

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0005-9889 (PRINT); ISSN 3034-1302 (ONLINE)

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

4

629

2025

bzv.ru

ИЗДАЕТСЯ С 1955 ГОДА



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: bzhb.ru@yandex.ru
<http://bzhb.ru>

Свободная цена

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

4 (629)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

ЗЕНИН С.А., РЕДИКУЛЬЦЕВ Е.А.

**Анализ расчетных зависимостей для оценки железобетонных
изгибаемых элементов с круглой формой поперечного сечения при
действии поперечных сил 5**

ИВАНОВ С.И., ПАНЬКОВ Е.Н., КВАСНИКОВ А.А.

**Усиление сжатых и изгибаемых железобетонных конструкций
системами внешнего армирования с применением шпоночных
соединений. 19**

ОВЧИННИКОВА И.Г., ЧЕРНЫЙ И.А., СОКОЛОВ Б.С.

**Работа железобетонных цилиндрических плит в трехосном
напряженном состоянии 27**

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

ГУДКОВ А.Н.

**Исследование влияния влагонепроницаемости легкой штукатурки
«СПАДАР СК-450» на процесс осушения (санацию) основания
из газобетона в сравнении с тяжелой минеральной штукатуркой 45**

РАДАЙКИН О.В.

**Уточнение положений метода предельных состояний в части
нормирования зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » бетона при сжатии и растяжении.
Часть 2 58**

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

СНИМЩИКОВ С.В.

**Математические модели различных процессов в строительстве
с учетом применения машиночитаемых и машинопонимаемых
стандартов 67**

ТКАЧЕНКО В.В.

**Цифровой двойник частного жилого дома: международные подходы,
технологии и перспективы применения (анализ зарубежных исследований
по созданию и внедрению цифровых двойников в индивидуальном
домостроении) 73**

Founder of the journal:

"Reinforced concrete" Association
Address: 22, bld. 2, Ryazansky prospect,
 Moscow, 109428, Russian Federation

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

Registered 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

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: bzhib.ru@yandex.ru
<http://bzhib.ru>

Free price

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

4 (629)

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

ZENIN S.A., REDIKULTSEV E.A.

**Analysis of the calculated dependencies for evaluating of the strength of bent
 reinforced concrete elements with circular shape of cross-section
 under the action of shear forces.**

5

IVANOV S.I., PANKOV E.N., KVASNIKOV A.A.

**Strengthening of the compressed and bent reinforced concrete
 structures with external reinforcement systems using
 keyed connections.**

19

OVCHINNIKOVA I.G., CHERNYI I.A., SOKOLOV B.S.

**The behavior of reinforced concrete cylindrical slabs
 in a triaxially stressed state**

27

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

GUDKOV A.N.

**Investigation of the effect of moisture permeability of "SPADAR SK-450"
 light plaster on the process of dehumidification (sanitation)
 of the aerated concrete base**

45

RADAYKIN O.V.

**Clarification of the provisions of the limit state method regarding the
 normalization of the " $\sigma - \epsilon$ " dependences of concrete under compression
 and tension. Part 2.**

58

LIFECYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION PROJECTS

SNIMSHCHIKOV S.V.

**Mathematical models of various processes in construction, taking
 into account the application of machine-readable and
 machine-understandable standards.**

67

TKACHENKO V.V.

**Digital twin of a private house: foreign approaches, technologies,
 and prospects for individual construction.**

73

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)

АРХИПКИН 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)

МАИЛАН 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)

Научно-технический журнал «Бетон и железобетон» включен в Перечень ВАК от 10.06.2024 года по научным специальностям:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения;

2.1.5 – Строительные материалы и изделия.

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 624.075.23

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-5-18](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-5-18)**С.А. ЗЕНИН^{1,✉}, Е.А. РЕДИКУЛЬЦЕВ²**

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 ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КРУГЛОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Аннотация

Введение. В действующих отечественных нормативных документах по проектированию железобетонных элементов (СП 63.13330.2018) отсутствуют указания по расчету изгибаемых и внецентренно сжатых элементов нестандартной (отличной от прямоугольной) формы при действии поперечных сил. В рамках ранее проведенных в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева исследований была предложена методика оценки несущей способности наклонных сечений нестандартной формы, которая имеет удовлетворительную сходимость с экспериментами, проведенными отечественными и зарубежными исследователями. В настоящей работе выполнен анализ ранее разработанной методики и предложено ее уточнение для сечений, имеющих круглую форму. Также выполнено сравнение результатов имеющихся опытных данных с результатами расчетов по уточненной методике с оценкой уровня ее надежности.

Цель. Уточнение методики расчета прочности наклонных сечений изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов с нестандартной (отличной от прямоугольной) формой поперечного сечения при действии поперечных сил, выполнение сравнения предлагаемой методики расчета с имеющимися опытными данными и результатами численных экспериментов.

Материалы и методы. Теоретические исследования проведены на основе результатов испытаний, проведенных ранее зарубежными исследователями для элементов круглого поперечного сечения. В общей

сложности расчет выполнен для 13 образцов круглого поперечного сечения.

Результаты. Проанализированы результаты экспериментов и данные отечественных и зарубежных нормативных документов. Предложена уточненная методика определения несущей способности железобетонных элементов круглого сечения на действие поперечной силы по наклонной трещине. По результатам выполненного сравнения предложенной методики с данными экспериментов установлено, что предложенная методика обеспечивает необходимый уровень надежности – среднее отношение экспериментальной несущей способности к расчетному значению составляет 1,241 при среднеквадратичном отклонении 0,123. Установлено, что наибольшее отклонение результатов расчета по предлагаемой уточненной методике наблюдается для бетонов с более высокой прочностью, в связи с чем представляется целесообразным провести дополнительные опытные исследования образцов из бетонов высоких классов, в том числе образцов, изготовленных из высокопрочных бетонов (класс выше В60).

Выводы. Предложена уточненная методика для вычисления несущей способности железобетонных элементов круглого сечения на действие поперечной силы по наклонной трещине. При разработке методики учтена преемственность с действующими отечественными нормативными документами в части элементов прямоугольного сечения. Проведена проверка предложенной методики с учетом имеющихся результатов экспериментов для 13 опытных образцов,

выполненных различными авторами. В соответствии с выполненной оценкой результатов испытаний установлено, что предлагаемая методика обеспечивает достаточный резерв надежности. С целью дополнительной проверки для бетонов с высокой прочностью рекомендовано провести дополнительные испытания, в том числе для высокопрочных бетонов.

