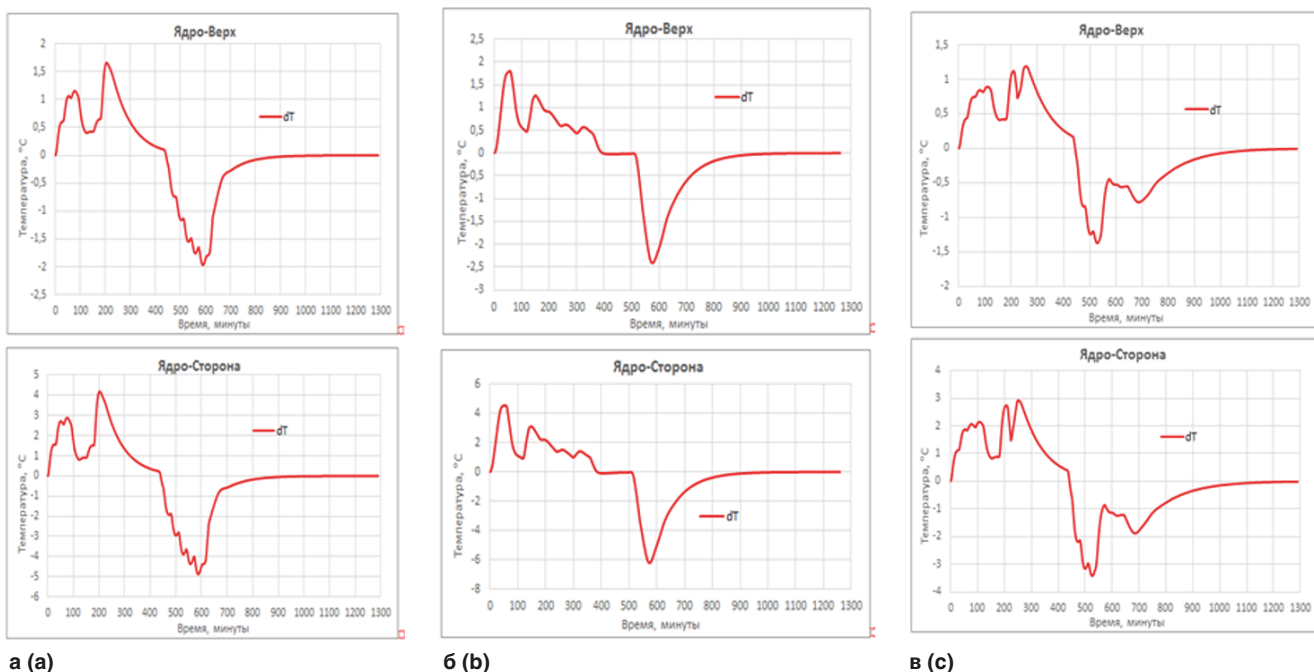


Рис. 7. Разница температурных полей эксперимента «полное погружение» (а), «неполное погружение» (б) и «воздушное оттаивание» (в)

Fig. 7. The difference in the temperature fields of the experiment "full immersion" (a), "incomplete immersion" (b) and "air thawing" (c)

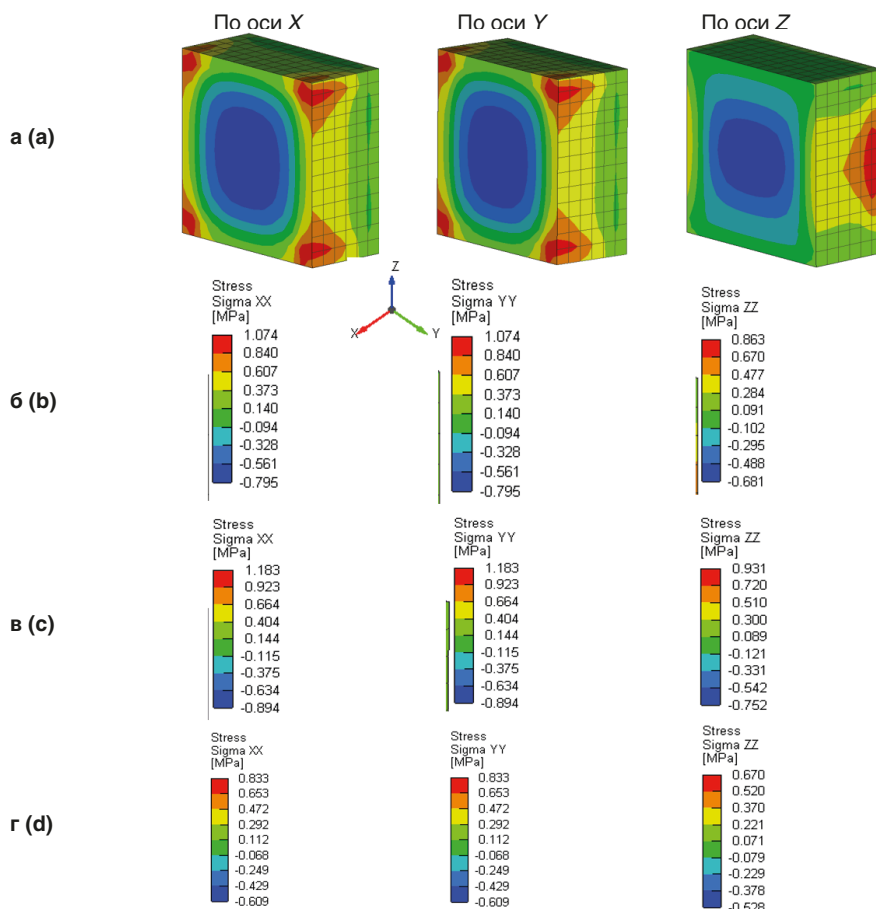


Рис. 8. Характер изменения изополей (а) и значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений эксперимента для режимов «полное погружение» (б), «неполное погружение» (в) и «воздушное оттаивание» (г)

Fig. 8. The nature of the change in the isofields (a) and the values of the maximum tensile and compressive stresses of the experiment for the modes "full immersion" (b), "incomplete immersion" (c) and "air thawing" (d)

По данным, представленным на рис. 8в, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 1,18 МПа. Полученное значение превышает расчетную прочность бетона на растяжение для бетона класса В25, согласно СП 63.13330.2018 [6], $R_{bt} = 1,05$ МПа. На поверхности бетона, вдоль вертикальных граней возможно образование трещин вследствие растяжения бетона.

По данным, представленным на рис. 8г, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 0,83 МПа. Полученное значение ниже расчетной прочности бетона на растяжение для бетона класса В25, согласно СП 63.13330.2018 [6], $R_{bt} = 1,05$ МПа. Трещины на поверхности бетона не образуются.

Установлено, что при большинстве режимов замораживания и оттаивания трещины не образуются, исключение составляет режим с неполным погружением емкостей с образцами в раствор при оттаивании, при котором на стадии замораживания и оттаивания возможно появление волосяных трещин (рис. 9).

Полученные по результатам расчета значения ниже предельно допустимых характеризуют качественное отличие растягивающих напряжений на поверхности образцов для режима «неполное погружение» от остальных режимов замораживания и оттаивания.

Сравнение скорости подъема температуры в момент оттаивания, растягивающих напряжений, образующихся в бетоне во время эксперимента, наличие трещин на поверхности и время полного цикла замораживания и оттаивания приведены в сводной табл. 2.

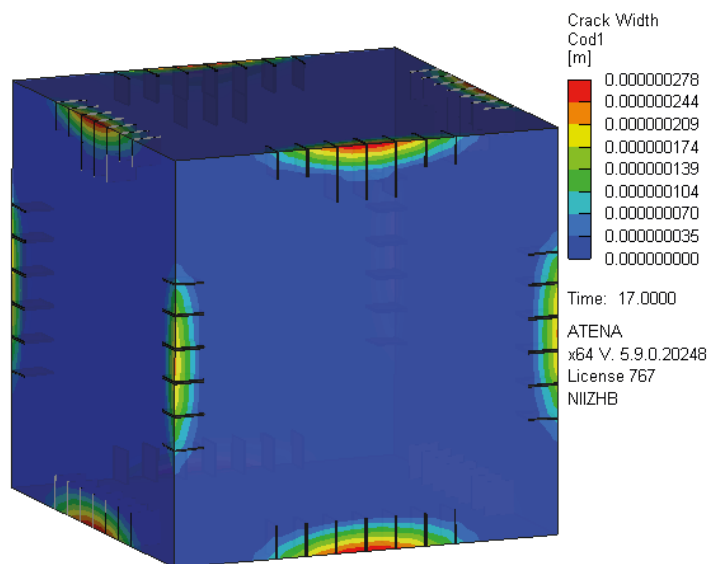


Рис. 9. Зоны трещинообразования для режима «неполное погружение (раствор)»
Fig. 9. Crack formation zones for the "incomplete immersion (solution)" mode

Таблица 2
Table 2

Сводная таблица по расчетному анализу
Summary table for computational analysis

Режим оттаивания	Скорость оттаивания, °С/час	Перепад температуры «ядро – поверхность», °С	Растягивающие напряжения, МПа	Наличие трещин на поверхности бетона контрольного образца	Длительность цикла, ч
Воздушное оттаивание	14	3,0	0,833	Трещины не образуются	14,5
Неполное погружение (раствор)	25	4,5	1,183	Возможно образование трещин	14,5
Полное погружение (раствор)	19	4,2	1,074	Трещины не образуются	13,0

Выводы

1. Выполнен численный расчет процесса замораживания и оттаивания бетонных образцов в процессе испытания на морозостойкость ускоренным третьим методом по ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) [2] в программном комплексе ATENA. Пространственная модель повторяла геометрию образцов-кубов, характеристики материалов и температурно-влажностные условия эксперимента.

2. Натурный эксперимент выполнен по трем оптимизированным и отрегулированным режимам согласно ГОСТ 10060-2012 [2]. По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады температуры между ядром и поверхностью кубов, а также определены максимальные растягивающие напряжения на их поверхности в момент наибольших перепадов температуры.

3. Установлено, что оттаивание при неполном погружении образцов в раствор может вызывать качественное отличие состояния поверхности образцов бетона от остальных рассмотренных способов оттаивания – при воздушном оттаивании или при оттаивании после замораживания в специальной ванне в условиях полного погружения образцов – вследствие наличия наибольших из всех рассмотренных режимов растягивающих напряжений и возможности образования поверхностных температурных трещин на гранях кубов в процессе замораживания.

4. Численный расчет ТНС испытываемых образцов в процессе замораживания и различных режимов оттаивания при определении морозостойкости бетона ускоренным третьим методом подтвердил результаты экспериментальных лабораторных работ и показал, что режим оттаивания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор качественно отличается от остальных рассмотренных способов оттаивания и является наиболее «жестким» вследствие возможности образования поверхностных трещин на бетонной поверхности образцов в процессе испытания.

5. Изменение методики проведения испытаний бетона на морозостойкость, включая способы оттаивания после замораживания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор или при обдуве емкостей с образцами теплым воздухом, может стать причиной недостоверной оценки качества бетона, что в реальных условиях приведет к снижению безопасности объектов строительства.

Заключение

В работе применены численные расчеты ТНС испытываемых образцов-кубов для объяснения результатов экспериментальных работ по морозостойкости бетона.

Так как процесс морозного разрушения бетона заключается в постепенном образовании микротрещин, их накоплении и объединении, в дальнейшем, по мере накопления экспериментальных данных, воз-

можно применение численных расчетов ТНС бетона в процессе замораживания для прогнозирования морозостойкости бетона.

Развитие применения численных расчетов позволит на стадии подбора состава бетона оценить влияние изменения характеристик бетонной смеси (плотности, прочности, соотношения прочности на сжатие и прочности на растяжение и др.) и выполнить качественную оценку изменения морозостойкости бетона в зависимости от состава, в том числе бетонов особо низкой проницаемости и повышенной морозостойкости/морозосолеустойкости.

Список литературы

- 1 Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Анализ методов определения морозостойкости бетона // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023. № 3 (38). С. 128–142. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142). EDN: VDKWWY.
- 2 ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2014.
- 3 Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3-2 Example Manual. Prague, 2021.
- 4 СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Москва, 2012.
- 5 Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. РААСН, НИИЖБ. Москва, 2005.
- 6 СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва, 2018.

References

1. Rozental N.K., Chekhni G.V. Analysis of test methods for frost resistance of concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023, no. 3 (38), pp. 128–142. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142). EDN: VDKWWY.
2. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance (with Change No. 1). Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3-2 Example Manual. Prague, 2021.
4. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. Moscow, 2012. (In Russian).
5. Guidelines for concrete heating in cast-in-situ structures. RAACS, NIIZHB. Moscow, 2005. (In Russian).
6. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow, 2018. (In Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Андрей Викторович Бучкин, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: andibuch@inbox.ru

тел.: +7 (499) 174-76-81

Andrey V. Buchkin, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: andibuch@inbox.ru

tel.: +7 (499) 174-76-81

Галина Васильевна Чехний✉, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

Galina V. Chekhniy✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chehniy@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-97

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: rosental08@mail.ru

Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: rosental08@mail.ru

Сергей Александрович Орехов, научный сотрудник, сектор коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: sirius_m16@mail.ru

Sergey A. Orekhov, Researcher, Concrete Corrosion Section, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: sirius_m16@mail.ru

Сергей Ильич Иванов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey I. Ivanov, Cand. Sci. (Engineering), Head, Laboratory of Prestressed Concretes and Self-Stressed Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Александр Игоревич Пастухов, инженер лаборатории напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander I. Pastukhov, Engineer, Laboratory of Prestressed Concretes and Self-Stressed Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 391.327.32

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68)

**С.С. КАПРИЕЛОВ^{1,2}, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД^{1,2,✉}, Н.И. КАРПЕНКО³,
Н.М. СЕЛЮТИН^{1,4}, Г.А. МОИСЕЕНКО³, И.М. БЕЗГОДОВ²**

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³ ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), Локомотивный проезд, д. 21, г. Москва, 127238, Российская Федерация

⁴ ООО «Предприятие Мастер Бетон», ул. Саратовская, д. 31, г. Москва, 109518, Российская Федерация

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА ИСКУССТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследований высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на портландцементном вяжущем с органоминеральным модификатором типа МБ и тремя различными видами легких заполнителей (песка и гравия/щебня), которые могут быть использованы для расчета и проектирования облегченных железобетонных конструкций зданий и сооружений, а также для внесения изменений и расширения границы параметрического ряда легких бетонов с В40 до В70 в СП 63.13330.2018.

Цель. Оценка влияния технологических факторов на прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

Материалы и методы. Для приготовления высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов использовали материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5; органоминеральный модификатор МБ10-50С; микрозаполнитель – молотый известняк; природный

кварцевый песок; легкие пористые заполнители – искусственный керамзитовый песок и гравий и природный туфовый песок и щебень двух месторождений. Испытания бетонных смесей и бетонов выполнены с использованием стандартизированных и специальных методик.

Результаты. Определены прочностные (кубиковая и призмочная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики и построены диаграммы напряженного состояния ($\sigma - \epsilon$) шести высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов по прочности на сжатие от В41 до В73 с маркой по средней плотности от D1600 до D2000. Выполнена оценка влияния расхода цемента, вида легких пористых заполнителей (песка и гравия/щебня) и замены легкого керамзитового песка на природный песок из плотных горных пород на физико-технические характеристики легкого бетона.

Выводы. Использование различных видов легких пористых заполнителей искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) происхождения, а также мелкого заполнителя из плотных горных пород (природного кварцевого песка), совместно с портландцементным вяжущим с добавкой органоминерального модификатора типа МБ, позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 с прочностными и деформационными характеристиками, значительно превосходящими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, самоуплотняющийся легкий бетон, керамзитовый заполнитель, туфовый заполнитель, прочность на сжатие, модуль упругости, диаграмма деформирования, предельные относительные деформации сжатия

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодов И.М. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 52–68. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68). EDN: SWWFTR

Вклад авторов

Каприелов С.С. – научное руководство исследованиями и анализ полученных результатов.

Шейнфельд А.В. – руководство экспериментом и анализ полученных результатов.

Карпенко Н.И. – научное руководство исследований диаграмм деформирования цементных систем.

Селютин Н.М. – выполнение экспериментальных работ и анализ полученных результатов.

Моисеенко Г.А. – анализ диаграмм деформирования цементных систем.

Безгодов И.М. – выполнение экспериментальных работ и анализ диаграмм деформирования цементных систем.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.03.2025

Поступила после рецензирования 01.05.2025

Принята к публикации 08.05.2025

**S.S. KAPRIELOV^{1,2}, A.V. SHEYNFELD^{1,2,✉}, N.I. KARPENKO³,
N.M. SELYUTIN^{1,4}, G.A. MOISEENKO³, I.M. BEZGODOV²**

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

³ Federal State Budgetary Institution "Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences" (FSBI SRICP RAACS), Locomotive Passage, 21, Moscow, 127238, Russian Federation

⁴ LLC "Master Concrete Enterprise", Saratovskaya str., 31, Moscow, 109518, Russian Federation

STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING LIGHTWEIGHT CONCRETES ON ARTIFICIAL AND NATURAL POROUS AGGREGATES

Abstract

Introduction. The results of studies of high-strength self-compacting lightweight concretes based on a Portland cement with an organo-mineral modifier of the MB type and three different types of lightweight aggregates (sand and gravel/crushed stone) are presented. The results can be used to calculate and design lightweight reinforced concrete structures of buildings, as well as to make changes and expand the boundaries of the parametric range of lightweight concrete from B40 to B70 in set of rules SP 63.13330.2018.

Aim. Assessment of the influence of technological factors on the strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting lightweight concrete of classes B40–B70, grades of medium density D1600–D2000 from self-compacting mixtures.

Materials and methods. For the preparation of high-strength self-compacting lightweight concretes, materials were used: Portland cement CEM I 42,5; organo-mineral modifier MB10–50C; micro filler – ground limestone; natural quartz sand; light porous aggregates – artificial expanded clay sand and gravel and natural tuff sand and crushed stone from two fields. The tests of concrete mixtures and concretes were carried out using standardized and special techniques.

Results. The strength (cubic and prismatic compressive strength) and deformation (modulus of elasticity, Poisson's ratio and maximum relative compression deformations) characteristics are determined and stress diagrams ($\sigma - \epsilon$) of six high-strength self-compacting lightweight concretes of compressive strength classes from B41 to B73 with an average density grade from D1600 to D2000 are constructed. The influence of cement consumption, the type of light porous aggregates (sand and gravel/crushed stone) and the replacement of light expanded clay sand with natural sand from dense rocks on the physical and technical characteristics of lightweight concrete has been assessed.

Conclusions. The use of various types of light porous aggregates of artificial (expanded clay sand and gravel) and natural (tuff sand and crushed stone) origin, as well as fine aggregate from dense rocks (natural quartz sand), together with a Portland cement binder with the addition of an organo-mineral modifier of the MB type, makes it possible to obtain high-strength self-compacting lightweight concretes of classes B40–B70, grades of medium density D1600–D2000 with strength and deformation characteristics, significantly exceeding the maximum normative values for lightweight concrete of class B40 grade with an average density of D2000 according in set of rules to SP 63.13330.2018.

Keywords: high-strength lightweight concrete, self-compacting lightweight concrete, expanded clay aggregate, tuff aggregate, compressive strength, modulus of elasticity, deformation diagram, limiting relative compression deformations

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. Strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting lightweight concretes on artificial and natural porous aggregates. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 52–68. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68). EDN: SWWFTR

Authors contribution statement

Kaprielov S.S. – scientific guidance for research and analysis of the obtained results.

Sheynfeld A.V. – experiment and analyse of the obtained results.

Karpenko N.I. – scientific guidance for the study of deformation diagrams of cement systems.

Selyutin N.M. – experimental work and analyse of the results obtained.

Moiseenko G.A. – deformation diagrams of cement systems.

Bezgodov I.M. – experimental work and analyse of the diagrams of deformation of cement systems.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.03.2025

Revised 01.05.2025

Accepted 08.05.2025

Введение

Достижения последних лет в области технологии бетона связаны со строительством уникальных зданий и сооружений, большинство из которых можно справедливо назвать объектами «экстремальной инженерии» уже потому, что при возведении их конструкций использовались материалы и технологии, параметры которых превышали нормируемые характеристики, предусмотренные действовавшими стандартами и сводами правил. Так, в связи со строительством высотных зданий, большепролетных мостов и протяженных тоннелей в РФ появились новые модифицированные высокопрочные тяжелые и мелкозернистые бетоны классов на сжатие B60–B100 высокой коррозионной стойкости, в том числе из самоуплотняющихся смесей [1–4].