Ключевые слова: изгибаемые элементы, железобетон, прочность, поперечные силы, наклонные сечения, расчет, надежность, круглое поперечное сечение, поперечная арматура

Для цитирования: Зенин С.А., Редикульцев Е.А. Анализ расчетных зависимостей для оценки железобетонных изгибаемых элементов с круглой формой поперечного сечения при действии поперечных сил // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 5–18. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-5-18](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-5-18). EDN: QZCDNO

Вклад авторов

Зенин С.А. – разработка аналитических методов расчета прочности изгибаемых элементов с нестандартной формой поперечного сечения при действии поперечных сил, написание и корректировка статьи.

Редикульцев Е.А. – разработка методики расчета поперечных сечений при помощи численных методов и анализ полученных результатов, написание статьи.

Финансирование

Исследование выполнено за счет собственных средств авторов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.04.2025

Поступила после рецензирования 29.05.2025

Принята к публикации 05.06.2025

S.A. ZENIN^{1,✉}, E.A. REDIKULTSEV²

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 FSAEI HE Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

ANALYSIS OF THE CALCULATED DEPENDENCIES FOR EVALUATING OF THE STRENGTH OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH CIRCULAR CROSS-SECTION UNDER THE ACTION OF SHEAR FORCES

Abstract

Introduction. Current Russian codes of design of reinforced concrete elements do not have rules and considerations for analysis of bent and compressed elements with irregular (not similar to rectangle) shape of cross-section under the action of shear forces. As a result of previous investigations which were conducted in Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZNB) named after A.A. Gvozdev, new method of evaluating of the bearing capacity of inclined cross-section was proposed. Developed method has good matching with the results of experiments, conducted by Russian and foreign researchers. This paper deals with comparison of results of experiments with analysis by proposed model.

Aim. Further improvement of methods of analysis of strength of inclined sections of bent and compressed elements with irregular (not similar to rectangle) shape of cross-section under the action of shear forces. Comparison of proposed model with available data of experiments and results of numerical analysis.

Materials and methods. Theoretical investigations have been conducted on base of results of experiments, conducted earlier by Russian and foreign researchers for elements with circular cross-section. Totally, analysis has been performed for 13 samples with circular cross-section.

Results. Quality analysis of results of experiments and considerations of foreign codes has been conducted.

Method of calculating of bearing capacity of bent reinforced concrete member with circular cross-section has been proposed. As a result of provided comparison of proposed method with data of experiments it was found out that proposed method provides required level of reliability – average rate of experimental bearing capacity to calculated value is 1.241 with standard deviation 0.123. It has been stated that maximum deviation of results of calculation by proposed model was observed for samples with higher strength of concrete. As a result, it was recommended to provide additional investigations of samples with high strength of concrete, i.e. High Strength Concrete (HSC) samples (with strength greater than 60 MPa).

Conclusions. Method for calculating of the bearing capacity of bent reinforced elements under action of shear forces by the sloping crack has been proposed. When developing the methodology, continuity with current Russian regulatory documents in the part of elements with rectangular cross-section was taken into account. Proposed model has been checked with available results of experiment (totally 13 experiments of different authors). According to conducted evaluating of results of experiments proposed model provides enough reserve of reliability. To additional checking of reliability of high strength concrete members, it was recommended to provide additional experiments, i.e. for high strength concrete members.

Keywords: bendable elements, reinforced concrete, strength, transverse forces, inclined sections, calculation, reliability, circular cross section, transverse reinforcement

For citation: Zenin S.A., Redikultsev E.A. Analysis of the calculated dependencies for evaluating of the strength of bent reinforced concrete elements with circular shape of cross-section under the action of shear forces. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 5–18. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-5-18](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-5-18). EDN: QZCDNO

Authors contribution statement

Zenin S.A. – development of the analytical methods of analysis of strength of reinforced concrete bent elements with the complex shape of cross-section under the action of shear forces, writing and correcting of the article.
Redikultsev E.A. – development of ways of analysis of cross-sections with numerical methods and common evaluating of obtained results, writing of the article.

Funding

The research has been funded by the own finance of its authors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.04.2025

Revised 29.05.2025

Accepted 05.06.2025

Введение

В действующем СП 63.13330.2018 [1] для оценки прочности при действии поперечных сил применяется методика расчета только для одного типа сечения железобетонных стержневых элементов – прямоугольного сечения. Имеющаяся методика основана на исследованиях М.С. Боришанского [2], А.С. Залесова [3] и показывает надежность, подтвержденную многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями, а также длительным периодом практического использования без каких-либо свидетельств недостаточной несущей способности элементов, рассчитанных с использованием данной методики.

Вместе с тем в инженерной практике достаточно часто применяются железобетонные элементы с сечениями других типов – круглые, кольцевые, тавровые, двутавровые и др. Также общим случаем расчета всех типов сечений (включая прямоугольные) является вычисление несущей способности при действии поперечных сил для случая косого изгиба и косого внецентренного сжатия. В ранее действовавших нормативных [4] и рекомендательных документах [5] имелись зависимости для тавровых элементов и случая косого изгиба, однако в действующих нормах соответствующие методики отсутствуют. Для распространения действующей методики на иные типы сечений и на случай напряженного состояния необходимо проведение дополнительных опытно-теоретических исследований.

Анализ основных факторов, определяющих механизм разрушения изгибаемых элементов круглого сечения при действии поперечных сил

Как показал анализ имеющихся опытных данных, разрушение железобетонных элементов с круглым поперечным сечением при действии поперечных сил принципиально не отличается от элементов прямоугольного сечения – разрушение происходит по наклонной трещине, что проиллюстрировано на рис. 1.

В соответствии с методикой, принятой в отечественных нормативных документах, выделяют три случая разрушения по наклонным сечениям:

- разрушение от действия поперечной силы по наклонной сжатой полосе;
- разрушение от действия поперечной силы по наклонной трещине;
- разрушение от действия изгибающего момента по наклонной трещине.

Первый случай разрушения имеет место при малых относительных величинах пролета среза, т. е. при отношении пролета среза к рабочей высоте сечения до 1,0.

Второй случай разрушения обычно имеет место при относительных пролетах среза в диапазоне 1,0–2,5.

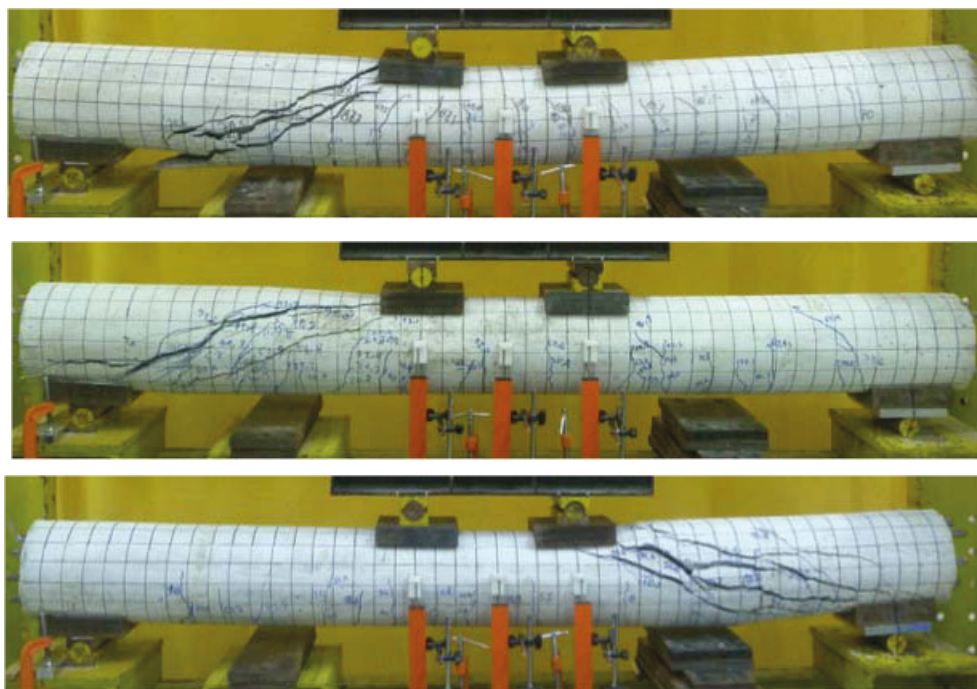


Рис. 1. Схемы разрушения железобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил по данным R. Thamrin и др. [6]

Fig. 1. Typical schemes of collapse of reinforced concrete members with circle cross-section under the action of shear forces (by R. Thamrin et al. [6])

При больших пролетах среза (более 2,5–3,0) разрушение, как правило, происходит по схемам, характерным для нормальных сечений по третьему случаю при действии изгибающего момента или внецентренного сжатия. Данный случай разрушения характерен для элементов с недостаточной анкерровкой продольной растянутой арматуры.

Следует отметить, что методика расчета прочности по наклонной сжатой полосе в действующих нормативных документах [1] проработана на достаточном уровне и ее многолетнее применение не вызывает каких-то существенных нареканий, особенно учитывая, что разрушение данного типа является достаточно редким для изгибаемых железобетонных элементов. Разрушение 3-го типа (от действия изгибающего момента) также не вызывает вопросов в инженерной практике, в том числе благодаря унификации расчета с аналогичным расчетом нормальных сечений.

Таким образом, наибольший интерес представляет исследование разрушения железобетонных элементов от действия поперечной силы по наклонной трещине.

Известно, что общее сопротивление железобетонных элементов определяется несколькими частными типами сопротивления, например в [7] выделяются следующие типы сопротивления (удерживающие связи – см. рис. 2):

Связь 1. Бетон сжатой зоны над вершиной наклонной трещины.

Связь 2. Бетон сжатой зоны под наклонной трещиной.

Связь 3. Продольная арматура в точке пересечения данной арматуры с нормальной трещиной.

Связь 4. Продольная арматура в точке пересечения данной арматуры с опасной наклонной трещиной.

Связь 5. Поперечная арматура, пересекающая опасную наклонную трещину.

Каждая из указанных связей включает в себя компоненты как нормальных, так и касательных усилий.

Вклад каждого из типов связей при увеличении нагрузки на элемент не остается постоянным, с увеличением нагрузки влияние связи типа 2 (бетона сжатой зоны под наклонной трещиной) снижается с увеличением влияния связи типа 1 (бетона над вершиной наклонной трещины). В то же время влияние продольной арматуры проявляется в том, что с увеличением ее деформаций уменьшается высота сжатой зоны с одновременным ростом напряжений в ней и с увеличением неравномерности их распределения, что приводит к раскрытию трещины ниже нейтральной оси и уменьшению влияния касательных напряжений в растянутой зоне.

Формулирование предлагаемой методики расчета

Анализ отечественных и иностранных документов [1, 8–10] показывает, что, как правило, сопротивление железобетонных элементов действию поперечных сил оценивается с учетом условной активной площади, называемой также площадью среза, при этом влиянием слоя бетона, расположенным ниже оси растянутой арматуры, пренебрегают. Таким образом, несущая способность железобетонных изгибаемых элементов при действии поперечных сил и при отсутствии продольных сил может быть описана обобщенной формулой по аналогии с [1]:

$$Q_b = [K] \times b_w \times h_o, \quad (1)$$

где b_w – ширина прямоугольного сечения при продольном изгибе;

h_o – рабочая высота сечения;

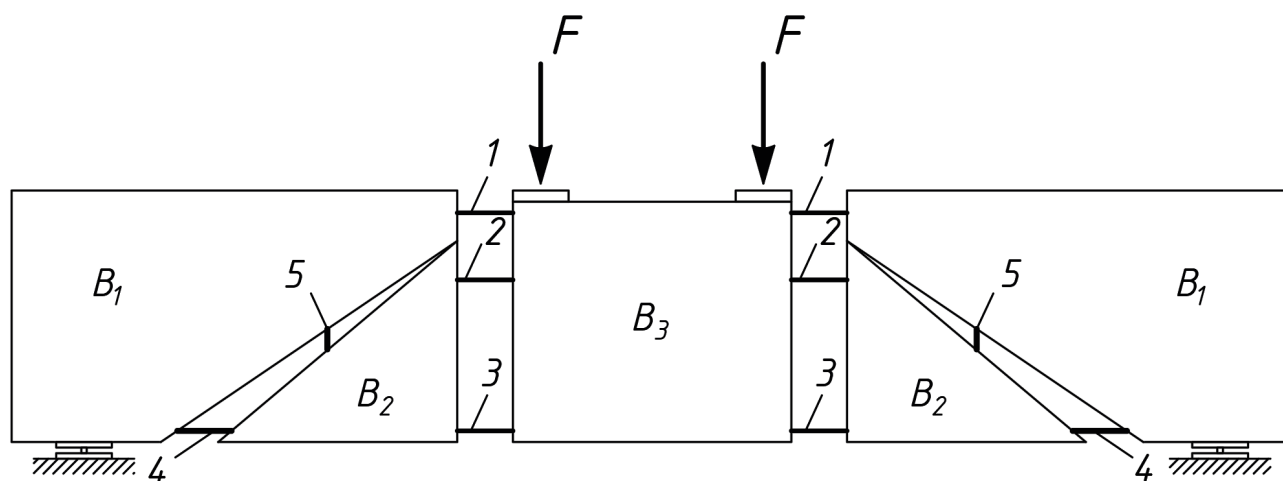


Рис. 2. Типы удерживающих связей при расчете наклонных сечений согласно [7]
Fig. 2. Types of the retaining ties for calculating of the inclined sections by [7]

$[K]$ – обобщенная система коэффициентов и прочностных характеристик, зависящих от методов, используемых в конкретных нормативных документах, в частности для [1] можно записать:

$$[K] = \varphi_{b2} \times R_{bt} \times \frac{h_0}{c}, \quad (2)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление бетона растяжению;

φ_{b2} – эмпирический коэффициент, обеспечивающий приближение расчетных и опытных значений прочности, принимаемый равным 1,5;

c – пролет среза.