Новым вызовом материаловедению стало снижение собственного веса в нагрузках и воздействиях на здания и сооружения, решение которого возможно при условии использования высокопрочных и легких материалов, позволяющих снизить объем и массу несущих конструкций, а следовательно, повысить эффективность строительства.

Решением данной задачи является использование высокопрочных (согласно ГОСТ 25192-2012 [5]) конструкционных легких бетонов классов B40–B70 с маркой по средней плотности D1600–D2000, которые, сохраняя все преимущества железобетона, позволят возводить облегченные несущие конструкции высотных зданий, большепролетных транспортных и других сооружений.

Известен большой зарубежный опыт использования высокопрочных конструкционных легких бетонов для строительства зданий, мостовых сооружений и дорожного покрытия в Японии, США, Финляндии, Германии, Норвегии и других странах [6–9].

В РФ проводились как теоретические, так и экспериментальные работы, затрагивающие как получение высокопрочных конструкционных легких бетонов классов B40–B60 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей, так и определение их прочностных и деформационных характеристик [10–13]. Работы велись также в рамках научно-технического сопровождения строительства 25-этажного здания Gazoil Plaza высотой 96 м с несущими конструкциями стен, колонн и перекрытий из конструкционного легкого бетона марки по плотности D1800 и фактическими значениями классов по прочности на сжатие $B_{\phi}45$ – $B_{\phi}50$ [14].

Обстоятельством, препятствующим внедрению высокопрочного легкого бетона в практику строительства, является отсутствие в СП 63.13330.2018 [15] нормативных характеристик для расчета и проектирования конструкций, так как в нем классификационный ряд легких бетонов ограничен классом B40, что не соответствует возможностям современной технологии и требует дополнения и расширения нормативной базы, для чего необходимо научно обосновать норма-

тивные характеристики новых легких бетонов. Также отсутствует достоверная информация о диаграмме напряженного состояния ($\sigma - \epsilon$) легких бетонов классов выше B40, приготовленных на заполнителях искусственного и природного происхождения, что является препятствием для расчета и проектирования конструкций с использованием наиболее точного диаграммного метода расчета.

Целью работы являлась оценка влияния технологических факторов на прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов B40–B70 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи исследований высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов:

- оценка влияния расхода цемента на физико-технические характеристики легкого бетона с искусственным легким пористым заполнителем (керамзитовым гравием);
- оценка влияния вида мелкого заполнителя (кварцевого и керамзитового песков) на физико-технические характеристики легкого бетона с искусственным легким пористым крупным заполнителем (керамзитовым гравием);
- оценка влияния вида легкого пористого заполнителя искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) на физико-технические характеристики легкого бетона.

Материалы и методы

Для приготовления высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов в лабораторных условиях использовали материалы (портландцемент, органоминеральный модификатор, микрозаполнитель, кварцевый песок и легкие пористые заполнители), которые производятся промышленностью строительных материалов в РФ. В качестве легких пористых заполнителей использовались материалы различного происхождения – искусственный керамзитовый песок и гравий, а также природный туфовый песок и щебень.

Выбор производителя искусственного легкого пористого керамзитового заполнителя (ООО «Винзилский завод керамзитового гравия») осуществлен на основании анализа ранее полученных результатов сравнительных исследований средней плотности и прочности легких керамзитобетонов [11]. Основанием для выбора природных легких пористых туфовых заполнителей являлись объемы запасов и наличие разработанных месторождений на Северном Кавказе «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики, г. Нальчик (23 тыс. м³) [16] и на Дальнем Востоке «Святогорское» Хабаровского края (3 847 тыс. м³) [17].



Рис. 1. Фотографии легких пористых заполнителей
Fig. 1. Photos of light porous aggregates

Фотографии легких пористых заполнителей, используемых в исследованиях, представлены на рис. 1.

Характеристики используемых материалов:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 ЖИ с нормальной густотой 24,8 % производства завода «Пролетарий» АО «Новоросцемент», соответствующий требованиям ГОСТ Р 55224-2020 [18];

- органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45 %), золу-уноса (45 %) и суперпластификатор (10 %) [19] производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующий требованиям ГОСТ Р 56178-2014 [20];

- микронаполнитель – минеральный порошок неактивированный (молотый известняк) марки МП-1 фракции 0–1,25 мм производства ООО «ДСЗ Те-рекс Групп» (г. Калуга), соответствующий требованиям ГОСТ Р 52129-2003 [21] и ГОСТ Р 56592-2015 [22];

- песок кварцевый I класса с модулем крупности $M_{кр} = 2,42$ производства ГОК «Орешки», соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [23];

- керамзитовый песок фракции 0–5 мм и гравий фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, средней плотностью 1540 и 1460 кг/м³ соответственно, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия», соответствующие требованиям ГОСТ 32496-2013 [24];

- туфовый песок фракции 0–5 мм и щебень фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1100, марки по прочности П200, средней плотностью 2150 и 1900 кг/м³ соответственно, месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики, г. Нальчик, соответствующие требованиям ГОСТ 22263-76 [25];

- туфовый песок фракции 0–5 мм и щебень фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, средней плотностью 2400 и 1720 кг/м³ соответственно, месторождения «Святогорское» Хабаровского края, соответствующие требованиям ГОСТ 22263-76 [25];

- вода для затворения бетонных смесей, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 [26].

Составы и свойства смесей

В лабораторных условиях из вышеуказанных материалов были приготовлены шесть составов высокопрочных легких бетонов из самоуплотняющихся смесей с добавкой модификатора МБ10-50С А-II-2 в количестве 99–104 кг/м³ (14–16 % от массы цемента и микронаполнителя). Использование при производстве смесей микронаполнителя (молотого известняка) позволяет оценить влияние расхода цемента от 416 до 608 кг/м³ на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов. Различное водосодержание бетонных смесей (водяжущее отношение $B/(Ц+МБ)$ от 0,27 до 0,41), необходимое для получения подвижности по расплыву нормального конуса в диапазоне 60–70 см, обусловлено более высокой водопотребностью туфовых песков и молотого известняка, используемого в качестве микронаполнителя.

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей высокопрочных легких бетонов представлены в табл. 1.

Смеси приготавливались в смесителе принудительного действия объемом 0,025 м³ с перемешиванием в течение 5 мин. Результаты испытаний смесей

Таблица 1
Table 1

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей легких бетонов
Compositions and properties of self-compacting mixtures of lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Составы самоуплотняющихся смесей легких бетонов, кг/м ³					
		Ц	МП-1	МБ	П	КЗ	В
1	Керамзитовый песок и гравий	416	203	101	325 ¹	420 ¹	208
2	Керамзитовый песок и гравий	541	104	104	333 ¹	431 ¹	208
3	Керамзитовый песок и гравий	601	50	99	315 ¹	408 ¹	197
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	524	0	101	605 ²	595 ¹	167
5	Туфовый песок и щебень	605	49	99	402 ³	432 ²	288
6	Туфовый песок и щебень	608	50	100	489 ⁴	519 ³	229

Примечания: Ц – портландцемент; МП-1 – микронаполнитель; МБ – органоминеральный модификатор; П – песок: ¹керамзитовый, ²кварцевый, ³туфовый «Козлинка-2», ⁴туфовый «Святогорское»; КЗ – крупный заполнитель: ¹керамзитовый гравий, ²туфовый щебень «Козлинка-2», ³туфовый щебень «Святогорское»; В – вода.

Таблица 2
Table 2

Свойства самоуплотняющихся смесей легких бетонов
Properties of self-compacting mixtures of lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Свойства бетонных смесей			
		РК, см	ρ, кг/м ³	V _{лз} , м ³ /м ³	В/(Ц+МБ)
1	Керамзитовый песок и гравий	64	1673	0,498	0,40
2	Керамзитовый песок и гравий	62	1720	0,511	0,32
3	Керамзитовый песок и гравий	60	1670	0,483	0,28
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	65	1992	0,407	0,27
5	Туфовый песок и щебень	66	1875	0,414	0,41
6	Туфовый песок и щебень	64	1995	0,506	0,32

Примечания: РК – распыл нормального конуса; ρ – средняя плотность смеси; V_{лз} – объем легкого заполнителя в составе смеси; В/(Ц+МБ) – водовяжущее отношение.

показали (табл. 2), что их средняя плотность (ρ) зависит от объема и плотности заполнителя и изменяется в широком диапазоне – от 1673 до 1995 кг/м³, в том числе:

– бетонные смеси с примерно одинаковым объ-

емом легкого керамзитового заполнителя (0,483–0,511 м³/м³), в которых до 30 % цемента замещено микронаполнителем (составы 1–3, табл. 1 и 2), имеют среднюю плотность в узком диапазоне – от 1670 до 1720 кг/м³;

– введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с одинаковым расходом вяжущего (625 и 645 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка (составы 2 и 4, табл. 1 и 2) приводит к снижению водопотребности смеси на 20 % и увеличению ее средней плотности на 16 % – от 1720 до 1992 кг/м³;

– использование более тяжелого природного туфового песка и щебня вместо искусственного керамзитового заполнителя (составы 3, 5, 6, табл. 1 и 2) при одинаковом расходе вяжущего Ц+МБ (700–708 кг/м³) приводит к увеличению водопотребности смеси на 16–46 % и повышению средней плотности на 12–20 % – от 1670 до 1995 кг/м³.

Подвижность всех смесей, определенная по расплыву нормального конуса по ГОСТ Р 59715-2022 [27], находится в диапазоне от 60 до 66 см. Это позволяет, учитывая также отсутствие признаков водоотделения и расслоения смесей, согласно ГОСТ Р 59714-2021 [28], отнести их к категории самоуплотняющихся.

Представленные выше результаты показывают, что для производства самоуплотняющихся бетонных смесей с легкими пористыми мелким и крупным заполнителями (песком и гравием/щебнем) важным фактором является общее количество дисперсных компонентов Ц+МП+МБ, расход которых должен составлять около 700 кг/м³. При использовании вместо легкого пористого песка мелкого заполнителя из плотных горных пород расход дисперсных компонентов может быть понижен до 600 кг/м³.

Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных смесей формовались образцы легкого бетона: кубы размером 100 × 100 × 100

мм в количестве 6 шт. для определения кубиковой прочности на сжатие по ГОСТ 10180-2012 [29]; призмы размером 100 × 100 × 400 мм в количестве 3 шт. для определения призмной прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона по ГОСТ 24452-2023 [30]; призмы размером 70,7 × 70,7 × 280 мм в количестве 3 шт. для установления диаграмм деформирования по методике [31, 32].

Контрольные образцы хранились до испытаний 100–110 суток в нормальных условиях (температура плюс (20 ± 2) °С, относительная влажность (95 ± 5) %). Нагружение призм производилось ступенями, равными 0,1R_b, с выдержкой на каждой ступени 5 минут до разрушения образцов. Модуль упругости и коэффициент Пуассона определяли при уровне нагружения 30–40 % от величины призмной прочности.

Определение динамического модуля упругости осуществлялось на приборе Erudite MKIV (PC 1004) компании CNS Farnell Limited (рис. 2) по трем образцам-призмам. Определение динамического модуля упругости бетонов при длине образцов-призм 400 мм производилось при продольной резонансной частоте колебаний в диапазоне 4–6 кГц по формуле технического руководства [33]:

$$E_d = 4 \times n^2 \times l^2 \times \gamma \times 10^{-12}, \quad (1)$$

где n – резонансная частота продольных колебаний, Гц;

l – длина образца, мм;

γ – средняя плотность бетона в образце, кг/м³.



Рис. 2. Определение динамического модуля упругости легких бетонов
Fig. 2. Determination of the dynamic modulus of elasticity of lightweight concrete

Значения средней плотности, прочности на сжатие, модуля упругости, коэффициента Пуассона и предельных относительных деформаций принимались как среднее значение результатов испытаний трех образцов.

Фактический класс легких бетонов по прочности на сжатие (B_{ϕ}) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}) определялись в соответствии с ГОСТ 18105-2018 [34] по формулам:

$$B_{\phi} = \frac{R}{K_T} = \frac{R}{1,14}, \quad (2)$$

$$R_{bn} = R_b \left(1 - 1,64 \frac{V}{100}\right) = 0,836 R_b, \quad (3)$$

где B_{ϕ} – фактический класс легкого бетона по прочности на сжатие, МПа;

R – кубиковая прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

R_b – призмная прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

R_{bn} – сопротивление легкого бетона осевому сжатию, МПа;

K_T – коэффициент требуемой прочности, принимаемый равным 1,14 в случае определения прочности

легкого бетона по контрольным образцам (по аналогии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [35] к высокопрочным тяжелым и мелкозернистым бетонам);

V – коэффициент вариации прочности легкого бетона, принимаемый равным не менее 10 % в случае определения прочности легкого бетона по контрольным образцам (по аналогии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [35] к высокопрочным тяжелым и мелкозернистым бетонам).

Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний высокопрочных легких бетонов по показателям: средняя плотность (ρ) и марка по средней плотности (D), кубиковая прочность (R) и фактический класс по прочности на сжатие (B_{ϕ}), призмная прочность (R_b) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}), начальный (E_b) и динамический (E_d) модули упругости, коэффициент Пуассона (ν_b) и предельные относительные деформации сжатия (ε_{b0}) представлены в табл. 3, а полные диаграммы деформирования легких бетонов – на рис. 3.

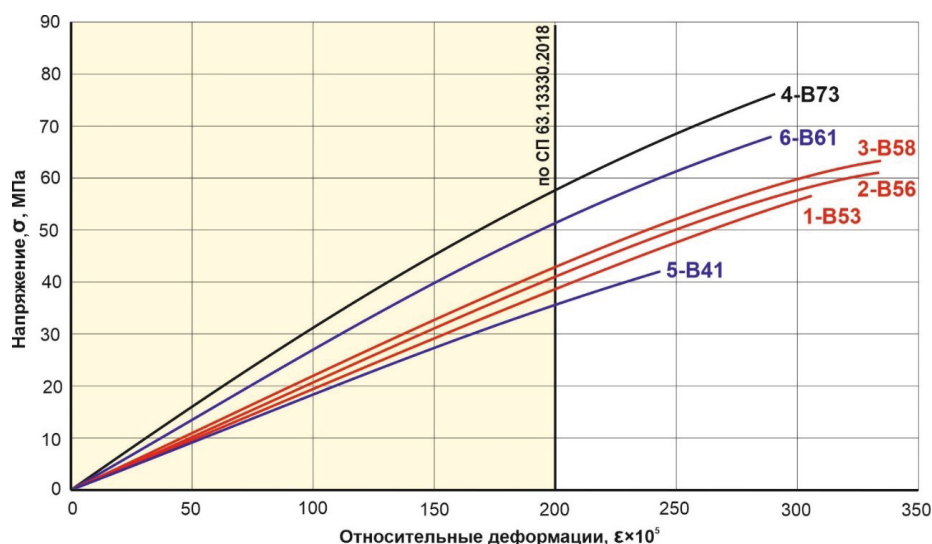
Полные диаграммы деформирования при сжатии (рис. 3) показывают, что нисходящая ветвь у всех легких бетонов классов выше В40 отсутствует.

Таблица 3
Table 3

Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных легких бетонов
Strength and deformation characteristics of high-strength lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных легких бетонов					
		ρ/D , кг/м ³	R/B_{ϕ} , МПа	R_b/R_{bn} , МПа	E_b/E_d , ГПа	ν_b	$\varepsilon_{b0} \times 10^5$
1	Керамзитовый песок и гравий	1589	60,5	57,6	19,8	0,23	308
		D1600	B_{ϕ} 53	48,2	23,1		
2	Керамзитовый песок и гравий	1635	64,3	61,1	21,0	0,23	334
		D1700	B_{ϕ} 56	51,1	23,7		
3	Керамзитовый песок и гравий	1598	66,0	63,2	22,2	0,23	334
		D1600	B_{ϕ} 58	52,8	24,4		
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	1939	83,2	77,8	31,5	0,20	300
		D2000	B_{ϕ} 73	65,0	35,5		
5	Туфовый песок и щебень	1694	47,2	44,3	19,5	0,25	243
		D1700	B_{ϕ} 41	37,0	22,9		
6	Туфовый песок и щебень	1900	70,1	67,8	26,7	0,24	289
		D1900	B_{ϕ} 61	56,7	31,4		

Примечания: ρ – средняя плотность в сухом состоянии; D – марка по средней плотности; R – кубиковая прочность на сжатие; B_{ϕ} – фактический класс по прочности на сжатие; R_b – призмная прочность на сжатие; R_{bn} – сопротивление осевому сжатию; E_b – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости; ν_b – коэффициент Пуассона; ε_{b0} – предельная относительная деформация сжатия.



Номера составов легких бетонов по табл. 1–3:

- 1 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 416 кг/м³;
- 2 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 541 кг/м³;
- 3 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 601 кг/м³;
- 4 – с кварцевым песком и керамзитовым гравием с расходом цемента 524 кг/м³;
- 5 – с туфовым песком и щебнем «Козлинка-2» с расходом цемента 605 кг/м³;
- 6 – с туфовым песком и щебнем «Святогорское» с расходом цемента 608 кг/м³.

Рис. 3. Диаграммы деформирования высокопрочных легких бетонов

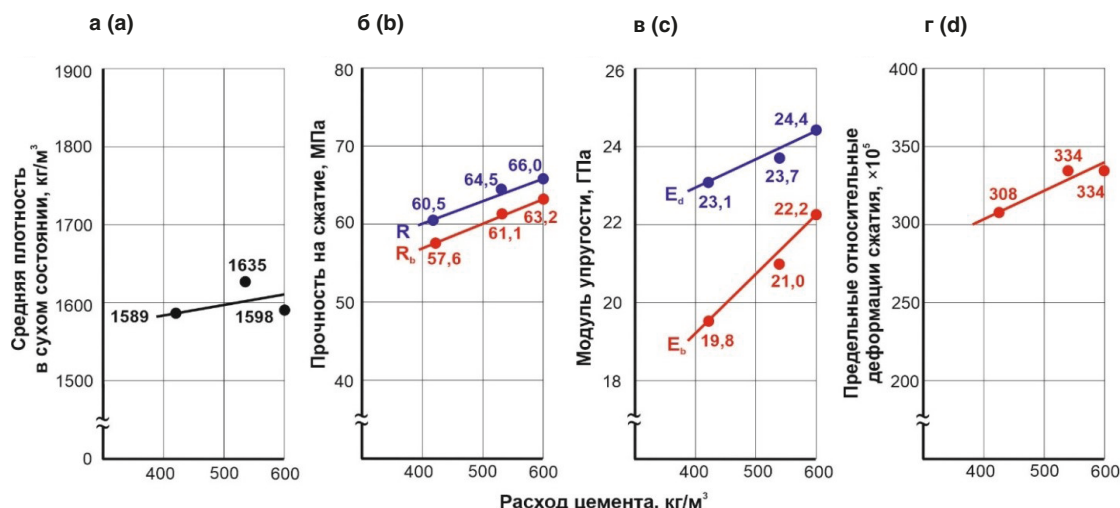
Fig. 3. Deformation diagrams of high-strength lightweight concretes

Оценка влияния расхода цемента на характеристики легкого бетона

Оценку влияния расхода цемента на прочностные и деформационные характеристики высокопрочного самоуплотняющегося легкого бетона проводили по результатам испытаний трех составов (№ 1, 2 и 3 по табл. 1), в которых при примерно одинаковых количествах дисперсных компонентов

Ц+МП (619–651 кг/м³), модификатора МБ (99–101 кг/м³) и объема легкого керамзитового песка и гравия (0,483–0,511 м³/м³) расход цемента варьировался в широком диапазоне – от 416 до 601 кг/м³.

По характеру кривых на рис. 4 можно судить о значимости влияния расхода цемента на среднюю плотность, прочность на сжатие, модуль упругости и предельные относительные деформации высокопрочного



R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призматическая прочность на сжатие;
 E_b – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 4. Влияние расхода цемента на характеристики легкого бетона

Fig. 4. Influence of cement consumption on the characteristics of lightweight concrete

легкого бетона.

Повышение расхода цемента от 416 до 601 кг/м³ практически не изменяет среднюю плотность легкого бетона, которая находится в узком диапазоне 1589–1635 кг/м³ (рис. 4а) и соответствует маркам по средней плотности D1600–D1700 по ГОСТ 25820-2021 [36].