В общем случае система коэффициентов $[K]$ имеет размерность напряжений и характеризует осредненное значение перерезывающей силы в пределах поперечного сечения, ограниченного рабочей высотой данного сечения.

Для методики норм США ACI 318-19 [8] вышеуказанную величину можно записать в виде:

$$[K] = 0,17 \times \lambda \sqrt{f'_c}. \quad (3)$$

Для методики европейских норм Eurocode 2 [9] данная величина для элементов без поперечной арматуры также может быть записана в виде:

$$[K] = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}. \quad (4)$$

Для методики индийских норм IS 456:2000 [10] можно записать:

$$[K] = \tau_c, \quad (5)$$

где τ_c – расчетное сопротивление бетона поперечного сечения срезу (табличное значение), зависящее от коэффициента продольного армирования и класса прочности бетона на сжатие.

Следует отметить, что указанная выше активная площадь, или площадь среза, не является реальной величиной, напрямую определяющей сопротивление наклонных сечений действию поперечных сил. Данная площадь определяет совокупность всех влияющих геометрических факторов, а ее приведение в соответствие с результатами испытаний осуществляется при помощи обобщенной системы коэффициентов и прочностных характеристик $[K]$.

Описанная выше расчетная модель для оценки предельного сопротивления наклонных сечений действию поперечных сечений может быть распространена и на иные формы поперечных сечений, в том числе на круглые и кольцевые сечения. Подобный подход используется, в частности, в нормах США [8] с заменой ширины сечения b_w на диаметр сечения, а рабочей высоты сечения h_0 на величину, равную 0,8 диаметра сечения. Достаточная корректность такого подхода отмечается, например, в [6].

Таким образом, наиболее привычной и удобной в использовании была бы методика, сохраняющая преемственность с имеющимися подходами, т. е. основанная на использовании условного понятия площади среза.

С учетом того, что геометрическое приложение площади среза не имеет прямого (т. е. без системы вспомогательных коэффициентов и прочностных характеристик) трактования с точки зрения прочности сечения в целом, данная площадь может быть назначена различным образом для каждого из типов поперечных сечений, при этом должны сохраняться главные факторы, определяющие применение предлагаемого выражения для вычисления прочности наклонных сечений.

В настоящее время в НИИЖБ предложены [11, 12] достаточно простые теоретические зависимости для определения активной площади (площади среза) для поперечных сечений нестандартных (отличных от прямоугольной) форм – круга, тавра, двутавра, ромба (в частном случае – квадрата в условиях косоугольного изгиба) и др.

Вместе с тем сравнительный анализ опытных данных и теоретических значений показывает, что предлагаемые в [11, 12] зависимости требуют дополнительного теоретического и опытного обоснования.

Определение поперечной силы, воспринимаемой сечением при срезе сжатой зоны бетона

Как было показано выше, в большинстве нормативных методик расчета железобетонных элементов на действие поперечной сил несущая способность относится к условной площади в пределах рабочей высоты сечения, при этом игнорируется факт существенного различия в сопротивлении действию поперечных сил для элементов без нормальных трещин и с нормальными трещинами в растянутой зоне элемента. Данный способ (с условным распределением несущей способности на всю площадь в пределах рабочей высоты сечения) является удобным в практических инженерных расчетах, так как не требует предварительного выполнения расчета нормальных сечений для выполнения расчета прочности при действии поперечных сил.

Тем не менее при выводе расчетных зависимостей следует учитывать распределение касательных напряжений в пределах сжатой зоны и небольшой части растянутой зоны, в пределах которой касательные напряжения могут передаваться через шероховатость в трещине посредством сил зацепления. На рис. 3 показано распределение касательных напряжений для круглого сечения с трещиной.

Таким образом, указанное в нормативных документах отнесение несущей способности к площади в пределах рабочей высоты следует понимать как условное. Введение данной условности представляется приемлемым, поскольку для элементов

из бетонов нормальной прочности и арматуры, применяемой в элементах без предварительного напряжения, отношение высоты сжатой зоны к рабочей высоте сечения является примерно постоянной величиной.

В частности, для прямоугольных сечений высота сжатой зоны составляет приблизительно половину рабочей высоты сечения, что подтверждается многочисленными расчетами по нелинейной деформационной модели, а также результатами испытаний. Действительно, при относительных деформациях растянутой арматуры, равных 0,002, и аналогичных деформациях крайнего сжатого волокна высота сжатой зоны составит порядка 0,5 рабочей высоты сечения.

Для элементов круглого сечения, имеющих, как правило, равномерное распределение рабочей продольной арматуры по кольцевой линии, данное соотношение составляет приблизительно 0,3, что также подтверждается расчетами по нелинейной деформационной модели (рис. 4) и результатами испытаний [13].

Для весьма редко встречающихся элементов круглого сечения, имеющих армирование только в растянутой зоне, данное соотношение может быть несколько больше (приближаясь к значению для прямоугольных элементов), что в некоторых случаях приведет к увеличению несущей способности, однако данными элементами можно пренебречь для универсальности вывода расчетных зависимостей.

Таким образом, для вывода расчетных зависимостей, описывающих прочность элементов произвольного сечения при действии поперечных сил, целесообразно сравнивать не значения площади поперечного сечения в пределах рабочей высоты сечения, а значения площади поперечного сечения преимущественно в пределах его сжатой части.

В качестве примера рассмотрим элемент круглого сечения с отношением рабочей высоты к диаметру, равным 0,9. В этом случае отношение площади сечения в пределах сегмента, равного по высоте $0,3h_0$, к площади прямоугольника такой же высотой и шириной, равной диаметру сечения d_w , составит $\varphi_{shp} = 0,634$ (рис. 5).

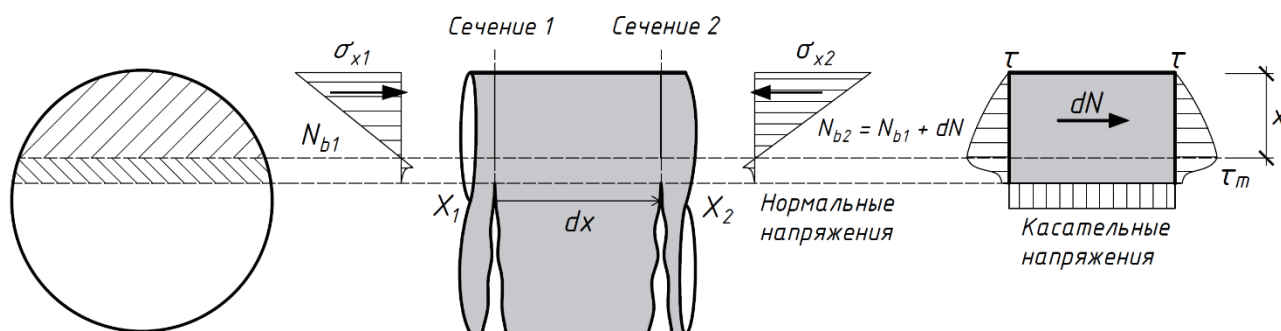


Рис. 3. Определение нормальных и касательных напряжений в элементе круглого сечения с нормальными трещинами в растянутой зоне

Fig. 3. The obtaining of normal and tangential stresses in the circle cross-section element with cracks in tension zone

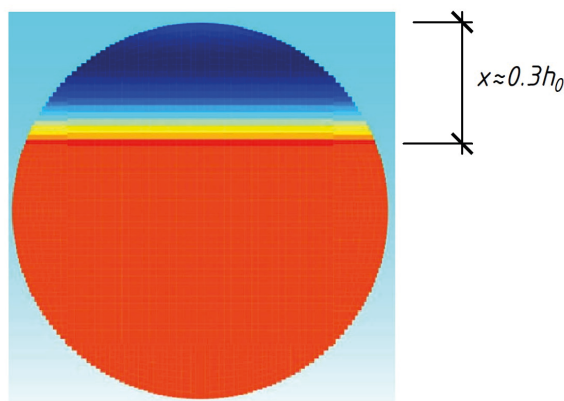


Рис. 4. Результаты расчета нормального сечения круглого элемента по нелинейной деформационной модели (арматура условно не показана)

Fig. 4. Results of analysis of cross-section of circle shape member by nonlinear deformation model, reinforcement is not shown

Для элементов с большей величиной защитного слоя относительно общей высоты сечения данное соотношение уменьшается, приближаясь к 0,6, для элементов с меньшей относительной величиной защитного слоя данное соотношение увеличивается приблизительно до 0,65.

Таким образом, формулу [1] для элементов с произвольной формулой поперечного сечения можно записать в виде:

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} \varphi_{shp} R_{bt} d_w (h_0)^2}{c}. \quad (6)$$

В приведенной выше зависимости коэффициент φ_{b2} следует считать величиной, связывающей средние касательные напряжения с величиной расчетного сопротивления бетона растяжению, а коэффициент φ_{shp} – коэффициентом приведения формы рассматриваемого поперечного сечения к прямоугольному сечению.

Для элементов прямоугольного сечения $\varphi_{shp} = 1,0$.

Для элементов круглого сечения в запас определения несущей способности можно предварительно принять $\varphi_{shp} = 0,6$.

Предлагаемая в данной статье зависимость, с одной стороны, подчеркивает преимущество предлагаемой зависимости с ранее действовавшими формулами, а с другой стороны, предусматривает некоторый разумный запас несущей способности.

Учет поперечного армирования в элементах круглого сечения

Анализ результатов экспериментов [6, 14–16] показывает, что поперечное армирование железобе-

тонных элементов круглого сечения в значительной мере увеличивает их несущую способность. Также установлено, что разрушение элементов круглого сечения с поперечной арматурой имеет характер, аналогичный элементам прямоугольного сечения с некоторыми особенностями.

Первая особенность, которая должна учитываться при расчете элементов круглого сечения с поперечной арматурой, – это переменное значение угла наклона хомутов к плоскости изгиба в точке пересечения с поверхностью опасной (критической) наклонной трещины. Так как элементы круглого сечения чаще всего имеют поперечную арматуру замкнутого кольцевого сечения, то данная арматура в точке пересечения с наклонной трещиной расположена под углом к плоскости изгиба (рис. 6).

Так же как для поперечной арматуры прямоугольных сечений, предельное усилие в поперечной арматуре круглых сечений предлагается учитывать в виде:

$$N_{sw,i} = R_{sw} \times A_{sw,i}, \quad (7)$$

где $A_{sw,i}$ – площадь поперечной арматуры в одном поперечном сечении, для кольцевой поперечной арматуры следует учитывать две ветви хомутов.

С учетом угла наклона хомутов к плоскости изгиба можно записать:

$$N_{sw,i} = R_{sw} \times A_{sw,i} \times \varphi_{sw,inc}, \quad (8)$$

где $\varphi_{sw,inc} = \cos(\alpha)$, α – угол наклона поперечной арматуры к плоскости изгиба элемента.

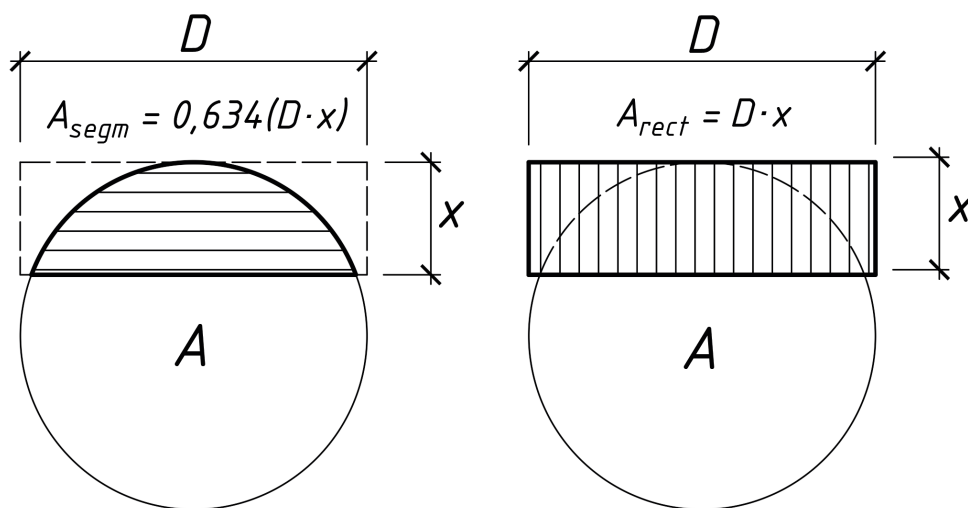


Рис. 5. К определению отношения площади сечения в пределах сегмента, равного по высоте $0,3h_0$, к площади соответствующего прямоугольника