Прочность на сжатие, модуль упругости и предельные относительные деформации легких бетонов на керамзитовом песке и щебне в возрасте 100–110 суток находятся в прямой зависимости от расхода цемента (рис. 4б–г).

При увеличении дозировки цемента на 30 % (за счет снижения расхода микронаполнителя) прочность легкого бетона повышается (рис. 4б), соответствует фактическим классам по прочности на сжатие от В_ф53 до В_ф58 и на 32–45 % превышает максимальное значение класса (В40) для легкого бетона с маркой по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15].

Значения начального (19,8–22,2 ГПа) и динамического (23,1–24,4 ГПа) модулей упругости и предельных относительных деформаций сжатия (308×10^{-5} – 334×10^{-5}) легких бетонов с повышением расхода цемента увеличиваются не более чем на 6–12 % (рис. 4в, г), что соответствует такому же приросту прочности легких бетонов на сжатие. При этом коэффициент Пуассона у всех легких бетонов составляет 0,23 (табл. 3) и в целом соответствует нормативному значению 0,2 по СП 63.13330.2018 [15].

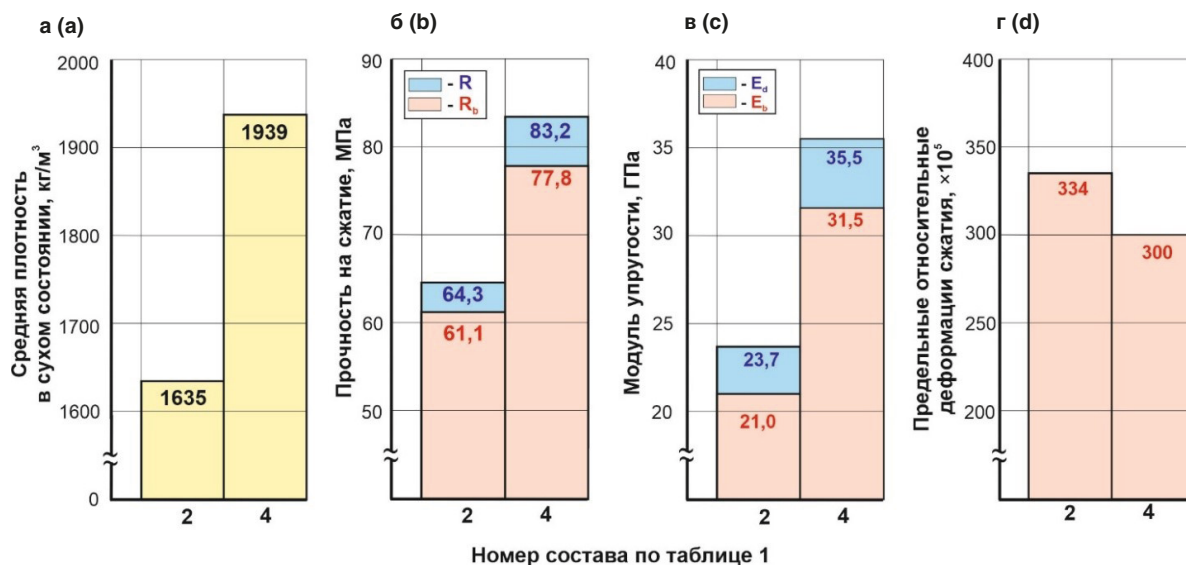
Незначительное (на 6–12 %) увеличение прочност-

ных и деформационных характеристик легких бетонов с одинаковым объемом легкого керамзитового заполнителя при повышении расхода цемента, по-видимому, можно объяснить тем, что увеличение прочности, соответственно модуля упругости и предельных относительных деформаций за счет снижения водовяжущего отношения В/(Ц+МБ) с 0,40 до 0,28, может частично компенсироваться понижением дозировки органического минерального модификатора с 24 до 16 % от массы цемента, а также повышенной водопотребностью микронаполнителя, которая будет вносить коррекцию «на уменьшение» в истинное водовяжущее отношение.

Оценка влияния вида мелкого заполнителя (песка) на характеристики легкого бетона

Введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с примерно одинаковым расходом вяжущего Ц+МБ (645 и 625 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка (составы 2 и 4 по табл. 1) приводит к значительному изменению основных физико-технических характеристик высокопрочных легких бетонов (табл. 3, рис. 5а–в), в том числе:

- повышению на 18 % средней плотности легкого бетона (с 1635 до 1939 кг/м³) и марки по средней плотности с D1700 до D2000 соответственно (рис. 5а);
- увеличению на 27–29 % кубиковой и призмной прочности легкого бетона на сжатие и класса с В_ф56 до В_ф73 соответственно (рис. 5б);
- повышению на 50 % начального и динамического



2 – легкий бетон с керамзитовым песком и гравием;
 4 – легкий бетон с кварцевым песком и керамзитовым гравием.
 R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призмная прочность на сжатие;
 E_b – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 5. Влияние вида мелкого заполнителя (песка) на характеристики легкого бетона
 Fig. 5. Influence of the type of fine aggregate (sand) on the characteristics of lightweight concrete

модулей упругости с 21 до 31,5 ГПа и с 23,7 до 35,5 ГПа соответственно (рис. 5в).

При этом коэффициент Пуассона понижается с 0,23 до 0,20 и соответствует нормативному значению по СП 63.13330.2018 [15], а предельные относительные деформации сжатия уменьшаются на 10 % с 334×10^{-5} до 300×10^{-5} (рис. 5г) и превышают нормативное значение 200×10^{-5} по СП 63.13330.2018 [15].

Значительное повышение средней плотности, прочности и модуля упругости легких бетонов при замене легкого пористого песка на песок из плотных горных пород связано прежде всего с уменьшением на 20 % общего объема легкого керамзитового заполнителя, повышением прочности и модуля упругости мелкого заполнителя [37] и снижением водовяжущего отношения (с 0,32 до 0,27) за счет меньшей водопотребности кварцевого песка.

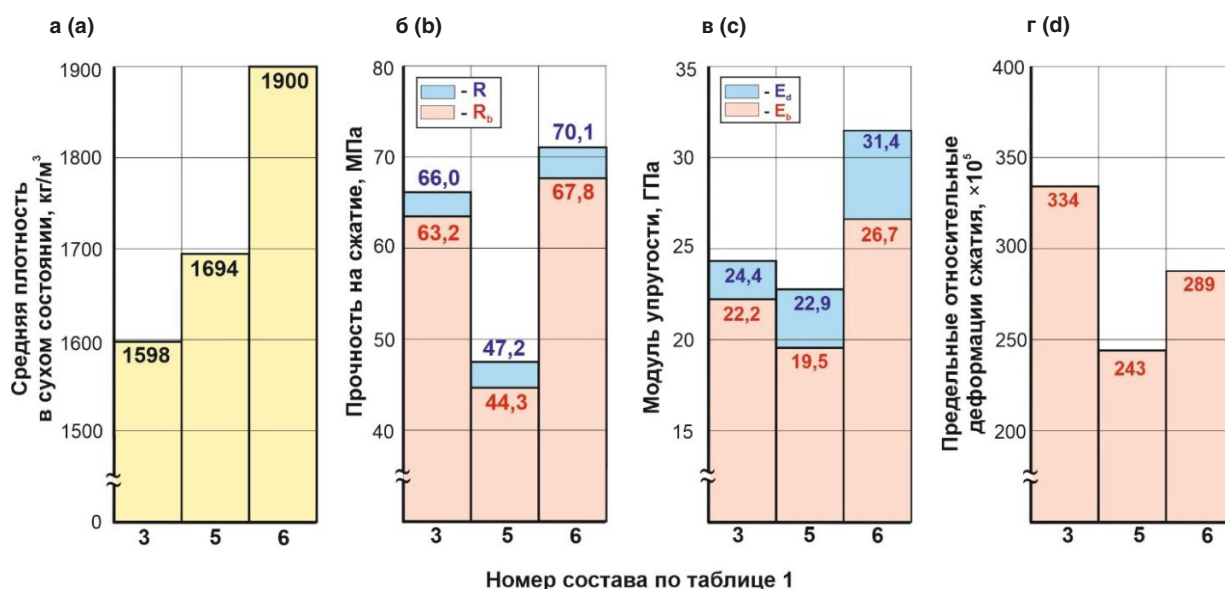
Оценка влияния вида легкого пористого заполнителя (песка и щебня) на характеристики легкого бетона

Физико-технические характеристики самоуплотняющихся легких бетонов, соответствующих требованиям ГОСТ 25820-2021 [36] к конструкционным легким бетонам по средней плотности (D1600–D1900), в зависимости от вида легкого пористого заполнителя (песка и гравия/щебня), изменяются в широком диапазоне (рис. 6).

Присутствие в составе модифицированного легкого бетона керамзитового заполнителя (песка и гравия) производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень), марок по насыпной плотности M800 и прочности П150, с объемной дозировкой $0,483 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовяжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,28$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($PK = 60 \text{ см}$), позволяет получить высокопрочный легкий бетон с физико-техническими характеристиками, значительно превышающими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью 1598 кг/м^3 , что соответствует марке по средней плотности D1600;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 66,0 и 63,2 МПа и сопротивлением осевому сжатию 52,8 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi} 58$;
- начальным 22,2 ГПа и динамическим 24,4 ГПа модулям упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,23 и предельными относительными деформациями сжатия 334×10^{-5} .

Структура легкого бетона с керамзитовым заполнителем производства ООО «ВЗКГ» представлена на рис. 7а.



3 – легкий бетон с керамзитовым песком и гравием «ВЗКГ»;
 5 – легкий бетон с туфовым песком и щебнем «Козлинка-2»;
 6 – легкий бетон с туфовым песком и щебнем «Святогорское».
 R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призмочная прочность на сжатие;
 E_d – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 6. Влияние вида легкого пористого заполнителя на характеристики легкого бетона
 Fig. 6. Influence of the type of light porous aggregate on the characteristics of lightweight concrete

а (a)



На керамзитовом песке и гравии,
ООО «Винзилинский завод
керамзитового гравия» (г. Тюмень)

б (b)



На туфовом песке и щебне,
месторождение «Каменское,
Козлинка-2» Кабардино-Балкарской
Республики

в (c)



На туфовом песке и щебне,
месторождение «Святогорское»
Хабаровского края

Рис. 7. Структура высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов с разными легкими пористыми заполнителями

Fig. 7. The structure of high-strength self-compacting lightweight concretes with light porous aggregates

Введение в состав модифицированного легкого бетона туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики (г. Нальчик) марок по насыпной плотности М1100 и прочности П200, с объемной дозировкой $0,414 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовыжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,41$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($РК = 66 \text{ см}$), позволяет получить легкий бетон с физико-техническими характеристиками, соответствующими нормативным значениям для легкого бетона марки по средней плотности D1700 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью $1694 \text{ кг}/\text{м}^3$, что соответствует марке по средней плотности D1700;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 47,2 и 44,3 МПа и сопротивлением осевому сжатию 37,0 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi} 41$;
- начальным 19,5 ГПа и динамическим 22,9 ГПа модулями упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,25 и предельными относительными деформациями сжатия 243×10^{-5} .

Значительное снижение основных физико-технических показателей самоуплотняющегося легкого бетона на туфовом песке и щебне месторождения «Каменское, Козлинка-2» по сравнению характеристиками легкого бетона на керамзитовом заполнителе связано с повышенным на 46 % водосодержанием смеси (табл. 1 и 2) за счет более высокой водопотребности туфового мелкого заполнителя.

Структура легкого бетона с туфовым заполнителем месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики представлена на рис. 7б.

Использование при производстве модифицированного легкого бетона туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» Хабаровского края марок по насыпной плотности М1000 и прочности П200, с объемной дозировкой $0,506 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовыжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,32$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($РК = 64 \text{ см}$), позволяет получить легкий бетон с физико-техническими характеристиками, значительно превышающими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$, что соответствует марке по средней плотности D1900;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 70,1 и 67,8 МПа и сопротивлением осевому сжатию 56,7 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi} 61$;
- начальным 26,7 ГПа и динамическим 31,4 ГПа модулями упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,24 и предельными относительными деформациями сжатия 289×10^{-5} .

Применение более плотного туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» по сравнению с легким керамзитовым заполнителем, при повышении средней плотности легкого бетона с 1598 до $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$, приводит к увеличению его

прочности на сжатие на 6–7 % и начального модуля упругости на 20 %. Такое несоответствие в приросте прочности и модуля упругости связано, с одной стороны, с их увеличением за счет более высокой плотности и модуля упругости туфового заполнителя [37], а с другой стороны, их снижением за счет увеличения на 16 % водосодержания смеси.

Структура легкого бетона с туфовым заполнителем месторождения «Святогорское» Хабаровского края представлена на рис. 7в.

Представленные выше результаты показывают, что высокопрочные легкие бетоны классов В40–В70 с маркой по средней плотности D1600–D1900 из самоуплотняющихся смесей могут быть получены с использованием как искусственного (керамзитового), так и природного (туфового) легких пористых заполнителей.

Выводы

1. Выполнена оценка влияния технологических факторов на прочностные (кубиковую и призмную прочность на сжатие) и деформационные (начальный и динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В41–В73 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

2. Для производства самоуплотняющихся высокопрочных бетонных смесей с легкими пористыми заполнителями (песком и гравием/щебнем) важным фактором является общее количество дисперсных компонентов Ц+МП+МБ, суммарный расход которых должен составлять около 700 кг/м³. При использовании вместо легкого пористого песка мелкого заполнителя из плотных горных пород расход дисперсных компонентов может быть понижен до 600 кг/м³.

3. Увеличение расхода цемента от 416 до 601 кг/м³ при постоянном количестве дисперсных компонентов Ц+МП+МБ от 720 до 750 кг/м³ и практически одинаковом (0,483–0,511 м³/м³) объеме легкого керамзитового заполнителя (марок по насыпной плотности М800 и прочности П150) незначительно (на 10–12 %) повышает прочностные (призмную прочность с 57,6 до 63,2 МПа) и деформационные (начальный модуль упругости с 19,8 до 22,2 ГПа) характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В53–В58 с маркой по средней плотности D1600–D1700.

Это объясняется тем, что при замене до 30 % микронаполнителя на портландцемент прирост прочности и модуля упругости легкого бетона, полученный за счет снижения водовязующего отношения В/(Ц+МБ) с 0,40 до 0,28, частично компенсируется понижением дозировки органоминерального модификатора с 24 до 16 % от массы цемента, а также повышенной водопотребностью микронаполнителя, которая будет

вносить коррекцию «на уменьшение» в истинное водовязующее отношение.

4. Введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с примерно одинаковым расходом вяжущего Ц+МБ (645 и 625 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка приводит к значительному повышению основных физико-технических показателей бетона (средней плотности на 18 %, прочности на сжатие на 27–29 % и модуля упругости на 50 %), что позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов до В73 с маркой по средней плотности D2000 с характеристиками: призмная прочность на сжатие 77,8 МПа, начальный модуль упругости 35,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,20 и предельные относительные деформации сжатия 300×10^{-5} .

Значительное повышение основных характеристик легкого бетона связано прежде всего со снижением водосодержания смеси на 20 % (за счет меньшей водопотребности кварцевого песка), уменьшением на 20 % общего объема легкого керамзитового заполнителя и повышением прочности и модуля упругости мелкого заполнителя.

5. Использование легкого туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» Хабаровского края (марок по насыпной плотности М1000 и прочности П200) в объеме 0,506 м³/м³ с расходом вяжущего Ц+МБ 708 кг/м³ позволяет получить высокопрочный самоуплотняющийся легкий бетон класса В61 с маркой по средней плотности D1900 с характеристиками: призмная прочность на сжатие 67,8 МПа, начальный модуль упругости 26,7 ГПа, коэффициент Пуассона 0,24 и предельные относительные деформации сжатия 289×10^{-5} .

Самоуплотняющийся легкий бетон на туфовом песке и щебне месторождения «Каменское, Козлинка-2» (марок по насыпной плотности М1100 и прочности П200) с расходом вяжущего Ц+МБ 704 кг/м³ и объемом легкого заполнителя 0,414 м³/м³ имеет более низкие прочностные и деформационные показатели, которые соответствуют классу В41 с маркой по средней плотности D1700, что связано с повышенным водосодержанием смеси за счет более высокой водопотребности мелкого заполнителя.

6. Полные диаграммы деформирования при сжатии показывают, что ниспадающая ветвь у всех высокопрочных легких бетонов классов от В40 до В70 с маркой по средней плотности от D1600 до D2000, так же как у высокопрочных мелкозернистых и тяжелых бетонов, отсутствует.

7. Применение различных видов легких пористых заполнителей искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) происхождения, а также мелкого заполнителя из плотных горных пород (природного кварцевого песка) совместно с портландцементным вяжущим с добавкой органоминерального модификатора типа МБ позволяет

получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 с прочностными и деформационными характеристиками, значительно превосходящими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15].

Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Парадиз, 2010. 258 с.
- Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. ЧАСТЬ II // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С., Амиров Р.А. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100 // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. № 2 (33). С. 106–121. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
- Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2014. № 3. С. 16–21.
- ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2013.
- Бондарь В.В. Конструкционный керамзитобетон в строительстве. Опыт и перспективы применения // *Вестник Полоцкого Государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2018. № 8. С. 112–119.
- Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении // *Транспортное строительство*. 2007. № 9. С. 10–13.
- Lightweight aggregate concrete: CEB/FIP manual of design and technology. The Construction Press, Lancaster, London, New York, 1977, 169 p.
- Johannesen H., Petersen S.A. Ultimate Compressive Strain and Ductility of LWAC Beams. *Master thesis submitted to the faculty of Engineering science and technology of the Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim, 2017, 155 p.
- Пригоженко О.В., Ярмаковский В.Н., Андрианов Л.А. Высокопрочный керамзитобетон из высокоподвижных смесей // *Научные труды II Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону*. Москва, 2005. Т. 4. С. 128–134.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 – новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>.
- Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Конструкционные легкие бетоны для нефтедобывающих платформ в северных приливных морях и морях Дальнего Востока // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 2 (23). С. 85–99.
- Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 192 с.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2019.
- Федеральное агентство по недропользованию: сайт. г. Москва, 2025. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/2ab5b06099ebcf65b278d740084ee8ac.pdf>. (дата обращения 05.03.2025). Текст: электронный / Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Кабардино-Балкарской Республики на 15.06.2020 г. Подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 26.12.2019 г. № 049-00017-20-04. 2020. 10 с.
- Отчет по переоценке качества сырья и перерасчету запасов Святогорского месторождения туфов по состоянию на 1.07.90 г. / Всесоюзное научно-техническое геологическое общество. Хабаровское территориальное правление. ВТК № 17. 1990. 114 с.
- ГОСТ Р 55224-2020. Цементы для транспортного строительства. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2021.
- Kaprielov S., Sheinfeld A. Influence of Silica Fume / Fly Ash / Superplasticizer Combinations in Powder-like Complex Modifiers on Cement Paste Porosity and Concrete Properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Super-plasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. 2000, vol. 195, pp. 383–400.
- ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2003.
- ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие

- технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
23. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
 24. ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
 25. ГОСТ 22263-76. Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 1978.
 26. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
 27. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 28. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
 29. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.
 30. ГОСТ 24452-2023. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ, 2024.
 31. Безгодов И.М., Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 34–36.
 32. Безгодов И.М. Методические особенности исследования полных диаграмм деформирования и релаксации напряжений в бетоне // *Технологии бетонов*. 2020. № 11–12 (172–173). С. 39–44.
 33. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005, 24 p.
 34. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
 35. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
 36. ГОСТ 25820-2021. Бетоны легкие. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 37. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодов И.М. Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 27–42. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO.

References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes. Moscow: Paradiz Publ., 2010, 258 p. (In Russian).
2. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. PART II. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2008, no. 3, pp. 9–13. (In Russian).
3. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Dzhahal A., Zaitsev A.S., Amirov R.A. A technology of erecting high-rise building frame structures using B60-B100 classes high-strength concretes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022, no. 2 (33), pp. 106–121. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
4. Sheynfeld A.V. Organomineral modifiers as a factor that increases the durability of reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2014, no. 3, pp. 16–21. (In Russian).
5. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
6. Bondar V.V. Structural expanded clay concrete in a building industry. Practice and prospects of usage. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2018, no. 8, pp. 112–119. (In Russian).
7. Kondrashchenko V.I., Yarmakovskiy V.N., Guzenko S.V. On the use of structural lightweight concretes in bridge construction. *Transport construction*. 2007, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).
8. Lightweight aggregate concrete: CEB/FIP manual of design and technology. The Construction Press, Lancaster, London, New York, 1977, 169 p.
9. Johannesen H., Petersen S.A. Ultimate Compressive Strain and Ductility of LWAC Beams. *Master thesis submitted to the faculty of Engineering science and technology of the Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim, 2017, 155 p.
10. Prigozhenko O.V., Yarmakovskiy V.N., Andrianov L.A. High-strength expanded clay concrete from highly mobile mixtures. *Scientific works of the II All-Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow, 2005, vol. 4, pp. 128–134. (In Russian).
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Selyutin N.M. Self-compacting high-strength expanded clay concrete of B50–B65 classes – a new generation of expanded clay concretes for structures of high-rise building. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023, no. 4, pp. 42–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>.

12. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. Structural lightweight concretes for oil production platforms in the northern tidal seas and the seas of the Far East. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2015, no. 2 (23), pp. 85–99. (In Russian).
13. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. High-strength lightweight concretes. St. Petersburg: SPbSUACE, 2022, 192 p. (In Russian).
14. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of high-rise buildings. *High-rise buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
15. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
16. Federal Agency for Subsoil Use: website. Moscow, 2025. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/2ab5b06099ebcf65b278d740084ee8ac.pdf>. (accessed 05.03.2025). Text: electronic / Information on the state and prospects of using the mineral resource base of the Kabardino-Balkarian Republic on 06/15/2020 Prepared by FSBI VSEGEI as part of the fulfillment of the State Assignment of the Federal Agency for Subsoil Use dated December 26, 2019 No. 049-00017-20-04, 2020, 10 p. (In Russian).
17. Report on the reassessment of the quality of raw materials and recalculation of reserves of the Svyatogorskoye tuff deposit as of 1.07.90 / All-Union Scientific and Technical Geological Society. Khabarovsk Territorial Administration. VTK No. 17, 1990, 114 p. (In Russian).
18. State Standard R 55224-2020. Cements for transport construction. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. Kaprielov S., Sheinfeld A. Influence of Silica Fume / Fly Ash / Superplasticizer Combinations in Powder-like Complex Modifiers on Cement Paste Porosity and Concrete Properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. 2000, vol. 195, pp. 383–400.
20. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
21. State Standard R 52129-2003. Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2003. (In Russian).
22. State Standard R 56592-2015. Mineral admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
23. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
24. State Standard 32496-2013. Fillers porous for light concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
25. State Standard 22263-76. Crushed stone and sand of porous rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 1978. (In Russian).
26. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
27. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian standardization institute, 2022. (In Russian).
28. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian standardization institute, 2021. (In Russian).
29. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
30. State Standard 24452-2023. Concretes. Methods for determination of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio. Moscow: Standartinform Publ., 2024. (In Russian).
31. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Concrete Technologies*. 2013, no. 10 (87), pp. 34–36. (In Russian).
32. Bezgodov I.M. Methodological features of the study of complete diagrams of deformation and stress relaxation in concrete. *Concrete Technologies*. 2020, no. 11–12 (172–173), pp. 39–44. (In Russian).
33. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005, 24 p.
34. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
35. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situ-casting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
36. State Standard 25820-2021. Lightweight concretes. Specifications. Moscow: Russian standardization institute, 2022. (In Russian).
37. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. The influence of the type of aggregates on the physical and technical characteristics of high-strength self-compacting cement systems. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2025, no. 2 (627), pp. 27–42. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO.

Информация об авторах / Information about the authors

Семен Суренович Каприелов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва e-mail: kaprielov@masterbeton-mb.ru

Semyon S. Kaprielov, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: kaprielov@masterbeton-mb.ru

Андрей Владимирович Шейнфельд[✉], д-р техн. наук, заместитель заведующего лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Andrey V. Sheynfeld[✉], Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Николай Иванович Карпенко, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, НИИСФ РААСН, Москва
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Nikolay I. Karpenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of the Problems of Strength and Quality in Construction, SRICP RAACS, Moscow
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Никита Михайлович Селютин, инженер, научный сотрудник лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; начальник лаборатории, ООО «Предприятие Мастер Бетон», Москва
e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru

Nikita M. Selyutin, Engineer, Researcher of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Head of Laboratory for LLC Master Concrete Enterprise, Moscow
e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru

Георгий Александрович Моисеенко, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, НИИСФ РААСН, Москва
e-mail: gecklock@yandex.ru

Georgiy A. Moiseenko, Cand. Sci. (Engineering), Researcher of the Laboratory of the Problems of Strength and Quality in Construction, SRICP RAACS, Moscow
e-mail: gecklock@yandex.ru

Игорь Михайлович Безгодков, инженер, заведующий лабораторией строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Igor M. Bezgodov, Engineer, Head of Laboratory for Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.4–183.2; 624.044:539.384

[https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–3\(628\)–69–79](https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–3(628)–69–79)**О.В. РАДАЙКИН**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», ул. Красносельская, д. 51,
г. Казань, 420066, Российская Федерация

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, д. 18, к. 1,
г. Казань, 420008, Российская Федерация

УТОЧНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЧАСТИ НОРМИРОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ « $\sigma - \epsilon$ » БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ. ЧАСТЬ 1

Аннотация

Введение. В двух частях статьи исследованы вопросы понятийного и методического характера, возникающие при расчетах железобетонных конструкций по методу предельных состояний с применением нелинейной деформационной модели (НДМ) согласно СП 63.13330.2018. Первая часть посвящена постановке проблемы и разработке понятийного аппарата. **Цель.** Усовершенствовать понятия и термины о законах и диаграммах деформирования бетона при сжатии и растяжении в аспекте их нормирования в расчетах по методу предельных состояний.

Методы: формальная логика (анализ, синтез, индукция, дедукция), методы теории вероятностей и математической статистики, метод предельных состояний. **Результаты.** Показано, что нормативная база расчетов по методу предельных состояний на основе НДМ содержит противоречивые и неоднозначно понимаемые термины, отсутствуют некоторые весьма важные понятия о нормировании механических свойств бетона. В данной части статьи предложено заполнить эти пробелы новыми понятиями, введенными автором, и устранить имеющиеся противоречия и неточности.

Выводы. Предложено исключить из нормативного и научного оборота в расчетах конструкций по НДМ неоднозначные термины: «диаграмма состояния», «рабочая диаграмма» и «диаграммный метод». В СП 63.13330.2018 следует дополнить раздел «Термины и определения» ныне полностью отсутствующими терминами и определениями, касающимися

расчетов по НДМ, что возможно в том числе на основе введенных автором новых 12 понятий о законах и диаграммах деформирования бетона при сжатии и растяжении со строгим математическим содержанием, которые обеспечивают всю полноту, целостность и взаимоувязанность нормирования характеристик физико-механических свойств бетона. Отличия в понятиях связаны с назначением своей фиксированной вероятности $p \in [0,004; 0,5]$ левостороннего перцентиля нормального распределения при постоянном уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ левой границы доверительного интервала оценки этого перцентиля на основе t -распределения.

Ключевые слова: бетон, сжатие, растяжение, закон деформирования, диаграмма деформирования, нелинейная деформационная модель, метод предельных состояний, неоднородность, коэффициент вариации, перцентиль, доверительная вероятность

Для цитирования: Радайкин О.В. Уточнение положений метода предельных состояний в части нормирования зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » бетона при сжатии и растяжении. Часть 1 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 69–79. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-69-79](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-69-79). EDN: XMUZPX

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.02.2025

Поступила после рецензирования 21.03.2025

Принята к публикации 27.03.2025

O.V. RADAYKIN

Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya str., 51, Kazan, 420066, Russian Federation

Kazan Federal University, Kremlevskaya str., 18, bld. 1, Kazan, 420008, Russian Federation

CLARIFICATION OF THE PROVISIONS OF THE LIMIT STATE METHOD REGARDING THE NORMALIZATION OF THE " $\sigma - \varepsilon$ " DEPENDENCES OF CONCRETE UNDER COMPRESSION AND TENSION. PART 1

Abstract

Introduction. In two parts of the article, the conceptual and methodological issues arising in the calculations of reinforced concrete structures using the limit state method with a nonlinear deformation model (NDM) according to SP 63.13330.2018 are investigated. The first part is devoted to the formulation of the problem and the development of the conceptual framework.

Aim. To improve the concepts and terms about the laws and diagrams of concrete deformation under compression and tension in terms of their normalization in calculations using the limit state method.

Methods: formal logic (analysis, synthesis, induction, deduction), methods of probability theory and mathematical statistics, the method of limit states.

Results. It is shown that the regulatory framework for calculations using the limit state method based on NDM contains contradictory and ambiguously understood terms, and some very important concepts about the normalization of the mechanical properties of concrete are missing. In this part of the article, it is proposed to fill in these gaps with new concepts introduced by the author and eliminate existing contradictions and inaccuracies.

Conclusions. It is proposed to exclude the ambiguous terms "state diagram", "working diagram" and "diagrammatic method" from the normative and scientific circulation in calculations of structures according to NDM.

In SP 63.13330.2018, the section "Terms and definitions" should be supplemented with currently completely missing terms and definitions related to NDM calculations, which is possible, among other things, on the basis of the 12 new concepts introduced by the author on the laws and diagrams of concrete deformation under compression and tension with strict mathematical content, which ensure the completeness, integrity and interconnectedness of the normalization of characteristics, physical and mechanical properties of concrete. The differences in concepts are related to the assignment of its fixed probability $p \in [0.004; 0.5]$ to the left-hand percentile of the normal distribution at a constant confidence level $\alpha = 0.95$ to the left boundary of the confidence interval for estimating this percentile based on the t-distribution.

Keywords: concrete, compression, stretching, law of deformation, deformation diagram, nonlinear deformation model, limit state method, heterogeneity, coefficient of variation, percentile, confidence probability

For citation: Radaykin O.V. Clarification of the provisions of the limit state method regarding the normalization of the " $\sigma - \varepsilon$ " dependences of concrete under compression and tension. Part 1. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 69–79. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-69-79](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-69-79). EDN: XMUZPX

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 14.02.2025

Revised 21.03.2025

Accepted 27.03.2025

В СП 63.13330.2018 [1], а также в других нормативных документах РФ, в которые включена нелинейная деформационная модель (НДМ) для механического расчета нормальных сечений стержневых элементов из армированного бетона, физический закон деформирования бетона имеет несколько вариантов записи в форме математических функций, устанавливающих связь между нормальными напряжениями σ и относительными продольными деформациями стержня ϵ . Так, в указанном своде правил (СП) имеется два варианта кусочно-линейной функции (п. 6.1.20 [1]), один вариант нелинейной функции (см. Приложение Г [1]), кроме того, согласно п. 6.1.19 [1] допускается применение множества иных вариантов нелинейных функций из сторонних источников, но при условии совпадения значений напряжений и деформаций в так называемых параметрических точках, занормированных сводом правил. Графику рассматриваемых функциональных зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » разработчики СП дали название «диаграмма деформирования», имеется также второе малоупотребимое в широкой научно-инженерной среде название «диаграмма состояния». После внимательного изучения физических законов деформирования бетона при действии кратковременной нагрузки, представленных в СП, у автора данной публикации возникли следующие замечания и предложения:

1. Нарушая лексические нормы и правила корректного словоупотребления и элементарную логику, авторы СП записали, что «диаграммы деформирования» *«определяют»* связь между напряжениями и относительными деформациями» (например, см. п. 6.1.19 [1] и др.), в то время как, на самом деле, за это отвечает сам материал – бетон (это справедливо и для арматурной стали, как и для всех прочих материалов), свойства которого сопротивляться действию нагрузки ученые и практики *описывают* математическими функциями типа $\sigma = f(\epsilon)$, а диаграммы деформирования являются только лишь *графическим образом* этих функций. Поэтому так и следует писать: «диаграммы деформирования графически отображают связь между напряжениями и относительными деформациями».

В связи с таким уточнением в расчетах железобетонных конструкций использовать непосредственно диаграммы деформирования материалов, к чему «призывает» тот же п. 6.1.19 [1] и другие положения данного нормативного документа, нельзя, поскольку представленный в СП метод расчета железобетонных конструкций по НДМ по своей сути является *вычислительным*, а не *графическим*, он предполагает математические преобразования неких выражений по определенному алгоритму – преобразования с использованием тех же математических функций типа $\sigma = f(\epsilon)$.

Именно поэтому называть метод расчета нормальных сечений железобетонных стержней по НДМ диаграммным (т. е. иначе – графическим) методом, как это предлагается в некоторых научных статьях, мо-

нографиях и учебных изданиях разными авторами, некорректно.

В целом по тексту СП, там, где это уместно для точной передачи смыслов о расчете по НДМ, термин «диаграмма деформирования бетона» целесообразно заменить на «закон деформирования бетона».

Избыточными являются такие термины СП, как: а) «рабочие диаграммы» по пп. 6.1.19–6.1.20, под которыми непонятно, что имеется в виду; в умолчаниях остается, что все прочие диаграммы деформирования являются «нерабочими»? б) «диаграммы состояния» – термин, переключаясь с материаловедческой темой о фазовых состояниях вещества (так, в материаловедении известна диаграмма состояния сплавов железо-углерод [2]) и в научно-технической литературе о механической прочности материалов при одноосном нагружении до издания СНиП 52-01-2003 [3], который предшествовал СП 63.13330.2018, такой термин никогда не применялся. И то и другое следует исключить из СП. Единственное, что встречается в литературе по механике: «диаграмма механического состояния Я.Б. Фридмана», например в [4], но это все же авторская терминология – есть исключение, чем правило, функциональность этих диаграмм намного шире, чем у диаграмм деформирования материалов по СП – в ней учитывается обобщенная кривая течения, сопротивления отрыву и срезу, а также имеется возможность оценки влияния вида напряженного состояния на тип разрушения материала (хрупкий или пластичный) при воздействии однократных кратковременных статических нагрузок.

Интересный факт, связанный с терминологией: в третьем разделе СП «Термины и определения» нет ни одного термина или определения, касающегося расчетов по НДМ. Этот пробел следовало бы заполнить.

2. В п. 6.1.20 [1] описаны так называемые «рабочие» двух- и трехлинейные диаграммы деформирования сжатого бетона. В СП прямо не оговаривается, но из совместного анализа положений этого пункта с пп. 6.1.13 и 8.1.30 (формулы 8.53 и 8.54) [1] вытекает, что «рабочие» диаграммы строятся для следующих двух видов напряженно-деформированного состояния железобетонного стержня: прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия с большим эксцентриситетом. Уместным было бы отметить это в п. 6.1.20 [1], поскольку это не только поможет инженеру правильно выбрать подходящий закон деформирования бетона для соответствующего расчетного случая, но и внесет ясность в вопрос о нормировании законов деформирования бетона в целом, начиная с определения эталонных зависимостей « $\sigma - \epsilon$ », о которых речь пойдет в п. 4.1 данной публикации.

3. В п. 6.1.19 [1] написано, что альтернативой «рабочим» диаграммам являются криволинейные диаграммы деформирования Приложения Г [1], что были предложены еще в середине 1980-х гг. проф. Н.И. Кар-

пенко. Но дело в том, что они строятся для случая осевого центрального нагружения. Автор данной статьи под руководством проф. Н.И. Карпенко в 2011–2012 гг. занимался вопросом их трансформации для случая прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия/растяжения с большим эксцентриситетом в рамках научной работы над диссертацией на соискание ученой степени кандидата технических наук. Эти материалы в дальнейшем были использованы при подготовке под эгидой Минрегион развития РФ альтернативной редакции СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», которая, к сожалению, не прошла конкурсного отбора и не вышла в свет. Получается, что ни о какой прямой альтернативе «рабочих» и криволинейных диаграмм речи быть не может, п. 6.1.19 [1] содержит ошибку. Кроме того, следует указать еще на такую опечатку: название Приложения Г записано как «Диаграммы деформирования **бетона**», а по тексту далее выходит, что при замене нижнего индекса m на s в параметрах получаемые аналитические формулы становятся пригодными для построения диаграмм деформирования **арматурной стали**.

Вариантов выхода из ситуации два:

а) Дополнить формулы Приложения Г [1] расчетными коэффициентами из публикаций [5, 6], позволяющими проводить трансформацию закона деформирования бетона от случая осевого центрального нагружения к случаям прямого чистого изгиба и прямого внецентренного сжатия/растяжения с большим эксцентриситетом.

б) Оставить формулы как есть, но дать пояснение, что они пригодны только для расчета сжатых/растянутых железобетонных стержней с малым эксцентриситетом (в том числе с нулевым), а опечатки исправить.

4. С точки зрения общей логики метода предельных состояний в СП 63.13330.2018 [1] необходимо ввести новые весьма важные понятия:

4.1. Эталонный закон деформирования бетона при осевом центральном сжатии (растяжении) – это непрерывная функция вида $\sigma = f_{b,st}(\epsilon_b)$ ($\sigma = f_{b,st}(\epsilon_{bt})$), связывающая нормальные напряжения σ и относительные продольные деформации ϵ , аппроксимирующая экспериментальную дискретную зависимость « $\sigma - \epsilon$ », построенную по результатам равновесных испытаний стандартных бетонных призм на осевое центральное сжатие (стандартных бетонных «восьмерок» на осевое центральное растяжение) кратковременной нагрузкой с учетом следующих условий и допущений:

а) количество образцов в эксперименте n принимается не менее 30 шт. (это условие минимизирует ошибку репрезентативности выборки до приемлемых значений, см. п. 4.5 ГОСТ 18105-2018 (схема контроля А) [7], и более общее требование в технике – п. 5.8 ГОСТ Р 8.694-2010 [8]);

б) в качестве теоретического закона распределения случайной величины опытных значений напряжений σ (в том числе вершинных, соответствующих пре-

делу прочности бетона на сжатие (растяжение)) при заданном значении деформаций ϵ принимается: **для генеральной совокупности – нормальное распределение, а для выборки – распределение Стьюдента (t-распределение)**. Примечания:

1) при большом количестве образцов ($n \geq 1000$) распределение Стьюдента становится близким к нормальному и может быть заменено им;

2) более адекватно неоднородность физико-механических свойств материалов описывают двухпараметрические распределения с нулевой левой границей типа логнормального, распределения Вейбулла и др. (например, в ГОСТ Р 57845-2017 «Композиты полимерные. Расчет нормативных значений характеристик конструкционных материалов» [9] используется распределение Вейбулла), однако на данном этапе развития науки о бетоне и железобетоне распределения Стьюдента и нормальное являются наиболее изученными и проработанными на нормативном уровне, а для внедрения других распределений требуются дополнительные исследования.

в) Каждому значению аргумента ϵ экспериментальной дискретной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » сопоставляется только одно значение случайной величины σ , равное **среднему значению** $\bar{\sigma}$, вычисленному по всем n образцам при заданном ϵ :

$$\sigma_j = \bar{\sigma}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{ij}(\epsilon_j), \quad (1)$$

где i – номер образца, $i = 1 \dots n$; j – номер этапа нагружения экспериментального образца, $j = 1 \dots m-1$; m – количество этапов нагружения при соблюдении условия, что приращение деформаций на j -м этапе нагружения $\Delta \epsilon_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} - const$, т. е. величина постоянная для всех $i = 1 \dots n-1$ образцов (прим.: все m этапы нагружения будут реализованы только для какого-то одного образца из n , у которого получится наибольшая из всех образцов предельная деформация, а для всех остальных образцов фактическое количество этапов нагружения m_i будет меньше m).

Соблюдение данного условия позволяет при текущем значении продольной деформации ϵ_j фиксировать статистический разброс соответствующих напряжений σ_{ij} по всем n образцам. Обеспечить его выполнение в эксперименте возможно при реализации так называемого «жесткого» режима нагружения, то есть при контроле скорости деформирования образца с помощью датчика деформаций и наличия отрицательной обратной связи в схеме управления испытательной установки [10–12].

г) Область определения эталонного закона деформирования ограничивается слева нулем, а справа – **средним значением предельных деформаций** (они соответствуют концу ниспадающей ветви на диаграмме деформирования бетона):

$$\bar{\varepsilon}_{b,ult} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{b,max,i}, \quad \bar{\varepsilon}_{bt,ult} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{bt,max,i}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{b,max,i}$, $\varepsilon_{bt,max,i}$ – максимальные деформации в i -м эксперименте соответственно при сжатии и растяжении.