Fig. 5. On the determining of the cross-section area within a segment equal in height to $0.3h_0$, to the area of the corresponding rectangle

Рассматриваемый угол наклона к вертикальной оси изменяется от 90 градусов в основании наклонной трещины до 0 градусов в середине наклонной трещины и далее снова до 90 градусов в вершине наклонной трещины. Среднее значение косинуса угла наклона составляет $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7$. Также следует учитывать, что углом наклона хомута определяют не только напряжения в нем, но и относительные деформации, т. е. при увеличении угла наклона раскрытие наклонной трещины приводит к меньшим продольным деформациям хомута вдоль его оси. С учетом этого рекомендуется принимать:

$$\varphi_{sw,inc} = (\cos(\alpha))^2 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = 0,5. \quad (9)$$

Для спиральных хомутов следует учитывать дополнительный угол наклона, вызванный наклоном хомутов к вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба (рис. 7), т. е.:

$$\varphi_{sw,inc} = 0,5 \times \cos(\beta), \quad (10)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{S_{sw}/2}{h_0 - a}\right) = \arctg\left(\frac{S_{sw}}{2(D - 2a)}\right). \quad (11)$$

При $S_{sw} \leq 0,2(D - 2a)$ допускается принимать $\cos(\beta) \approx 1$.

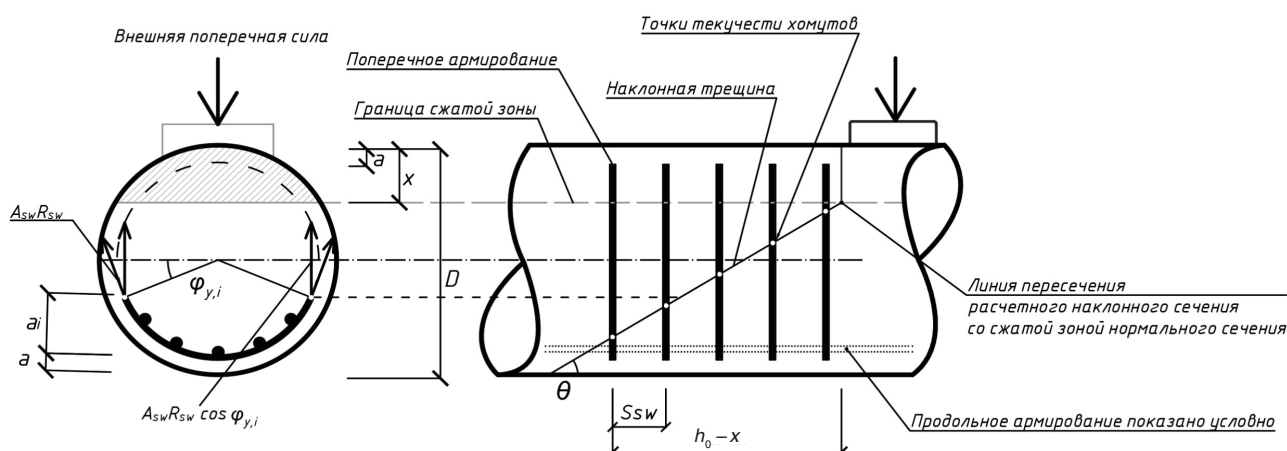


Рис. 6. Определение эффективности использования поперечной арматуры в элементах круглого сечения
Fig. 6. The calculating of the effectiveness of using of transverse reinforcement in circle cross-section elements

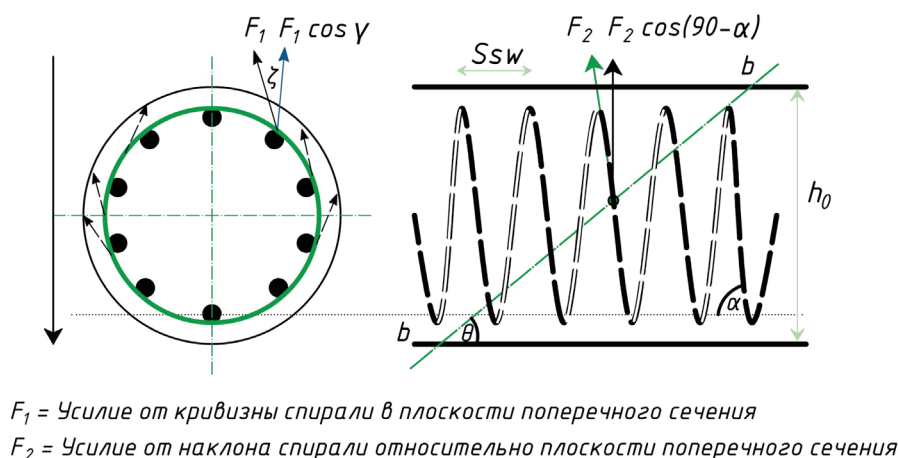


Рис. 7. Определение эффективности использования поперечной арматуры при применении спиральных хомутов
Fig. 7. The calculating of the effectiveness of using of transverse reinforcement when using the spiral clamps

По аналогии с прямоугольными элементами можно записать:

$$Q_{sw} = \varphi_{sw1} \times \varphi_{sw,inc} \times q_{sw} \times c, \quad (12)$$

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \times A_{sw}}{S_{sw}}. \quad (13)$$

где S_{sw} – шаг хомутов, при этом шаг хомутов должен соответствовать конструктивным требованиям, приведенным в [1], а расстояние c , учитываемое в формуле (12), должно приниматься не более $1,5h_0$. Последнее ограничение вводится в связи с тем, что угол наклона хомутов к вертикальной оси (т. е. к оси действия поперечной силы) в начале и в конце наклонной трещины равен приблизительно 90 градусов, т. е. данные хомуты практически не участвуют в работе на поперечную силу. Подобное ограничение присутствует, в частности, в [8], где принимается значение c , равное $1,0h_0$.

Значение коэффициента φ_{sw1} , учитывающего возможное отклонение реального дискретного количества хомутов в пределах проекции опасного наклонного сечения от теоретического значения, определяемого величиной q_{sw} , следует производить в соответствии с [1].