Исходя из определения, в общем виде функции $f_{b,st}$, $f_{bt,st}$ могут быть записаны так:

$$f_{b,st}(\varepsilon_b) = F_b[\sigma_j(\varepsilon_j)], \quad \varepsilon_b \in [0; 0; \bar{\varepsilon}_{b,ult}], \quad (3)$$

$$f_{bt,st}(\varepsilon_{bt}) = F_{bt}[\sigma_j(\varepsilon_j)], \quad \varepsilon_{bt} \in [0; 0; \bar{\varepsilon}_{bt,ult}],$$

где $F_b[\sigma_j(\varepsilon_j)]$, $F_{bt}[\sigma_j(\varepsilon_j)]$ – аппроксимирующие функции, например, могут быть приняты в виде гиперболической функции по Н.И. Карпенко [13], степенной функции, учитывающей повреждаемость [14] и др.

График функции $f_{b,s}$ ($f_{bt,st}$) в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **эталонной диаграммой деформирования бетона при осевом центральном сжатии (растяжении)**.

Термин «эталонные диаграммы деформирования» не является новым и присутствует в научной литературе, например, в [15–18], а в [19] они названы «исходными», но во всех этих работах в качестве признаков отнесения к эталону принят лишь один – вид нагружения, а вероятностные характеристики неоднородности свойств бетона не рассматриваются. В данной статье, чтобы восполнить этот пробел, проведены необходимые изыскания.

Непосредственно в инженерных расчетах использовать выражения (3) нельзя. По аналогии с классом бетона по прочности на сжатие (растяжение) B (B_t), они нужны только для нормирования и контроля физико-механических свойств бетона как строительного материала. Так, в нормах класс бетона ни в каких критериях того или иного предельного состояния не участвует. И точно так же, как через класс бетона, в нормах определяются все необходимые в расчетах параметры, например призмная прочность бетона $R_{b,n}$, $R_{b,ser}$, R_b , начальный модуль деформации бетона E_b и т. д., так же и через эталонный закон деформирования должны определяться производные из него законы деформирования, пригодные для инженерного расчета по двум группам предельных состояний. Достигается это путем трансформации (математического преобразования) «эталонных» формул (3) по специальным алгоритмам.

В связи с этим добиваться максимального соответствия эталонного закона деформирования действительной работе бетона в каких-то реальных условиях эксплуатации железобетонных конструкций нет никакой необходимости. Это обеспечивается на последующих этапах трансформации (преобразования) эталонного закона расчетным способом.

Для получения зависимостей (3) важно лишь определиться с эталонными параметрами образцов (и их количеством), испытательной установки и режи-

ма нагружения. К сожалению, на сегодняшний день этап стандартизации законов деформирования бетона на основе испытаний в нормах Российской Федерации до сих пор не пройден – отсутствует соответствующий ГОСТ. И это несмотря на то, что НДМ с 2003 года является основной для инженерного расчета нормальных сечений железобетонных стержневых элементов. Из этого вытекает логичный вывод, что **законы и диаграммы деформирования бетона, представленные в СП 63.13330.2018 [1], не обладают всей полнотой легитимности**, так как до сих пор не существует стандартных (законных) методик контроля их параметров.

Важно отметить, что аналогия между эталонным законом деформирования и классом бетона по прочности является все же приближенной, так как между ними есть существенные методические отличия:

а) класс бетона определяется по минимальной границе одностороннего доверительного интервала с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ для оценки 5-го перцентиля (при фиксированной вероятности $p = 0,05$, или 5 %) в заданной выборке, а эталонный закон определяется также по минимальной границе одностороннего доверительного интервала с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, но для оценки 50-го перцентиля (для фиксированной вероятности $p = 0,50$, или 50 %), который соответствует среднему значению случайной величины (прим.: сами перцентили служат точечной оценкой рассматриваемых характеристик, для которых затем в объеме заданной выборки устанавливается нижняя граница доверительного интервала, то есть дается оценка уже самих перцентилей);

б) класс бетона по прочности на сжатие определяется по результатам испытаний стандартных кубов с размером ребра 150 мм, а эталонный закон – по результатам испытаний бетонных призм 150 × 150 × 600 мм: измерить продольные деформации, например методом тензометрии, проще и точнее на призмах, чем на кубах.

Что касается точечных оценок, то близкая аналогия будет иметь место между нормативным (базовым) законом деформирования (см. ниже п. 4.2.2) и классом бетона по прочности, который в п. 6.1.3 [1] носит второе название – «нормативная прочность».

4.2. Трансформированный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это непрерывная функция типа $\sigma = f_{bt,tr}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{b,tr}(\varepsilon_{bt})$), полученная путем математического преобразования (трансформации) эталонного закона деформирования (3), для соблюдения расчетных положений метода предельных состояний, а также для учета влияния различных систематических факторов, таких как: вид бетона, характер напряженно-деформированного состояния (градиент деформаций), форма и размеры конструктивного элемента (масштабный фактор), скорость нагружения, условия работы и т. п.

График функции $f_{b,tr}(f_{bt,tr})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **трансформированной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

Трансформацию диаграмм деформирования так же, как и в случае с эталонными диаграммами, в литературе до этого момента понимали в узком смысле: связывали эту процедуру лишь с переходом от НДС одного вида нагружения к другому [15–19].

Трансформированные закон и диаграмма деформирования являются обобщающими, в большей степени абстрактными, но тем не менее необходимыми понятиями для целостного представления о нормировании прочностных и деформационных свойств бетона. Производными к ним будут являться более конкретные понятия, непосредственно применяемые в инженерном расчете, а именно:

4.2.1. Осредненный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это непрерывная функция типа $\sigma = f_{b,m}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,m}(\varepsilon_{bt})$), полученная путем математического преобразования (трансформации) эталонного закона деформирования (3) при сохранении в нем в качестве точечной оценки **50-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,5$ (50 %)) и уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля, но с корректировкой по необходимости значений σ и ε с целью учета вида бетона, характера напряженно-деформированного состояния (градиента деформаций), формы и размеров конструктивного элемента (масштабного фактора), скорости нагружения, условий работы и т. п.

График функции $f_{b,m}(f_{bt,m})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **осредненной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

Функции типа $f_{b,m}(\varepsilon_b)$, $f_{bt,m}(\varepsilon_{bt})$ должны применяться в расчетах (в том числе при компьютерном моделировании), результаты которых затем предполагается сравнивать с данными эксперимента, а именно: с выборочными оценками средних значений опытных величин прочности, жесткости и трещиностойкости. Такая необходимость возникает, например, в случае **валидации** методов и методик теоретического расчета. Следует отдать должное авторам Еврокода 2 [20], в котором занормирована зависимость $\sigma - \varepsilon$ через средние значения прочностных и деформационных характеристик сжатого бетона (см. п. 3.1.5 [20]) ее можно считать осредненным законом деформирования. В отечественных нормах, к сожалению, такого нет.

4.2.2. Нормативный (базовый) закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_{b,n}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,n}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации)

эталонного закона деформирования (3), путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **5-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,05$ (5 %)) и сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля, а также при необходимости дополнительно корректируя значения σ и ε для учета вида бетона, характера напряженно-деформированного состояния (градиента деформаций), формы и размеров конструктивного элемента (масштабного фактора), скорости нагружения, условий работы и т. п.

График функции $f_{b,n}(f_{bt,n})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **нормативной (базовой) диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении)**.

По аналогии с прочностью согласно п. 2.2.5 ГОСТ 27751-2014 [21] нормативный закон деформирования бетона необходим для нормирования физико-механических свойств бетона и их контроля при изготовлении, возведении и эксплуатации строительного объекта.

Этот закон путем дальнейшей трансформации порождает семейство расчетных законов деформирования для использования их в расчетах по первой и второй группам предельных состояний:

4.2.2.1. Расчетный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по первой группе предельных состояний – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_b(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации) нормативного закона деформирования $f_{b,n}(f_{bt,n})$, путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **0,4-го перцентиля** (с фиксированной вероятностью $p = 0,004$, или 0,4 %) и при сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения минимальной границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля.

График функции $f_b(f_{bt})$ в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **расчетной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по первой группе предельных состояний**.

4.2.2.2. Расчетный закон деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по второй группе предельных состояний – это такой трансформированный закон деформирования типа $\sigma = f_{b,ser}(\varepsilon_b)$ ($\sigma = f_{bt,ser}(\varepsilon_{bt})$), который получают путем математического преобразования (трансформации) нормативного закона деформирования $f_{b,n}(f_{bt,n})$, путем принятия в качестве точечной оценки случайных величин σ и ε **p -перцентиля с фиксированной вероятностью p из интервала (0,004;0,05]** (принимают $p = 0,05$, если нет иных указаний) и при сохранении уровня доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для определения нижней границы одностороннего доверительного интервала оценки данного перцентиля.

График функции $f_{b,ser}$ ($f_{bt,ser}$) в системе координат $\sigma_b - \varepsilon_b$ ($\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$) называется **расчетной диаграммой деформирования бетона при сжатии (растяжении) для расчетов по второй группе предельных состояний**.

В конце 4-го пункта сделаем одно важное замечание по перцентилям. То, что в качестве точечной оценки нормативных значений физико-механических характеристик бетона в нормах применяется именно 5-й перцентиль (он означает, что в 5 % случаев – для 5 % образцов бетона, 5 % конструкций одного типа и т. п. – в генеральной совокупности значение данной характеристики окажется меньше заданного (нормируемого) значения и соответственно в 95 % случаев значения будут выше нормируемого) можно «догадаться» на примере кубиковой прочности по формуле под таблицей Приложения 1 ГОСТ 26633-85 [22], которая, по сути, представляет класс бетона по прочности В (одновременно он является нормативной прочностью бетона на сжатие) как 5-й перцентиль генеральной совокупности по кубиковой прочности с нормальным законом распределения. Из последующих редакций ГОСТ эту формулу (ГОСТ 26633-91 [23]), а затем и саму таблицу (ГОСТ 26633-2012 [24] и далее в ГОСТ 26633-2015 [25]) незаслуженно исключили. Этот же перцентиль применяется для нормирования расчетных значений физико-механических свойств бетона в расчетах по второй группе предельных состояний.

Что касается первой группы, то вместо одностороннего p -перцентиля в литературе обычно фигурирует обеспеченность $\gamma = 1 - p$ (также односторонняя). Ее оценки крайне неоднозначны, например В.Д. Райзер предлагает приравнять ее к 99,5 % [26], в статьях [27, 28] γ принимают равной 99,86 %, в [29] – 99,865 %, в [30] – 99,9 % и т. д. Все эти предложения объединяет одна проблема – отсутствие строгого математического обоснования во взаимосвязи коэффициентов надежности для расчетных характеристик бетона с точки зрения механического расчета конструкций и методик выборочного контроля характеристик бетона с точки зрения обеспечения требуемого качества. Большинство авторов существенно упрощает задачу, оперируя характеристиками только генеральной совокупности, без учета выборочных оценок, применяя при этом широко известное в статистике правило «трех сигм», которое приводит к обеспеченности, равной $\gamma = 99,865$ %. В данной статье эта проблема решается от обратного – отталкиваясь от известного значения коэффициента надежности по бетону $\gamma_b = 1,3$, в результате чего перцентиль получается равным $p = 0,4$ % (см. числовой пример под формулой (3) во второй части статьи), а соответствующая обеспеченность $\gamma = 99,6$ %.

В предыдущих определениях выделены два направления трансформации законов деформирования бетона: по учету неоднородности свойств бетона, что

в рамках метода предельных состояний реализуется через так называемые коэффициенты надежности по материалу (например, коэффициенты γ_b и γ_{bt} в п. 6.1.11 [1]), их получают на основе положений теории вероятностей и математической статистики; по учету прочих систематических факторов, которые по каким-то причинам невозможно учесть иным способом в самой расчетной схеме, в уравнениях равновесия или в уравнениях совместности деформаций.

Во второй части статьи подробно остановимся на первом направлении, в то время как второе было затронуто выше – в п. 3 данной статьи.

Выводы

1. Предложено исключить из нормативных документов и научного оборота в вопросах расчета железобетонных конструкций по НДМ такие неоднозначно понимаемые термины и определения, как: «диаграмма состояния», «рабочая диаграмма» и «диаграммный метод».

2. Там, где это уместно по смыслу, вместо термина «диаграмма деформирования» использовать «закон деформирования».

3. В нормах (в частности, в [1]) следует дополнить раздел «Термины и определения» ныне полностью отсутствующими терминами и определениями, касающимися расчетов по НДМ, что возможно выполнить на основе результатов данной статьи.

4. Исходя из общей логики метода расчета по предельным состояниям введены следующие новые 12 понятий со строгим математическим (вероятностно-статистическим) содержанием, которые обеспечивают всю полноту, целостность и взаимоувязанность нормирования характеристик физико-механических свойств бетона: эталонный (-ая), осредненный (-ая), трансформированный (-ая), нормативный (базовый) (-ая), расчетные для расчетов соответственно по первой и второй группам предельных состояний, закон (диаграмма) деформирования бетона при сжатии (растяжении).

Отличия в понятиях связаны с назначением своей фиксированной вероятности $p \in [0,004; 0,5]$ левостороннего перцентиля нормального распределения при постоянном уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ левой границы доверительного интервала оценки этого перцентиля на основе t -распределения.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2). Москва: ФГБУ «РСТ», 2022.
2. Сидоров Е.В. Полная равновесная диаграмма состояния системы железо-углерод на основании теоретических и экспериментальных исследований // *Литейное производство*. 2023. № 2. С. 12–17. EDN: RNYWJH.

3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: ФГУП «ЦПП», 2004.
4. Лавров А.В., Ерасов В.С., Ладник Д.Н. Об одном подходе к трактовке объединенной теории прочности Я.Б. Фридмана // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94>. EDN: YLXMXV.
5. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2012. № 2 (40). С. 11–19. EDN: OZMBYX.
6. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 113–120. EDN: RSTDVV.
7. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
8. ГОСТ Р 8.694-2010 (Руководство ИСО 35:2006). Стандартные образцы материалов (веществ). Общие статистические принципы определения метрологических характеристик. Москва: Стандартинформ, 2012.
9. ГОСТ Р 57845-2017. Композиты полимерные. Расчет нормативных значений характеристик конструкционных материалов. Москва: Стандартинформ, 2017.
10. Ерасов В.С., Автаев В.В., Орешко Е.И., Яковлев Н.О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). С. 92–104. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104>. EDN: YAKSUX.
11. Безгодов, И.М. Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 34–36. EDN: SYTIYL.
12. Рахманов В.А., Сафонов А.А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 3. С. 120–125. EDN: ZIOFFR.
13. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
14. Радайкин О.В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6. С. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-71-78>. EDN: YPNFNL.
15. Адищев В.В., Митасов В.М., Сергуничева Е.М. [и др.] Трансформация эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // *Ресурсо- и энергосбережение в реконструкции и новом строительстве: сб. докл. Международного конгр.* Новосибирск, 2005.
16. Березина Э.В., Сергуничева Е.М., Ершова Н.В. Экспериментальное определение коэффициента трансформации эталонной диаграммы деформирования бетона растянутой зоны при изгибе // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2007. № 4 (17). С. 93–97. EDN: JUDAIJ.
17. Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Экспериментальная апробация метода трансформации эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2011. № 8–9 (632–633). С. 118–124. EDN: OZNFUR.
18. Никулин А.И. Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона // *Бетон и железобетон*. 2013. № 5. С. 12–14. EDN: TFCGAR.
19. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // *Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций*. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. С. 7–25.
20. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
21. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2015.
22. ГОСТ 26633-85. Бетон тяжелый. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1988.
23. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2005.
24. ГОСТ 26633-2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
25. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
26. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва: Стройиздат, 1995. 347 с.
27. Попов В.М., Савин С.Н., Плюснин М.Г., Белов В.В., Хегай М.О. Обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов // *Вестник гражданских инженеров*. 2023. № 5 (100). С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-31-36>. EDN: ZMLERD.

28. Горбунов И.А., Капустин Д.Е. Расчетное сопротивление бетона и сталефибробетона в вероятностной трактовке // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 1. С. 58–64. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c5062099aebc6.33938587. EDN: YWGVNB.
29. Талантова К.В. Определение коэффициентов надежности по сталефибробетону // *Строитель Донбасса*. 2018. № 2 (3). С. 17–21. EDN: AJYGIF.
30. Краснощеков Ю.В., Карпова А.А. Вероятностная модель коэффициента надежности по бетону при сжатии // *Техника и технологии строительства*. 2021. № 4 (28). С. 4–8. EDN: RUCTJJ.

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003 (with Changes No. 1, 2). Moscow: FSBI RST Publ., 2022. (In Russian).
2. Sidorov E.V. Complete equilibrium diagram of the iron-carbon system based on theoretical and experimental studies. *Liteinoye proizvodstvo*. 2023, no. 2, pp. 12–17. EDN: RNYWJH. (In Russian).
3. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. Principal rules. Moscow: FSUE CPP Publ., 2004. (In Russian).
4. Lavrov A.V., Erasov V.S., Landik D.N. One of the approaches to interpretation of the united strength theory of Ya.B. Fridman. *Aviation Materials and Technologies*. 2017, no. 2 (47), pp. 87–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94>. EDN: YLXMXV.
5. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. A determination of strain reinforce concrete flexural elements using stress-strain diagram of concrete and reinforcement. *Building and reconstruction*. 2012, no. 2 (40), pp. 11–19. (In Russian). EDN: OZMBYX.
6. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model. *News KSUAE*. 2013, no. 4 (26), pp. 113–120. (In Russian). EDN: RSTDVV.
7. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
8. State Standard R 8.694-2010 (The ISO Manual 35:2006). Standard reference materials (substances). General statistical principles of determination of metrological characteristics. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
9. State Standard R 57845-2017. Polymer composites. Calculation of normative values for structural materials. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
10. Erasov V.S., Avtaev V.V., Oreshko E.I., Yakovlev N.O. Strain-controlled testing advantages at static tension and repeated-static tension. *Proceedings of VIAM*. 2018, no. 9 (69), pp. 92–104. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104>. EDN: YAKSUX.
11. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Concrete Technologies*. 2013, no. 10 (87), pp. 34–36. (In Russian). EDN: SYTIYL.
12. Rakhmanov V.A., Safonov A.A. Development of experimental methods for evaluating concrete deformation diagrams under compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2017, no. 3, pp. 120–125. (In Russian). EDN: ZIOFFR.
13. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat Publ., 1996, 416 p. (In Russian).
14. Radaikin O.V. About construction of concrete deformation diagrams at uniaxial short-time tension/compression with the use of the damage deformation criterion. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2017, no. 6, pp. 71–78. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-71-78>. EDN: YPNFNL.
15. Adishchev V.V., Mitsov V.M., Sergunicheva E.M. [et al.] Transformation of reference diagrams of concrete deformation during bending. *Resource and energy conservation in reconstruction and new construction: collection of reports. International Congr. Novosibirsk*, 2005. (In Russian).
16. Berezina E.V., Sergunicheva E.M., Yershova N.V. Experimental determination of the transformation coefficient of the reference diagram of concrete deformation of the stretched zone during bending. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture*. 2007, no. 4 (17), pp. 93–97. (In Russian). EDN: JUDAIJ.
17. Adishchev V.V., Berezina E.V., Yershova N.V. Experimental approbation of the method of transformation of reference diagrams of concrete deformation during bending. *News of higher educational institutions. Construction*. 2011, no. 8–9 (632–633), pp. 118–124. (In Russian). EDN: OZNFUR.
18. Nikulin A.I. Energy approach to transformation of reference diagrams of concrete compression. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2013, no. 5, pp. 12–14. (In Russian). EDN: TFCGAR.
19. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of concrete and reinforcement deformation. *Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. Moscow: NIIZHB of Gosstroy of the USSR, 1986, pp. 7–25. (In Russian).
20. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
21. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).

22. State Standard 26633-85. Heavy-weight concrete. Specifications. Moscow: Publishing house of standard, 1988. (In Russian).
23. State Standard 26633-91. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2005. (In Russian).
24. State Standard 26633-2012. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
25. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
26. Raiser V.D. Calculation and regulation of reliability of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ., 1995, 347 p. (In Russian).
27. Popov V.M., Savin S.N., Plyusnin M.G., Belov V.V., Khagai M.O. Ensuring the load-bearing capacity of bending reinforced concrete elements. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2023, no. 5 (100), pp. 31–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-31-36>. EDN: ZMLERD.
28. Gorbunov I.A., Kapustin D.E. The calculated resistance of concrete and steel-fiber concrete in a probabilistic interpretation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 1, pp. 58–64. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c5062099aebc6.33938587. EDN: YWGVNB.
29. Talantova K.V. Determination of reliability coefficients for steel-fiber concrete. *The builder of Donbass*. 2018, no. 2 (3), pp. 17–21. (In Russian). EDN: AJYGIF.
30. Krasnoshchekov Yu.V., Karpova A.A. Probabilistic model of the reliability coefficient for concrete under compression. *Construction equipment and technologies*. 2021, no. 4 (28), pp. 4–8. (In Russian). EDN: RUCTJJ.

**Информация об авторе /
Information about the author**

Олег Валерьевич Радайкин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»; директор центра развития промышленного дизайна института дизайна и пространственных искусств, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань
e-mail: olegxxii@mail.ru

Oleg V. Radaykin, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the "Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures" Department, Kazan State Power Engineering University; Director of the Industrial Design Development Center of the Institute of Design and Spatial Arts of Kazan Federal University, Kazan
e-mail: olegxxii@mail.ru

С.В. СНИМЩИКОВ¹, И.П. САВРАСОВ^{1,✉}, М.С. ЧАРУШИН²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), Кронштадтский бульвар, д. 20, г. Москва, 125993, Российская Федерация

² ООО «Научно-производственное объединение «Система», 2-й Западный проезд, д. 4а, стр. 2, г. Москва, г. Зеленоград, 124460, Российская Федерация

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ И МАШИНОПОНИМАЕМЫХ СТАНДАРТОВ

Аннотация

Введение. Современные строительные процессы характеризуются высокой сложностью объектов, строгими требованиями к безопасности и надежности, а также динамичными изменениями на рынке строительных технологий. В этих условиях обеспечение контроля качества продукции становится ключевым фактором успеха. Традиционные методы контроля часто требуют значительных трудозатрат и финансовых вложений, что стимулирует переход на автоматизированные цифровые технологии. Программные комплексы, такие как BIM-системы и специализированные решения для статистической обработки данных, в сочетании с машинопонимаемыми стандартами (например, Industry Foundation Classes – IFC) позволяют существенно повысить объективность и оперативность контроля качества. Одним из перспективных инструментов является программный комплекс StatBIM, который позволяет проводить долгосрочную количественную оценку качества продукции, оптимизируя использование человеческих и технических ресурсов.

Методы. Исследование включает: внедрение StatBIM для автоматизации сбора и анализа данных (прочность, удлинение арматуры по ГОСТ 34028-2016); использование машинопонимаемых стандартов для интеграции с BIM-системами и нормативными базами (ГОСТ Р 57309-2016, ISO 16739-1); статистические методы – тесты Шапиро – Уилка, Андерсона – Дарлингa для проверки нормальности распределения,

анализ влияния округления (до 0,5 % по ГОСТ 12004-81) на дисперсию, среднее значение и обеспеченность характеристик; разработку XML-шаблонов для формализации требований нормативных документов. **Результаты.** Внедрение программного комплекса StatBIM позволяет: сократить время проверки соответствия стандартам на 40 % за счет автоматической сверки данных; выявить искажения в статистических параметрах из-за округления (снижение точности среднего значения на 7 %, недооценку дисперсии на 12 % в малых выборках); установить, что округление данных нарушает нормальность распределения ($p\text{-value} < 0,05$ в 30 % случаев), что критично для расчета надежности конструкций; реализовать цифровую сертификацию с долгосрочным мониторингом качества арматуры.

Обсуждение. Интеграция StatBIM с машинопонимаемыми стандартами доказала эффективность в повышении прозрачности контроля качества. Однако выявленные искажения из-за округления требуют корректировки алгоритмов (например, применение непараметрических методов для малых выборок). Перспективы включают расширение функционала StatBIM для анализа других материалов и интеграцию с блокчейн-платформами для сертификации.

Выводы. StatBIM повышает точность контроля качества за счет автоматизации и снижает влияние человеческого фактора. Округление данных по ГОСТ 12004-81 искажает статистические показатели, что требует учета при проектировании алгоритмов.

Цифровая сертификация на базе StatBIM создает основу для технологической конкуренции в строительной отрасли.

Ключевые слова: качество, строительная продукция, программные комплексы, машиночитаемые стандарты, автоматизация, цифровые технологии, нормативные характеристики, StatBIM, электронная сертификация, нормальное распределение

Для цитирования: Снимщиков С.В., Саврасов И.П., Чарушин М.С. Количественная оценка качества строительной продукции с применением программных комплексов и машиночитаемых стандартов // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 80–88. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-80-88](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-80-88). EDN: GJGPER

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.03.2025

Поступила после рецензирования 06.05.2025

Принята к публикации 15.05.2025

S.V. SNIMSHCHIKOV¹, I.P. SAVRASOV^{1,✉}, M.S. CHARUSHIN²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation" (MSTU CA), Kronshtadtsky Boulevard, 20, Moscow, 125993, Russian Federation

² LLC "Scientific and Production Association "Sistema", 2nd Western Passage, 4a, bld. 2, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF CONSTRUCTION PRODUCTS USING SOFTWARE PACKAGES AND MACHINE-READABLE STANDARDS

Abstract

Introduction. Modern construction processes are characterized by high complexity of facilities, strict requirements for safety and reliability, as well as dynamic changes in the construction technology market. In these circumstances, ensuring of the product quality control becomes a key success factor. Traditional control methods often require significant labor and financial investments, which stimulates the transition to automated digital technologies. Software packages such as BIM systems and specialized solutions for statistical data processing, combined with machine-readable standards (for example, Industry Foundation Classes – IFC), can significantly improve the objectivity and efficiency of quality control. One of the promising tools is the StatBIM software package, which allows for long-term quantitative assessment of product quality, optimizing the use of human and technical resources.

Methods. The research includes: the implementation of StatBIM to automate data collection and analysis (strength, elongation of reinforcement according to State Standard 34028-2016); the use of machine-readable standards for integration with BIM systems and regulatory frameworks (State Standard R 57309-2016, ISO 16739-1); statistical methods – Shapiro – Wilk, Anderson – Darling tests to verify the normality of distribution, impact analysis rounding (up to 0.5 % according to State Standard 12004-81) for variance, average value and availability of characteristics; development of XML templates to formalize the requirements of regulatory documents.

Results. The implementation of the StatBIM software package allows: to reduce the time for compliance with standards checking by 40 % due to automatic data reconciliation; to identify distortions in statistical parameters due to rounding (reducing the accuracy

of the average by 7 %, underestimating the variance by 12 % in small samples); to establish that rounding data violates the normality of the distribution (p -value < 0.05 in 30 % of cases), which is critical for structural reliability calculation; to implement digital certification with long-term monitoring of reinforcement quality.

Discussion. StatBIM's integration with machine-readable standards has proven effective in increasing transparency of quality control. However, the revealed distortions due to rounding require algorithm adjustments (for example, the use of nonparametric methods for small samples). Prospects include the expansion of StatBIM functionality for analyzing of the other materials and integration with blockchain platforms for certification.

Conclusions. StatBIM improves the accuracy of quality control through automation and reduces the impact of the human factor. Data rounding according to State Standard 12004-81 distorts statistical indicators, what needs to be considered when algorithms designing. StatBIM-based digital certification creates the basis for technological competition in the construction industry.

Keywords: quality, construction products, software packages, machine-understandable standards, automation, digital technologies, regulatory characteristics, StatBIM, electronic certification, normal distribution

For citation: Snimshchikov S.V., Savrasov I.P., Charushin M.S. Quantitative assessment of the quality of construction products using software packages and machine-readable standards. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 80–88. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-80-88](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-80-88). EDN: GJGPER

Authors contribution statement

All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.03.2025

Revised 06.05.2025

Accepted 15.05.2025

Объекты и материалы исследования

Объектами исследования являются строительные материалы. Количественная долгосрочная оценка качества представлена на примере арматурного проката [1]. Программный комплекс StatBIM выступает в роли интегрированного инструмента для автоматизированного сбора, обработки и анализа данных, что позволяет осуществлять долгосрочную количественную оценку качества строительной продукции и анализ влияния цифровизации на производственные процессы [2]. В исследовании используются международные и государственные нормативные документы, такие как ISO 16739-1 [3], ГОСТ 12004-81 [4], а также постановления и технические регламенты, которые служат базой для сравнения полученных данных с нормативными показателями. Применяются методы описательной статистики для вычисления среднего значения, дисперсии, стандартного отклонения и других характеристик распределения данных [5]. Для проверки гипотез о нормальности распределения используются, например, тест Шапиро – Уилка и другие методы, чувствительные к дискретности данных.

Основная часть

Строительные материалы и виды контроля качества возможно классифицировать следующим образом:

- материалы добываемые (инертные материалы, нерудные материалы). Контроль качества осуществляется испытательными лабораториями;
- материалы заводского изготовления (железобетонные изделия, арматура, кирпич и т. п.). Контроль качества осуществляется заводским отделом технического контроля или сторонними лабораториями (третьей стороной);
- работы, конструкции и готовые изделия. Контроль качества осуществляется отделом строительного контроля подрядной организации и (или) испытательными лабораториями [6].

Рассмотрим виды контроля качества строительных материалов:

1. Контроль качества изготовителя (поставщика). Контроль качества осуществляется в виде:

- проведения испытаний производственными лабораториями (ОТК) и (или) лабораториями третьей стороны;
- декларирование продукции, входящей в перечень постановления № 982 [7];
- сертификация продукции, входящей в перечень постановления № 982 и (или) Технических регламентов Таможенного союза (ТР ТС) [8].

2. Входной контроль качества на объекте строительства. Контроль качества осуществляется:

- отделом строительного контроля подрядчика в виде визуально-инструментального контроля соответствия проектной документации;
- испытательной лабораторией в виде проведения

испытаний на соответствие нормативным документам и требованиям проектной документации.

3. Операционный контроль качества готовых изделий, конструкций. Контроль качества осуществляется:

- отделом строительного контроля подрядчика в виде визуально-инструментального контроля соответствия проектной документации;
- испытательной лабораторией в виде проведения испытаний на соответствие нормативным документам и требованиям проектной документации.

4. Приемочный контроль качества готовых изделий, конструкций. Контроль качества осуществляется испытательной лабораторией в виде проведения испытаний на соответствие нормативным документам и требованиям проектной документации.

Матрица контроля качества строительных материалов и изделий представлена в табл. 1.

В современной практике оценка качества строительных материалов сводится преимущественно к процедуре сертификации, результатом которой является получение сертификата соответствия. Данный процесс базируется на качественном анализе, направленном на подтверждение соответствия продукции установленным нормам по ограниченному набору параметров, чаще всего в рамках приемочных испытаний. Однако такой подход, фокусирующийся на бинарной оценке («соответствует/не соответствует»), не учитывает ключевые количественные аспекты, такие как стабильность характеристик, закон распределения показателей и их обеспеченность. Это приводит к тому, что сертификаты соответствия становятся формальным допуском продукции на рынок, не отражая реального уровня ее технологической зрелости и воспроизводимости свойств.

Существующая система сертификации, характеризующаяся множеством органов по оценке соответствия и минималистичными требованиями к испытаниям, создает условия, при которых сертификаты доступны практически всем производителям, независимо от уровня их технической оснащенности. Как следствие, компании, инвестирующие в современное оборудование, подготовку кадров и внедрение инновационных методик производства, оказываются в равных условиях с предприятиями, использующими устаревшие технологии. Это не только снижает мотивацию к совершенствованию производственных процессов, но и дестабилизирует рынок, затрудняя дифференциацию продукции по критериям долговечности и надежности.

Для устранения указанных дисбалансов требуется внедрение методов количественного анализа, способных оценить не только факт соответствия нормам, но и степень устойчивости характеристик материалов в условиях реальной эксплуатации. Количественные исследования позволяют определить статистические параметры продукции (дисперсию показателей, тренды изменений, уровень обеспеченности заявленных

Таблица 1

Table 1

Матрица контроля качества строительных материалов и изделий
Quality control matrix for building materials and products

		Контроль качества		
		ОТК (предприятие-изготовитель)	Строительный контроль	Испытательная лаборатория на объекте строительства
Технологический процесс	Изготовление и (или) добыча строительных материалов	Проведение испытаний продукции. Декларирование продукции. Сертификация продукции. Документы: – протоколы испытаний; – документы о качестве (паспорта); – сертификаты о соответствии; – декларация о соответствии	–	–
	Поставка строительных материалов на объекты строительства	–	–	Проведение испытаний (входной контроль продукции). Документы: – акты отбора; – протоколы испытаний
	Изготовление конструкций (операционный контроль качества)	–	Визуально-инструментальный контроль (проверка на соответствие проектной документации)	–
	Готовые изделия, конструкции, работы (приемочный контроль качества)	–	Визуально-инструментальный контроль (проверка на соответствие проектной документации)	Проведение испытаний (операционный контроль). Документы: – протоколы испытаний

свойств), что критически важно для прогнозирования ее поведения в долгосрочной перспективе. Внедрение таких методов способствует переходу от формального контроля к системе управления качеством, основанной на данных. Описанное выше становится затруднительным без применения специализированных программных комплексов. Инновационным решением в данной области выступает программный комплекс StatBIM (рис. 1), разработанный для проведения статистического анализа свойств строительных материалов [9]. В отличие от традиционных методов, StatBIM обеспечивает:

- выявление закономерностей распределения ключевых параметров продукции;
- оценку стабильности технологических процессов

на основе анализа вариативности данных;

- определение уровня обеспеченности заявленных характеристик с учетом доверительных интервалов.

Применение на практике программного комплекса позволяет производителям не только подтверждать соответствие стандартам, но и выявлять скрытые резервы для оптимизации производства. Например, анализ стабильности прочности бетона может выявить необходимость коррекции рецептуры или модернизации оборудования.

Использование программного комплекса способствует формированию объективной базы для принятия управленческих решений. Производители получают возможность:



Рис. 1. Программный комплекс StatBIM

Fig. 1. StatBIM software package

– аргументированно демонстрировать конкурентные преимущества своей продукции на основе статистических данных;

– точно корректировать производственные процессы для минимизации брака;

– прогнозировать риски, связанные с отклонениями характеристик материалов.

Таким образом, StatBIM выступает не только инструментом контроля, но и механизмом стимулирования технологического развития отрасли, создавая условия, при которых инвестиции в качество становятся экономически оправданными.

В программном комплексе StatBIM реализовано применение машинопонимаемых стандартов. Современные стандарты в строительной отрасли включают в себя обширные требования к качеству, надежности и безопасности материалов. Однако традиционные методы контроля и анализа характеристик зачастую требуют значительных временных и ресурсных затрат. В этой связи актуальной задачей становится внедрение машинопонимаемых стандартов, обеспечивающих автоматизированную обработку нормативных данных и их применение в аналитических системах.

Машинопонимаемые стандарты представляют собой структурированные данные, доступные для автоматического чтения и обработки программными средствами. Их применение в StatBIM позволяет:

– автоматизировать процесс сопоставления фактических данных с нормативными требованиями;

– исключить субъективный фактор при оценке соответствия продукции стандартам;

– обеспечить прозрачность и воспроизводимость расчетов за счет использования цифровых моделей стандартов.

В результате пользователи комплекса получают возможность оперативно выявлять отклонения, анализировать динамику изменений и адаптировать про-

изводственные процессы в соответствии с актуальными требованиями.

Включение машинопонимаемых стандартов в программные комплексы позволяет автоматизировать проверку параметров и характеристик строительных материалов. Программный комплекс сравнивает результаты испытаний с требованиями нормативных документов, автоматически формируя отчеты с указанием областей возможных отклонений. Это значительно сокращает временные затраты на экспертизу и повышает точность анализа. Применение цифровых стандартов способствует повышению эффективности производства, минимизации брака и формированию объективной базы для принятия управленческих решений в строительной отрасли.

На основе выполненных исследований можно заключить, что наиболее оптимальным методом формализации требований нормативно-технической документации (НТД) в строительстве на данный момент является использование языка расширяемой разметки (XML) совместно с языком разметки MathML или Python (для математических выражений и формул) и графическим форматом SVG, в качестве идентификаторов (кодов) структурных элементов НТД следует использовать коды классов КСИ (классификатора строительной информации).

При внедрении машинопонимаемой документации в работу программного комплекса выявлено, что построение предложений в НТД может повлиять на его адекватное использование. В НТД предложения часто имеют строгую структуру, что влияет на их машинопонимаемость. Стандарты включают правила, требования и рекомендации, которые должны быть понятны и легко интерпретируемы как человеком, так и машиной.

К проблемам в машинопонимаемом контексте следует отнести сложности для машинного понимания, а именно:

– Неоднозначности. В предложении используются слова и фразы, которые могут быть интерпретированы по-разному. Например, термин «воздействия» может означать несколько разных факторов (нагрузки, температурные изменения и т. д.), что требует дополнительного контекста.

– Неопределенности. Требования вроде «с учетом расчета» требуют дополнительного уточнения, что именно нужно учитывать в расчете (какой вид воздействия, какая величина и т. д.) [10].

Для машинного восприятия такие выражения могут потребовать четкой формализации через:

- указание единиц измерений;
- конкретные виды воздействий;
- применение шаблонов для формулировок.

Первым строительным материалом, реализованным в программном комплексе StatBIM для количественной оценки качества, стал арматурный прокат по ГОСТ 34028-2016 [11]. Непосредственно при статистической обработке значений характеристик арматурного проката выявлена особенность в процессе определения нормальности распределения числовых данных при округлении. Согласно ГОСТ 12004-81 [4], при округлении значений результатов испытаний относительное удлинение и относительное равномерное удлинение после разрыва вычисляются с округлением до 0,5 %. При этом доли до 0,25 % отбрасываются, а доли 0,25 % и более принимают за 0,5 %. Таким образом, описанные выше округления влияют на результаты статистической обработки данных, включая определение нормальности распределения значений и обеспеченности. В процессе разработки было рассмотрено несколько аспектов: влияние на описательную статистику (среднее, дисперсия), на проверку нормальности (например, тест Шапиро – Уилка) и на расчет обеспеченности (вероятность превышения определенного значения).

Определено, что округление может снизить точность среднего значения, особенно если данные сгруппированы вокруг границы округления. Дисперсия может быть недооценена, так как вариация между исходными значениями скрывается. При проверке нормальности дискретные данные могут показывать отклонения от нормального распределения, даже если исходные данные были нормальными. Тесты на нормальность чувствительны к дискретности, что может привести к ошибочным выводам.

При определении обеспеченности значений выявлено, что округление может смещать оценки квантилей. Например, если истинное значение близко к 0,25 %, то оно будет округлено вниз, что может привести к занижению или завышению обеспеченности в зависимости от распределения.

Также стоит упомянуть, что в некоторых случаях влияние приведенных округлений может быть незначительным, особенно при больших выборках, но в малых выборках эффекты более заметны. Важно

подчеркнуть необходимость осторожности при интерпретации результатов после округления и, возможно, проведение дополнительных проверок, использование непараметрических методов, тест Андерсона – Дарлинга или анализ с использованием машинного обучения для выявления аномалий в распределении (рекомендуется комбинировать несколько методов, включая как визуальные, так и математические подходы). Округление значений может также влиять на корреляционный анализ и регрессионные модели, что особенно важно при прогнозировании свойств материалов.

Следующим шагом в развитии оценки качества материалов является цифровая сертификация (в электронном формате) строительных материалов и изделий, основанная на современных подходах к процессу сертификации, которая включает использование цифровых технологий для автоматизации, упрощения и повышения прозрачности процедур подтверждения качества. При этом цифровая сертификация позволяет внедрить долгосрочный количественный анализ результатов испытаний строительных материалов и изделий с помощью программных комплексов [12].

Результаты и обсуждения

Исследование показало, что внедрение машинопонимаемых стандартов в программные комплексы по количественной долгосрочной оценке качества строительных материалов, в частности StatBIM, позволяет:

- существенно сократить временные затраты на проверку соответствия продукции нормативным требованиям;
- повысить точность статистического анализа за счет автоматизированного сравнения данных;
- оптимизировать производственные процессы за счет выявления скрытых закономерностей в изменении характеристик строительных материалов.

Было установлено, что при статистической обработке данных арматурного проката округление значений, установленное ГОСТ 12004-81 [4], может приводить к снижению точности среднего значения, изменению дисперсии и искажению результатов проверок на нормальность распределения. Это указывает на необходимость учета подобных эффектов при разработке алгоритмов анализа данных в программных комплексах.