Окончательно можно записать для железобетонных элементов круглого сечения условие обеспечения прочности на действие поперечной силы по наклонной трещине:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw}, \quad (14)$$

где значение предельной поперечной силы, воспринимаемой бетоном Q_b , определяется по формуле (6), а воспринимаемой поперечной арматурой – по формуле (12).

Расчет железобетонных элементов круглого сечения на действие изгибающего момента по наклонной трещине следует производить по методике [1].

Сравнение результатов расчетов по предлагаемой методике с результатами экспериментов

Для проверки предлагаемых методик следует, по возможности, использовать экспериментальные данные, однако с учетом относительно малого количества испытаний железобетонных конструкций с нестандартной формой поперечного сечения данные экспериментов могут быть расширены при помощи результатов расчетов численными методами, верифицированными на экспериментальных данных. Указанный подход позволяет значительно расширить имеющуюся экспериментальную базу и увеличить возможности для анализа предлагаемых зависимостей.

Покажем применение предлагаемой методики для имеющихся экспериментальных данных опытных образцов с круглым поперечным сечением на действие поперечных сил. Отметим, что исследования, использованные для верификации предложенной методики, были выполнены за рубежом. При этом при проведении подобных экспериментов непосредственно прочность бетона на растяжение, как правило, исследователями не оценивается. В связи с этим был выполнен перевод установленной в опытах кубиковой или цилиндрической прочностей на сжатие опытных образцов к прочности бетона на растяжение.

Для проверки предлагаемой методики проведем сравнение с данными экспериментов, приведенными в работах [6, 14, 15].

При этом в работе [6] описано испытание трех образцов без поперечной арматуры с круглой формой поперечного сечения, диаметр круга равен 250 мм, рабочая высота для всех образцов – 200 мм.

Для образцов без поперечной арматуры разрушающее усилие составило 44–47 кН при среднем значении для трех образцов, равном 45,7 кН. Образцы с поперечным армированием, рассмотренные в [6], не учитываем, так как их разрушение произошло по нормальным сечениям от действия изгибающего момента, что в том числе показывает эффективность применения поперечного армирования в элементах круглого сечения. Характеристики опытных образцов, а также результаты сравнительного анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения расчета по предлагаемой методике с результатами экспериментов
Table 1
The results of comparing the calculation by the proposed method with the experimental results

Образец	D , мм	a , мм	h_0 , мм	c , мм	R_{bt} , МПа	Q_b , кН	q_{sw} , кН/м	Q_{sw} , кН	$Q_{calc} = Q_b + Q_{sw}$, кН	Q_{exp} , кН	Q_{exp}/Q_{calc}
Опыты R. Thamrin et al [6]											
BS-01	250	50	200	800	1,9	34,2	0	0,0	34,2	44,0	1,287
BS-02	250	50	200	800	1,9	34,2	0	0,0	34,2	46,0	1,345
BS-03	400	25	375	600	2,48	34,2	0	0,0	34,2	47,0	1,374
Опыты B.G. Ang et al [14]											
Unit 25	400	25	375	600	1,9	209,3	0	0,0	209,3	233,0	1,114
Unit 6	400	25	375	600	2,48	209,3	141	86,9	296,2	390,0	1,317

Продолжение таблицы 1

Образец	D , мм	a , мм	h_0 , мм	c , мм	R_{bt} , МПа	Q_b , кН	q_{sw} , кН/м	Q_{sw} , кН	$Q_{calc} = Q_b + Q_{sw}$, кН	Q_{exp} , кН	Q_{exp}/Q_{calc}
Unit 21	400	25	375	800	2,48	156,9	106	64,8	221,7	258,0	1,163
Unit 4	400	25	375	800	2,48	156,9	143	84,6	141,5	295,0	1,221
Unit 7	400	25	375	800	2,48	156,9	106	74,0	230,9	280,0	1,213
Unit 22	400	25	375	800	2,48	156,9	107	62,3	219,2	280,0	1,277
Опыты Т. Arakawa et al [15]											
Unit 1	275	35	240	300	2,32	110,2	85	31,2	141,4	176,4	1,247
Unit 2	275	35	240	300	2,32	110,2	170	62,4	172,6	203,8	1,180
Unit 15	275	35	240	450	2,32	73,5	113	51,7	125,2	179,6	1,434
Unit 16	275	35	240	450	2,32	73,5	242	110,8	184,3	176,9	0,960
Среднее											1,241
Среднеквадратичное отклонение											0,123
Коэффициент вариации											0,099
Минимальное значение											0,960
Обеспеченность 0,95											1,039
Количество результатов со значением менее 1,0 (шт/%)											1(7,7 %)

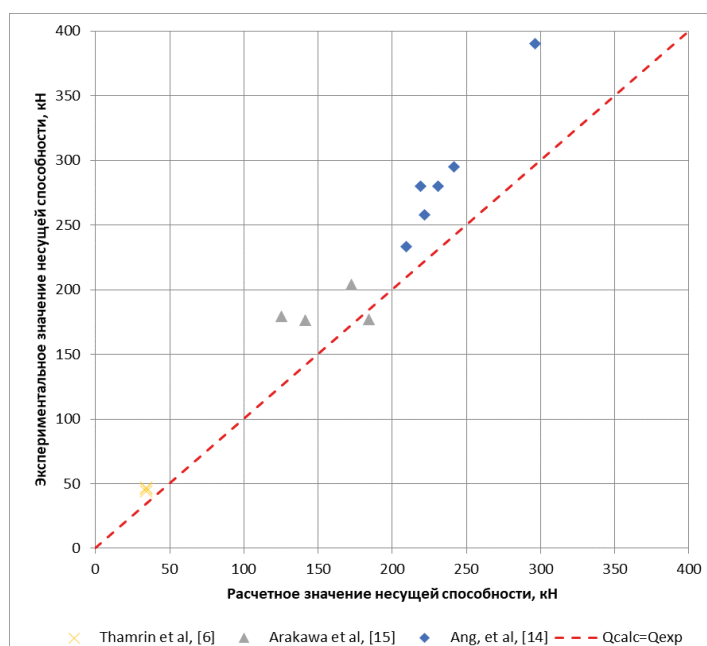


Рис. 8. Сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов по предлагаемой методике
Fig. 8. Comparison of results of experiment to results of calculations by the proposed methodology

Как видно из табл. 1, среднее значение отношения экспериментальной несущей способности к расчетному значению составило 1,241 при среднеквадратичном отклонении 0,123, при этом для образца, имеющего расчетную несущую способность выше экспериментальной, расчетом по нелинейной деформационной модели было установлено, что разрушение произошло от действия изгибающего момента по нормальному сечению.