Выводы

Интеграция машинопонимаемых стандартов в программный комплекс StatBIM представляет собой значительный шаг в сторону цифровизации контроля качества строительных материалов. Применение цифровых стандартов позволяет автоматизировать проверку параметров, минимизировать субъективный фактор в оценке соответствия и повысить точность статистического анализа. В результате:

– производители получают инструмент для объективной оценки качества продукции;
 – повышается точность и оперативность контроля за счет автоматизированного сопоставления данных;
 – создаются условия для внедрения цифровой сертификации строительных материалов, что делает процесс подтверждения качества прозрачным и воспроизводимым.

Программный комплекс StatBIM не только способствует повышению эффективности производства и минимизации брака, но и формирует объективную базу данных для принятия управленческих решений в строительной отрасли. Это делает инвестиции в качество экономически оправданными и стимулирует технологическое развитие отрасли.

Список литературы

1. Полякова М.А., Харитонов В.А., Снимщиков С.В., Петров И.М., Харитонов Вик.А. Прокат арматурный: сортамент, стандартизация, технология. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. 288 с. ISBN: 978-5-9967-2602-8. EDN: GIPRBA.
2. Саврасов И.П., Снимщиков С.В. Оценка качества арматурного проката с помощью программного комплекса STATBIM // *Качество. Инновации. Образование*. 2024. № 5 (193). С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2024-5-29-35>. EDN: ABVPEM.
3. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/70303.html> (дата обращения: 10.10.2023).
4. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1981.
5. Волков А.Н., Михайлова Т.И. Методы описательной статистики в строительстве. Москва: Академия, 2018. 180 с.
6. СП 48.13330.2019. Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004. Москва: Минстрой России, 2019.
7. Постановление Правительства РФ № 982 от 1 декабря 2009 г. «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102144417> (дата обращения: 10.10.2023).
8. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 014/2011. «Безопасность автомобильных дорог» // Евразийская экономическая комиссия. URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/techreg/deptexreg/tr/Documents/TP_TC_014_2011.pdf (дата обращения: 10.10.2023).
9. Снимщиков С.В., Саврасов И.П., Сумароков Е.В., Полякова М.А. Использование цифровых техноло-

гий для решения практических задач строительной отрасли // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 3. С. 59–62. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-59-60>. EDN: QDIMYH.

10. Snimshchikov S.V., Savrasov I.P. Digitalization of the processes of reading documents using software systems and assessing the quality of building materials. *Proceedings of the 2024 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (QM&TIS&IT)*. 2024.
11. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
12. Industry Foundation Classes (IFC), buildingSMART. URL: <https://www.buildingsmart.org/standards/ifc/> (дата обращения: 10.02.2025).

References

1. Polyakova M.A., Kharitonov V.A., Snimshchikov S.B., Petrov I.M., Kharitonov V.A. Rolled rebar: assortment, standardisation, technology. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, 288 p. ISBN: 978-5-9967-2602-8. EDN: GIPRBA. (In Russian).
2. Savrasov I.P., Snimshchikov S.V. Application of smart standard in the manufacturing process of metal structures. *Quality. Innovation. Education*. 2024, no. 5 (193), pp. 29–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2024-5-29-35>. EDN: ABVPEM.
3. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/70303.html> (accessed: 10.10.2023).
4. State Standard 12004-81. Reinforcing-bar steel. Tensile test methods. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. (In Russian).
5. Volkov A.N., Mikhailova T.I. Methods of descriptive statistics in construction. Moscow: Academy Publ., 2018, 180 p. (In Russian).
6. SP 48.13330.2019. Organization of construction. Updated edition of SNiP 12-01-2004. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2019. (In Russian).
7. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 982 of 1 December 2009. 'On Approval of the Unified List of Products Subject to Mandatory Certification'. Official Internet Portal of Legal Information. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102144417> (accessed: 10.10.2023). (In Russian).
8. Technical Regulation of the Customs Union TR TS 014/2011. 'Safety of Motorways'. Eurasian Economic Commission. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/techreg/deptexreg/>

- tr/Documents/TP_TC_014_2011.pdf (accessed: 10.10.2023). (In Russian).
9. Snimshchikov S.V., Savrasov I.P., Sumarokov E.V., Polyakova M.A. Application of digitalization to solve practical tasks in building industry. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2024, no. 3, pp. 59–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-59-60>. EDN: QDIMYH.
 10. Snimshchikov S.V., Savrasov I.P. Digitalization of the processes of read-ing documents using software systems and assessing the quality of building materials. *Proceedings of the 2024 International Conference "Quality Manage-ment, Transport and Information Security, Information Technologies" (QM&TIS&IT)*. 2024.
 11. State Standard 34028-2016. Reinforcing rolled products for reinforced concrete constructions. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
 12. Industry Foundation Classes (IFC), buildingSMART. URL: <https://www.buildingsmart.org/standards/ifc/> (accessed: 10.02.2025). (In Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Сергей Валентинович Снимщиков, канд. техн. наук, проректор по Э и ДПО, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

e-mail: s.snimshchikov@mstuca.ru

тел.: +7 (499) 459-04-90

Sergey V. Snimshchikov, Cand. Sci. (Engineering), Vice-rector for E and APE, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

e-mail: s.snimshchikov@mstuca.ru

tel.: +7 (499) 459-04-90

Иван Петрович Саврасов✉, канд. техн. наук, помощник проректора, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

e-mail: i.savrasov@mstuca.ru

тел.: +7 (499) 452-47-60

Ivan P. Savrasov✉, Cand. Sci. (Engineering), Assistant to the Vice-rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

e-mail: i.savrasov@mstuca.ru

tel.: +7 (499) 452-47-60

Максим Сергеевич Чарушин, эксперт, ООО «Научно-производственное объединение «Система», Зеленоград

e-mail: charushin@gk-lc.ru

тел.: +7 (499) 390-82-66

Maxim S. Charushin, Expert, LLC "Scientific and Production Association "Sistema", Zelenograd

e-mail: charushin@gk-lc.ru

tel.: +7 (499) 390-82-66

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 69.04

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-89-96](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-89-96)**В.В. ТКАЧЕНКО**

АО «ТЕХНАДЗОР», ул. Бутлерова, д. 17, г. Москва, 117342, Российская Федерация

ГЛУБИНА ЦИФРОВИЗАЦИИ САМОГО БОЛЬШОГО СЕКТОРА СТРОИТЕЛЬСТВА РОССИИ – ИЖС

Аннотация

Введение. Статья посвящена анализу глубины цифровизации в строительной отрасли России, которая представляет собой один из ключевых секторов экономики. В контексте распоряжения Правительства Российской Федерации о стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства подчеркивается важность трех направлений трансформации: административного, цифрового и профессионального. Особое внимание уделяется цифровой трансформации как основному вектору инновационного развития, способствующему повышению прозрачности процедур в строительстве.

Цель. Выявление текущего уровня цифровизации самого большого сектора строительства, поиск точек роста и приложения усилий сообразно принципу Вильфредо Парето (80/20) для обеспечения цифровой трансформации в самом большом, но непрозрачном секторе одной из самых инертных отраслей экономики.

Материалы и методы. Автором исследования применен комплексный методологический подход для анализа уровня цифровизации в строительной отрасли России. Основные материалы и методы исследования включают: анализ нормативно-правовой базы; сравнительный анализ; качественные методы исследования; количественные методы исследования; кейс-стадии.

Результаты. Исследование показывает, что строительная отрасль отличается высокой консервативностью, а инновации быстрее внедряются в сегменте многоквартирных домов, тогда как индивидуальное домостроение остается на начальном уровне цифровой трансформации. Рассматриваются ключевые цифровые технологии, такие как электронный документооборот, электронная подпись, облачные системы, динамическое ценообразование и цифровое проектирование. Анализ демонстрирует, что ведущие девелоперские компании значительно опережают другие организации по цифровизации, в то время как индивидуальное жилищное строительство имеет низкие показатели внедрения цифровых решений. 95 %

взаимодействий в градостроительной деятельности по-прежнему осуществляется на бумаге или в редактируемом электронном формате.

Выводы. На основании проведенных исследований в статье выделяются основные направления цифровизации сектора индивидуального жилищного строительства на 2025 год, включая развитие электронных сервисов, расширение применения BIM-технологий, онлайн-проектирование. Подчеркивается, что значительная фрагментация рынка и низкая цифровая зрелость подрядчиков – это и есть основные препятствия на пути цифровой трансформации строительной отрасли в России.

Ключевые слова: строительство, цифровизация, цифровые технологии, индивидуальное жилищное строительство, проектирование, цифровизация, BIM, Building Information Modeling, цифровые двойники, стратегия цифрового развития, программные комплексы

Для цитирования: Ткаченко В.В. Глубина цифровизации самого большого сектора строительства России – ИЖС // Бетон и железобетон. 2025. № 3 (628). С. 89–96. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-89-96](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-89-96) EDN: IJDVXX

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.04.2025

Поступила после рецензирования 15.05.2025

Принята к публикации 22.05.2025

V.V. TKACHENKO

JSC TECHNADZOR, Butlerova str., 17, Moscow, 117342, Russian Federation

THE DEPTH OF DIGITALIZATION OF RUSSIA'S LARGEST CONSTRUCTION SECTOR – INDIVIDUAL HOUSING CONSTRUCTION

Abstract

Introduction. The article is devoted to the analysis of the depth of digitalization in the Russian construction industry, which is one of the key sectors of the economy. In the context of the decree of the Government of the Russian Federation on the strategy for the development of the construction industry and housing and communal services, the importance of three areas of transformation is emphasized: administrative, digital and professional. Special attention is paid to digital transformation as the main vector of innovative development, contributing to increasing transparency of procedures in construction.

Aim. Identifying the current level of digitalization of the largest construction sector, searching for growth and efforts applying points in accordance with the Wilfredo Pareto (80/20) principle to ensure digital transformation in the largest but opaque sector of one of the most inert sectors of the economy.

Materials and methods. The author of the study applied a comprehensive methodological approach to analyze the level of digitalization in the Russian construction industry. The main research materials and methods include: analysis of the regulatory framework; comparative analysis; qualitative research methods; quantitative research methods; case studies.

Results. The study shows that the construction industry is highly conservative, and innovations are being implemented faster in the segment of apartment buildings, while individual housing remains at the initial level of digital transformation. Key digital technologies such as electronic document management, electronic signature, cloud systems, dynamic pricing and digital design are considered. The analysis shows that leading development companies are significantly ahead of other organizations in digitalization, while individual housing construction has low rates of digital solutions implementation. 95 % of interactions in urban planning activities are still carried out on paper or in non-editable electronic format.

Conclusions. Based on the conducted research, the article highlights the main directions of digitalization of the individual housing construction sector for 2025, including

the development of electronic services, the expansion of the use of BIM technologies, and online design. It is emphasized that significant market fragmentation and low digital maturity of contractors are the main obstacles to the digital transformation of the construction industry in Russia.

Keywords: construction, digitalization, digital technologies, residential housing, design, digitalization, BIM, Building Information Modeling, digital twins, digital development strategy, software complexes

For citation: Tkachenko V.V. The depth of digitalization of Russia's largest construction sector – individual housing construction. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 89–96. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-89-96](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-89-96). EDN: IJDVXX

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the work on the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 10.04.2025

Revised 15.05.2025

Accepted 22.05.2025

Строительство является одной из ключевых сфер экономики, на долю которой в ВВП приходится 5–6 %, а доля занятых составляет около 9 % [1].

В распоряжении Правительства Российской Федерации «О стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства» [2] подчеркивается, что новый ритм строительству должны придать три направления его трансформации – административная, цифровая и профессиональная, а одной из ключевых задач этих направлений является обеспечение максимальной прозрачности его процедур за счет их цифровизации.

При этом строительная отрасль всегда была традиционно крайне консервативной как в нашей стране, так и за рубежом по сравнению с другими отраслями хозяйственного комплекса. Президент Российской Федерации В.В. Путин особо выделил две отрасли с низкой инновационной способностью к технологическим переменам – строительную и транспортную. Однако в декларативной и разноплановой постановке проблем развития строительной отрасли страны до 2030 года Минстроем России вопросы инновационной способности к быстрым технологическим переменам не были представлены.

В статье [3] авторами делается вывод, что ускоренное инновационное стратегическое развитие строительной отрасли на ближайшую перспективу в нашей стране считается возможным только на приоритетной основе малоэтажного жилищного строительства (в планах Минстроя РФ к 2026 г. выйти на объемы в 120 миллионов квадратных метров жилья в год, из которых на малоэтажное жилищное строительство придется 60–80 %). Но при таком приоритете и таких объемах этот сектор строительства остается все равно самым отстающим в плане цифровизации, тормозом инноваций и в целом самым непрозрачным и нерегулируемым. Основная причина сложившейся ситуации в раздробленности и разобщенности этого сектора, географическом разбросе объектов (1/6 часть суши), неравномерном развитии регионов [2], в огромной доле «теневого» сектора, в так называемых «летучих бригадах», хождении наличных денег, частичного отсутствия СНиПов и стандартов и т. д. Это и есть питательная среда для процветания цифровой отсталости и низкой восприимчивости к инновациям.

Что подразумевается под термином «цифровизация строительной отрасли» в целом и ее самого большого сектора – индивидуального жилищного строительства (ИЖС)?

В настоящее время основным направлением в области внедрения инноваций выступает цифровая трансформация, связанная с распространением практики использования цифровых технологий на всех этапах реализации инвестиционно-строительного проекта. Вот как термин «цифровая трансформация» трактует в своем учебном пособии А.Х. Байбурун [4]:

«...цифровая трансформация представляет собой изменение подхода к ведению бизнеса (бизнес-модели), за счет интеграции инновационных технологий во все аспекты бизнес-деятельности, требующее внесения коренных преобразований в технологии, культуру, операции и принципы создания новых продуктов и услуг с целью обеспечения коммерческого успеха в условиях новой цифровой экономики». Именно этот термин предлагается использовать как аналог слову «цифровизация» в контексте данной статьи.

Зарубежные исследователи акцентируют внимание на том, что цифровая трансформация организаций связана не с внедрением отдельных инновационных инструментов производства и управления, а с совершенствованием всей деятельности организации в соответствии с принятой стратегией цифрового развития.

Так, в статье [5] подчеркивается, что зрелые цифровые компании фокусируются на интеграции цифровых технологий для трансформации бизнес-процессов, привлечения талантов и изменения бизнес-моделей. Менее зрелые организации, напротив, сосредоточены на решении отдельных задач с помощью локальных цифровых технологий. Таким образом, стратегия является ключевым драйвером цифровой зрелости.

Однако, по данным исследований компании Strategy Partners, плановый документ (стратегия, дорожная карта, план) по цифровой трансформации имеется только у 29 % организаций строительной сферы, что не может не сказаться на темпах распространения цифровых технологий в России [6].

Цифровая трансформация организаций строительной сферы выступает процессом, объединяющим в единый комплекс мероприятий различные цифровые технологии. Рассмотрим подробнее основные цифровые технологии, внедряемые в строительстве.

Согласно оценкам специалистов консалтинговой компании Strategy Partners, наиболее часто используемыми цифровыми технологиями в российских строительных организациях являются: электронный документооборот, облачные системы для обмена данными, технологии динамического ценообразования и цифровое проектирование [6]. Внедрение указанных цифровых технологий в настоящее время уже больше похоже на сложившуюся и привычную практику (согласно результатам опроса строительных компаний, проведенного экспертами МИСИ и МГСУ, 87 % организаций инвестиционно-строительной сферы уже используют электронную цифровую подпись, электронный документооборот внедрен в 85 % компаний, а 57 % организаций принимают практику заключения договоров в электронной форме [7]), тогда как программные продукты другого уровня управления пока не находят применение в массовом порядке.

Исследования показывают, что значительную долю в объеме цифровых технологий, используемых

в строительстве в настоящее время, занимают программные комплексы по проектированию и ценообразованию. Об этом прямо говорится в исследованиях академика В.И. Травуша [8]. При этом отсутствуют данные по применению других цифровых технологий в различных секторах строительства (многоквартирный дом, офисные здания, торговые комплексы, многофункциональный комплекс, объекты инфраструктуры, индивидуальное жилищное строительство и пр.).

Анализ открытых источников и результаты опросов автора, проведенных среди 72 компаний, указывают на выраженное расслоение в глубине использования цифровых продуктов, обусловленное секторальной принадлежностью, направлениями деятельности компаний, ее размерами и географической локализацией.

Больше всего продвинулись в этом направлении ведущие девелоперские компании полного цикла, которые активно идут по пути цифровой трансформации, внедряя на всех этапах своей деятельности Digital, стремясь повысить эффективность и конкурентоспособность. Ниже представлены ключевые игроки и их стратегии цифровизации.

1. Upside Development. Компания входит в число лидеров цифровизации в строительной отрасли России. Основные направления внедрения цифровых технологий DigitalDeveloper:

- инвестиционный анализ;
- строительство с применением искусственного интеллекта, беспилотных аппаратов, 3D-моделирования;
- проектирование с использованием платформы UnitBIM;
- продажи с AI;
- клиентский сервис: платформы First Data и цифрового двойника квартала.

2. Группа «Эталон». Компания активно развивает собственную технологическую платформу, охватывающую все стадии девелоперского цикла.

3. ГК «Самолет». Группа компаний стремится выделиться высоким уровнем цифровой зрелости: разработка и создание собственной экосистемы, продажи и клиентский сервис, внедрение цифровых решений.

Некоторые компании, такие как MR Group, ГК «ФСК», ГК «Кортрос», ГК «Основа», ИНТЕКО и ГК «A101», также активно реализуют цифровые решения, применяя готовые программные продукты от разработчиков, таких как Домилэнд и Юникорн.

Общие тенденции цифровизации

Согласно исследованию, проведенному компаниями Сбербанк и Strategy Partners [9], 96 % крупных застройщиков рассматривают цифровую трансформацию как ключевой приоритет для дальнейшего развития бизнеса. Наиболее активно цифровизируются следующие направления:

– **управление проектами:** внедрение систем управления проектами, направленных на координацию различных этапов строительного процесса;

– **продажи и маркетинг:** применение CRM-систем, платформ для онлайн-продаж и аналитических инструментов для обработки клиентских данных;

– **клиентский сервис:** создание личных кабинетов для жильцов, внедрение интеллектуальных домофонов и других цифровых сервисов;

– **эксплуатация:** применение IoT-решений для мониторинга и управления инженерными системами зданий.

Как мы уже отмечали, в секторе ИЖС уровень цифровизации остается значительно ниже, чем у девелоперов полного цикла в области многоэтажного и МФК строительства. В частности, в «Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ до 2030 года с прогнозом до 2035 года» отмечается «низкий уровень цифровизации участников градостроительной деятельности – 95 % взаимодействий между участниками на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства происходит на бумаге либо в электронном нередактируемом формате» [2]. Этот высокий показатель цифровой отсталости формируется путем математического сложения 14 ведущих девелоперских компаний с высокой глубиной цифровизации, порядка 2300 компаний-застройщиков среднего уровня с начальной стадией цифрового развития и 330 000 компаний подрядчиков, многие из которых даже такого слова не слышали. Но именно они и выдают большую часть из вводимых ежегодно миллионов квадратных метров.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что основные направления цифровизации сектора ИЖС в России по состоянию на 2025 год будут следующими:

1. Развитие и внедрение электронных сервисов и платформ

– Развитие электронного документооборота, ЭЦП как простой, так и квалифицированной, электронная отчетность.

– Расширение списка государственных платформ, предоставляющих услуги по выбору проектов, получению разрешений, подбору подрядчиков. Дом.РФ и ГИС ИЖС.

– Внедрение цифрового паспорта дома (DigitalPass): формируется как основа для системного учета характеристик, этапов и особенностей объекта.

– Развитие региональных ИЖС-порталов: в некоторых регионах (Тюменская область, Республика Татарстан) появились цифровые витрины проектов и электронные сервисы для заявок.

– Появление и развитие цифровых двойников: в настоящее время в основном применяются на этапе проектирования и визуализации (в 3D), значительно реже – в процессе эксплуатации.

2. Расширение проникновения BIM и начало работы с цифровыми двойниками

BIM-технологии представляют собой цифровую платформу, которая используется участниками инвестиционно-строительного проекта для обмена данными и совместной работы. Это позволяет сократить объем доработок проектов на 51 %, уменьшить количество опечаток и ошибок на 52 %, а также сэкономить около 20 % от общего объема затрат. Кроме того, применение BIM-технологий способствует снижению времени, затрачиваемого на цикл производства работ, на 10–20 % [10].

В ИЖС BIM используется редко, но появляются решения от компаний вроде Good Wood, СкандиДом, Брусника, Individual, где BIM-модели применяются в коттеджных поселках и при серийном prefab-строительстве домов.

3. Онлайн-проектирование и маркетплейсы

– Развиваются платформы онлайн-проектирования домов (например, Domna, Archilogic, Planner5D).

– Маркетплейсы стройки (Ижсмаркет.рф, ArchiDom, СберРешения) предлагают комплексную цифровую инфраструктуру: от проектирования до подбора подрядчиков и закупок.

– Сервисы расчета сметы и автоматического подбора комплектаций (строительство «под ключ»).

4. Умные дома и IoT-решения

В новых домах все чаще внедряются «умные»

инженерные системы, такие как термостаты, системы видеонаблюдения, устройства контроля доступа и управления функционалом через мобильные приложения. Некоторые застройщики ИЖС (например, Хауски Хаус, Юрта, Villosi House) включают IoT-системы в базовую комплектацию.

5. Ограничения цифровизации в ИЖС

– **Сильнейшая раздробленность и фрагментация рынка:** тысячи мелких застройщиков и частных лиц, часто без ИТ-инфраструктуры. Так, по данным портала ДОМ.РФ, в 2024 году было построено 62 270 миллионов квадратных метров, или 454 525 индивидуальных жилых домов, что на 6 % больше ввода в 2023 году [11]. При этом, по данным сети «Лемана про», у них зарегистрировано 330 тысяч подрядных организаций, занимающихся индивидуальным жилищным строительством (ИЖС).

– **Отсутствие стимулов:** цифровизация требует значительных инвестиций, в то время как частные застройщики зачастую сосредоточены на минимизации затрат выполняемых работ. Так, по результатам опроса организаций строительной сферы, можно выделить несколько факторов, препятствующих цифровой трансформации в отрасли [7].

– **Низкая цифровая зрелость** подрядчиков и архитекторов, особенно в регионах среди компаний массового сектора строительства (ИП, ООО), что продемонстрировано на рис. 1.



Рис. 1. Распределение ответов респондентов на вопрос о том, какие факторы препятствуют цифровой трансформации в строительной отрасли (% от общего числа респондентов)

Fig. 1. Distribution of respondents' responses to the question of what factors hinder digital transformation in the construction industry (% of the total number of respondents)

Предложения

На основании результатов исследования автор предлагает следующие механизмы для преодоления главных стоп-факторов цифровой трансформации, преодоления негативного воздействия от фрагментации рынка и отсутствия стимулов для внедрения цифровизации:

1. Принять в качестве центра приложения усилий по цифровизации самого крупного фрагмента ИЖС-девелоперов коттеджных поселков, лендлордов (суммарно 45 % от объема строительства в ИЖС, как показано на рис. 2) за счет принятия нормативных актов о распространении действия СП 543.1325800.2024 [12] на объекты ИЖС, что автоматически привнесет в отрасль цифровые продукты (ПО, электронный документооборот, фотобанки) и создаст мощный информационный задел по пути создания цифровых паспортов объектов.

2. Принять поправки к Федеральному закону № 186-ФЗ [13], который с 1 марта 2025 года расширил механизм эскроу-счетов для применения их в ИЖС в России, позволяющие осуществить поэтапное раскрытие эскроу-счетов в случае ведения технического

надзора застройщиком. Эта мера ставит заемщиков в более комфортное положение по финансированию подрядчиков и создает стимулы для цифровизации своего строительства через работу специалистов строительного контроля (рис. 3).

Выводы

Цифровая трансформация строительной отрасли осуществляется с заметной медлительностью по сравнению с другими секторами экономики. Лидирующую позицию в процессе цифровизации занимают крупные девелоперские компании, работающие по модельному принципу сквозного цикла, что позволяет им эффективно внедрять современные технологии на всех этапах реализации проектов. Однако наиболее отстающим сегментом в области внедрения цифровых технологий остается сектор индивидуального жилищного строительства, который сталкивается с рядом специфических вызовов.

На данный момент наибольшее распространение цифровых технологий зафиксировано в таких направлениях, как документооборот, проектирование и сметообразование. В то же время использование

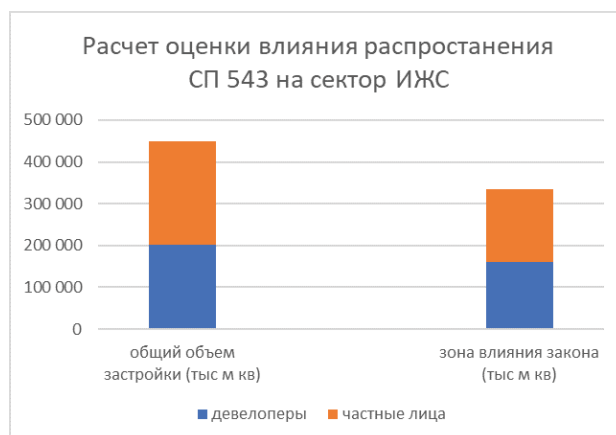


Рис. 2. Расчет оценки влияния распространения [12] на сектор индивидуального жилищного строительства

Fig. 2. Calculation of the assessment of the effect of extension of application of the [12] on the sector of individual housing construction

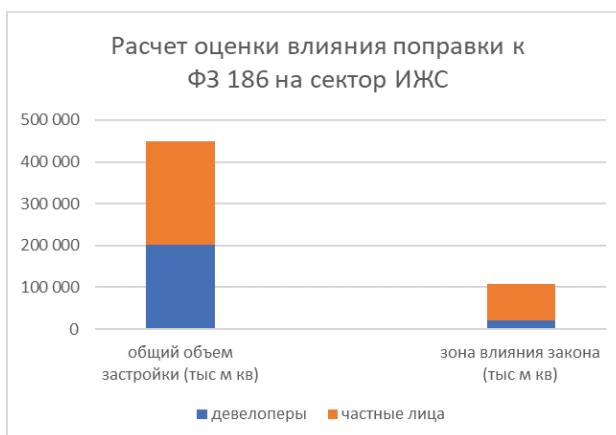


Рис. 3. Расчет оценки влияния поправки к [13] на сектор индивидуального жилищного строительства

Fig. 3. Calculation of the assessment of effect of the amendment to the [13] on the sector of individual housing construction

BIM-моделей ограничивается в основном крупными объектами площадью свыше 2000 квадратных метров, что создает значительный разрыв между высокотехнологичными проектами и более мелкими инициативами. При этом 85 % рынка ИЖС составляют малобюджетные дома площадью от 70 до 150 квадратных метров, что автоматически исключает их из сферы применения современных цифровых решений. Эти объекты строятся как организованными девелоперами (45 % от общего объема), так и частными застройщиками с использованием устаревших технологий, предполагающих так называемую «ручную сборку» и «ручное управление» процессом строительства.

Несмотря на очевидные преимущества, которые могут быть получены от внедрения цифровых технологий, данный процесс часто сопряжен с необходимостью значительного финансирования, поиска высококвалифицированных кадров, а также с рисками, связанными с неадаптацией существующих *de facto* процессов к современным методам обмена данными, строительству и эксплуатации готовых объектов. Тем не менее инновационное развитие строительной сферы в условиях формирования полноценной цифровой экономики является неизбежным этапом цифровой трансформации нашего общества и требует усиления внимания со стороны государственных органов для создания стимулов к трансформации и преодолению фрагментации существующего рынка как главных барьеров, препятствующих преобразованиям.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Строительство в России. 2020: статистический сборник. Москва: Росстат, 2020. 113 с.
2. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 г. № 3268-п. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_430333/082f7da9658f094f4d3e65bedfdddc3f59f4aff/ (дата обращения: 07.05.2025).
3. Лосев Ю.Г., Лосев К.Ю. Малоэтажное жилищное строительство как основа инновационного развития строительной отрасли // *Вестник Евразийской науки*. 2021. № 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/10SAVN221>.
4. Байбурун А.Х., Кочарин Н.В. Применение цифровых технологий в строительстве: учеб. пособие. Челябинск: Библиотека А. Миллера, 2020. 167 с.
5. Kringelum Louise B., Gamborg Holm Casper, Holmgren Jens, Friis Ole, Jensen Katrine Freja. Digital transformation: strategy comes first to lay the groundwork. *Journal of business strategy*. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1108/JBS-09-2023-0199>.
6. Strategy Partners. Приоритеты цифровизации российских девелоперских и строительных компаний. URL: <https://strategy.ru/research/research/39> (дата обращения: 07.05.2025).
7. Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С. Исследование уровня цифровизации на российских предприятиях инвестиционно-строительной сферы: монография. Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2023. 52 с. URL: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2023/Monografiya_Kisel-Prokhorova_2023.pdf.
8. Травуш В.И. Цифровые технологии в строительстве // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 3. С. 107–117. DOI: <http://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-3-107-117>. EDN: VJBYXC.
9. Цифровой фундамент. Как строительная отрасль осваивает технологии. URL: https://sber.pro/publication/tsifrovoy-fundament-kak-stroitel'naya-otrasl-osvaivaet-tehnologii/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 07.05.2025).
10. НИУ МГСУ, ООО «КОНКУПАТОР». Оценка применения BIM-технологий в строительстве. URL: https://www.nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchet.pdf (дата обращения: 07.05.2025).
11. ДОМ.РФ. Единая информационная система жилищного строительства. URL: https://наш.дом.рф/аналитика/ввод_жилья (дата обращения: 07.05.2025).
12. СП 543.1325800.2024. Строительный контроль при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства. Москва: Минстрой России, 2024.
13. Федеральный закон «О строительстве жилых домов по договорам строительного подряда с использованием счетов эскроу» от 22.07.2024 № 186-ФЗ.
14. Hanbin Luo, Ling Lin, Ke Chen, Maxwell Fordjour Antwi-Afari, Lijuan Chen. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022, vol. 12, article 100087. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100087>.
15. Dongmin Lee, Sang Hyun Lee, Neda Masoud, M.S. Krishnan, Victor C. Li. Integrated digital twin and blockchain framework to support construction quality management. *Automation in Construction*. 2021, vol. 127, article 103688. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688>.
16. Gustavo Attencia, Claudia Mattos. Adoption of digital technologies for asset management in construction projects. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2022, vol. 27, pp. 619–629. DOI: <http://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.030>.
17. Pan Y., Zhang L., Chelse M. Integrating BIM and AI for smart construction management: current status and future directions. *Archives of Computational Methods*

in Engineering. 2023, vol. 30, pp. 1081–1110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>.

18. Khosrowshahi F., Arayici Y. Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2012, vol. 19, no. 6, pp. 610–635. DOI: <https://doi.org/10.1108/09699981211277531>.

References

1. Federal State Statistics Service (Rosstat). Construction in Russia. 2020: statistical collection. Moscow: Rosstat Publ., 2020, 113 p. (In Russian).
2. Strategy for the development of the construction industry and housing and communal services of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated October 31, 2022 No. 3268-R. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_430333/082f7da9658f094f4d3e65bedfddfd3f59f4aff/ (accessed: 05.07.2025). (In Russian).
3. Losev Yu.G., Losev K.Yu. Low rise residential construction as the basis of building industry innovative development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021, no. 2, vol. 13. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/10SAVN221>.
4. Baiburin A.Kh., Kocharyan N.V. Application of digital technologies in construction: textbook. Chelyabinsk: A. Miller Library, 2020, 167 p. (In Russian).
5. Kringelum Louise B., Gamborg Holm Casper, Holmgren Jens, Friis Ole, Jensen Katrine Freja. Digital transformation: strategy comes first to lay the groundwork. *Journal of business strategy*. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1108/JBS-09-2023-0199>.
6. Strategy Partners. Digitalization priorities of Russian development and construction companies. URL: <https://strategy.ru/research/research/39> (accessed: 05.07.2025). (In Russian).
7. Kisel T.N., Prokhorova Yu.S. A study of the level of digitalization in Russian enterprises of the investment and construction sector: a monograph. Moscow: MISI – MGSU Publishing House, 2023, 52 p. URL: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2023/Monografiya_Kisel-Prokhorova_2023.pdf (In Russian).
8. Travush V.I. Digital technologies in construction. *Academia. Architecture and construction*. 2018, no. 3, pp. 107–117. (In Russian). DOI: <http://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-3-107-117>. EDN: VJBYXC.
9. The digital foundation. How the construction industry is mastering technology. URL: https://sber.pro/publication/tsifrovoy-fundament-kak-stroitel'naya-otrasl-osvaivaet-tehnologii/?utm_source=chatgpt.com (accessed: 05.07.2025) (In Russian).
10. NRU MGSU, LLC "CONCURATOR". Assessment of the use of BIM technologies in construction. URL:

https://www.nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchet.pdf (accessed: 05.07.2025). (In Russian).

11. DOM.RF. Unified housing construction information system. URL: https://наш.дом.рф/аналитика/ввод_жилья (accessed: 05.07.2025). (In Russian).
12. SP 543.1325800.2024. Construction control during construction, reconstruction and major repairs of capital construction facilities. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2024. (In Russian).
13. Federal Law "On the Construction of Residential Buildings under Construction Contracts Using Escrow Accounts" dated 07/22/2024 No. 186-FZ. (In Russian).
14. Hanbin Luo, Ling Lin, Ke Chen, Maxwell Fordjour Antwi-Afari, Lijuan Chen. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022, vol. 12, article 100087. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100087>.
15. Dongmin Lee, Sang Hyun Lee, Neda Masoud, Krishnan M.S., Victor C.Li. Integrated digital twin and blockchain framework to support construction quality management. *Automation in Construction*. 2021, vol. 127, article 103688. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688>.
16. Gustavo Attencia, Claudia Mattos. Adoption of digital technologies for asset management in construction projects. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2022, vol. 27, pp. 619–629. DOI: <http://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.030>.
17. Pan Y., Zhang L., Chelse M. Integrating BIM and AI for smart construction management: current status and future directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023, vol. 30, pp. 1081–1110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>.
18. Khosrowshahi F., Arayici Y. Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2012, vol. 19, no. 6, pp. 610–635. DOI: <https://doi.org/10.1108/09699981211277531>.

Информация об авторе / Information about the author

Виталий Владимирович Ткаченко, канд. экон. наук, генеральный директор, АО «ТЕХНАДЗОР», Москва
e-mail: Vvtkachenko@mail.ru
тел.: +7 (915) 464-44-14
Vitaly V. Tkachenko, Cand. Sci. (Economic), General Director, JSC TECHNADZOR, Moscow
e-mail: Vvtkachenko@mail.ru
tel.: +7 (915) 464-44-14

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Печатное и сетевое рецензируемое научно-техническое издание, в котором публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований по строительным материалам, конструкциям, сооружениям, основаниям и фундаментам при статических и динамических воздействиях.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС77-75188 от 22.02.2019 г., сетевого издания – Эл № ФС77-82129 от 18.10.2021 г.

Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN (International Standard Serial Number): печатное – 2224-9494, сетевое – 2782-3938.

«Вестник НИЦ «Строительство» (Print) включен в Перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Журнал индексируется в академических базах данных и информационных системах: ROAD, CrossRef, Академия Google. Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте vestnik.cstroy.ru

Подписной индекс ООО «Урал Пресс», ООО «АРЗИ» – 36569.



*Приглашаем к сотрудничеству
ученых, аспирантов,
исследователей!*

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская ул.,
дом 6, корпус 1, кабинет 400/2

Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023

Выпускающий редактор – Починина Наталья

e-mail: pochininane@cstroy.ru





3rd International Workshop on “Durability and Sustainability of Concrete Structures” (DSCS 2025) Naples (Italy), September 16th-18th, 2025

Circular 3 Call for Abstracts

Venue: University of Naples Federico II, Conference Centre in Via Partenope

Organized by: American Concrete Institute Italy Chapter (ACI IC) and University of Naples Federico II (UniNa)

ACI Sponsoring Committees: ACI 130 - Sustainability of Concrete, ACI 201 – Durability of Concrete, ACI 243- Seawater Concrete

Organizing Committee:

Luigi Coppola (ACI IC President, University of Bergamo)
Marta Del Zoppo (University of Naples Federico II)
Liberato Ferrara (ACI IC Vice President, Politecnico di Milano)
Antonio Nanni (ACI Past President, University of Miami)
Andrea Prota (University of Naples Federico II)
Roberto Realfonzo (University of Salerno)

Honor Committee:

Mario Collepardi (Italy)
Edoardo Cosenza (Italy)
Mario Alberto Chiorino (Italy)
Gaetano Manfredi (Italy)

Tentative International Scientific Committee:

Maria Antonietta Aiello (Italy)	Nele de Belie (Netherlands)	Lidia La Mendola (Italy)	Marisa Pecce (Italy)
Carmen Andrade Perdriz (Spain)	Frank Dehn (Germany)	Pietro Lura (Switzerland)	Giovanni Plizzari (Italy)
Nemkumar Banthia (Canada)	Marco di Prisco (Italy)	Giuseppe Mancini (Italy)	Paolo Riva (Italy)
Hans Beushausen (South Africa)	Guillermo J. Etse (Argentina)	Enzo Martinelli (Italy)	Luc Taerwe (Belgium)
Antonio Caggiano (Italy)	Vyacheslav Falikman (Russia)	Claudio Mazzotti (Italy)	Romildo D. Toledo Filho (Brazil)
Jan Cervenka (Czech Republic)	David Fernández-Ordóñez (Switzerland)	Viktor Mechtcherine (Germany)	Roberto Torrent (Argentina)
Chun-Tao Chen (Taiwan)	Paula Folino (Argentina)	Ole Mejlhede Jensen (Denmark)	Tamon Ueda (Japan)
Denny Coffetti (Italy)	Stephen Foster (Australia)	Harald S. Müller (Germany)	
Laura De Lorenzis (Switzerland)	Pietro Gambarova (Italy)	Annalisa Napoli (Italy)	
Antonello De Luca (Italy)	Ravindra Gettu (India)	Emidio Nigro (Italy)	

Objectives and Themes: This is the third edition of International Workshop on “Durability and Sustainability of Concrete Structures”, after the successful past editions of Moscow 2018 and Bologna 2015. The purpose of this international workshop is to present and discuss the most innovative developments and research on durability and sustainability of concrete construction. Among the topics to be addressed are: reduction in CO₂ emissions; use of binders alter-

native to Portland cement, superplasticizers for low-content clinker cements, recycled materials and innovative products; design of durable structures, maintenance, repair and refurbishment of concrete structures. The topics will be tackled from all perspectives, from material science to testing, from environmental impact evaluation to design under severe conditions and will include maintenance, monitoring, repair and reuse of concrete structures.

Important dates:

- Call for abstracts: **January 31, 2025**
- Acceptance of abstracts: **February 15, 2025**
- Submission of full papers: **April 6, 2025**
- Notification of acceptance: **May 31, 2025**
- Submission of final papers: **June 30, 2025**

Abstracts submission: The 300-words abstracts can be submitted within January 31, 2025 at the following email address: submissionDSCS25@aciitaly.com

Website: <https://www.aciitaly.com/events/dscs-2025/>

Conference Secretary: organizingDSCS25@aciitaly.com, Dr. Marta Del Zoppo

ACI IC Secretary (registration queries only): aciitalychapter@gmail.com, Eng. Valentina Trinchese



АО «НИЦ «Строительство» —
это более чем 95-летний опыт исследований
и достижений в области строительной науки.

Мы – команда единомышленников,
способных реализовать самые сложные
инженерные проекты.

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



НИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ГОРБАЧЕВОЙ



г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6



+7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80



www.cstroy.ru



motorina@cstroy.ru | smirnova@cstroy.ru



ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»
ПРЕДЛАГАЕТ ВЕСЬ СПЕКТР
ИНЖИНИРИНГОВЫХ УСЛУГ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА



повысить квалификацию
специалистов и экспертов

пройти обучение в аспирантуре

подготовить диссертацию в докторантуре

защитить диссертацию на соискание ученой
степени **кандидата наук**, на соискание ученой
степени **доктора наук**

Учебный центр
АО «НИЦ «Строительство»
приглашает вас:





АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- — в области инженерных изысканий
- — в области проектирования
- — в области строительства
- — по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- — разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов



Преподавательский состав Учебного центра

- — лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- — учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению 08.06.01 «Техника и технология строительства» по направлениям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»



В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГВОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА

ЦОК

центр
оценки
квалификации

**НЕЗАВИСИМАЯ
ОЦЕНКА КВАЛИФИКАЦИИ**

*Для успешного прохождения
профессионального экзамена мы
проводим курс обучения
для подготовки к прохождению
независимой оценки квалификации
специалистов*



**Контактная информация для
консультаций и подачи заявок:
тел.: +7 (495) 174-73-80;
+7 (495) 602-00-70 (доб. 1222);
e-mail: cok-info@cstroy.ru**