Отдельно следует обратить внимание на параметр минимального значения. Надежность методики мож-

но считать обеспеченной в случае, если параметр минимального значения соотношения не ниже единицы. За исключением отдельного образца [15], для предложенной методики это условие соблюдается. Оценка по обеспеченности 0,95 показала, что методика обладает необходимой обеспеченностью – 1,64 стандартного отклонения от среднего значения при полученном коэффициенте вариации не ниже единицы.

Графические результаты сравнения экспериментального и расчетного значений несущей способности приведены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, предлагаемая методика обладает достаточным уровнем надежности и может быть рекомендована к дальнейшему использованию.

По результатам сравнительного анализа результатов расчета имеющихся экспериментальных данных по предлагаемой методике можно отметить, что наибольшее отклонение от результатов экспериментов и завышение расчетной несущей способности наблюдается для образцов с более высокой прочностью бетона. Кроме того, необходимо отметить малое количество проанализированных опытных данных для оценки надежности предложенной методики. В связи с этим представляется целесообразным выполнить проверку на большем количестве образцов, в том числе с выполнением дополнительных испытаний образцов, изготовленных из высокопрочного бетона (класса выше В60).

Результаты

Проанализированы результаты экспериментов, а также методики отечественных и зарубежных нормативных документов. По итогам анализа предложена методика определения несущей способности железобетонных элементов круглого сечения на действие поперечной силы по наклонной трещине. Дополнительно к этому разработана методика учета поперечного армирования элементов круглого сечения с учетом наклона данной арматуры к плоскости изгиба.

По результатам выполненного сравнения предложенной методики с данными экспериментов установлено, что предложенная методика обеспечивает необходимый уровень надежности – среднее отношение экспериментальной несущей способности к расчетному значению составляет 1,241 при среднеквадратичном отклонении 0,123.

Установлено, что наибольшее отклонение результатов расчета по предлагаемой методике от опытных данных наблюдается для бетонов с более высокой прочностью, что может быть вызвано также нехваткой опытных данных. Для оценки возможности применения предлагаемой методики, ее развития и верификации представляется полезным провести дополнительные экспериментальные и численные исследования образцов, в том числе из высокопрочных бетонов.

Выводы

Установлено, что разрушение изгибаемых железобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил происходит по схемам, аналогичным широко исследованным элементам с прямоугольным поперечным сечением.

Предложена методика для оценки несущей способности изгибаемых железобетонных элементов круглого сечения на действие поперечной силы по наклонной трещине. При разработке методики учтена

преемственность с действующими нормативными документами в части элементов прямоугольного сечения.

Предложена методика учета хомутов кольцевого сечения при расчете несущей способности железобетонных элементов на действие поперечных сил.

Выполнена верификация предложенной методики с учетом имеющихся результатов экспериментов. По результатам верификации установлено, что предлагаемая методика имеет необходимый уровень надежности.

При этом с целью дополнительной проверки методики и дальнейшего ее внедрения для практического применения целесообразно проведение дополнительных экспериментальных и численных исследований, в том числе для высокопрочных бетонов.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Стандартинформ, 2019.
2. Боришанский М.С. Расчет отогнутых стержней и хомутов по стадии разрушения [диссертация]. 1942.
3. Залесов А.С. Сопротивление железобетонных элементов при действии поперечных сил. Теория и новые методы расчета прочности [диссертация]. Москва, 1979. 369 с.
4. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва, 1985.
5. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84). Москва: Центральный институт типового проектирования, 1989. 192 с.
6. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 713, no. 1, 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012029>.
7. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев: Будивэльный, 1989. 104 с.
8. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2019.
9. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
10. IS 456:2000. Plain and reinforced concrete – code of practice (fourth Revision). Bureau of Indian Standards, 2000.
11. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А., Жарких А.С. Оценка надежности метода расчета прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения // *Вестник НИЦ*

- «Строительство». 2022. № 2 (33). С. 139–149. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-139-149](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-139-149). EDN: FBWFRF.
12. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А. О расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 70–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74>. EDN: AGUOMO.
 13. Kowalsky M.J., Priestley M.J.N. Improved Analytical Model for Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns in Seismic Regions. *ACI Structural Journal*. 2000, vol. 97, no. 3, pp. 388–396.
 14. Ang B.G., Priestley M.J.N., Paulay T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 1989, vol. 86(1), pp. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.14359/2634>.
 15. Arakawa T., He M.X., Arai Y., Mizoguchi M. Ultimate shear strength of spirally confined concrete columns. *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 1987, no. 9, pp. 305–312.
 16. AlaaEldin Abouelleil, M.S., Hayder Rasheed. Report No. K-TRAN: KSU-14-4. Kansas Department of Transportation Column Expert: Ultimate Shear Capacity of Circular Columns Using the Simplified Modified Compression Field Theory, September 2015.
 17. Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И. Оценка методик расчета железобетонных элементов по прочности при двухосевом действии поперечных сил // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. № 8. С. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-8-39-53>.
 18. Руководство по проектированию и устройству заглубленных инженерных сооружений. НИИСК Госстроя СССР. Москва: Стройиздат, 1986.
 7. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. Strength of reinforced concrete structures under the action of shear forces. Kiev: Budivelnik, 1989, 104 p. (In Russian).
 8. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2019.
 9. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
 10. IS 456:2000. Plain and reinforced concrete – code of practice (fourth Revision). Bureau of Indian Standards, 2000.
 11. Mukhamediev T.A., Zenin S.A., Zharkikh A.S. The reliability assessment of the method for calculating the strength of oblique sections in reinforced concrete elements with various cross-sectional shape. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022, no. 2 (33), pp. 139–149. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-139-149](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-139-149). EDN: FBWFRF.
 12. Mukhamediev T.A., Zenin S.A. On the calculation of the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-section shapes. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2022, no. 8, pp. 70–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-70-74>. EDN: AGUOMO.
 13. Kowalsky M.J., Priestley M.J.N. Improved Analytical Model for Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns in Seismic Regions. *ACI Structural Journal*. 2000, vol. 97, no. 3, pp. 388–396.
 14. Ang B.G., Priestley M.J.N., Paulay T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 1989, vol. 86(1), pp. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.14359/2634>.
 15. Arakawa T., He M.X., Arai Y., Mizoguchi M. Ultimate shear strength of spirally confined concrete columns. *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 1987, no. 9, pp. 305–312.
 16. AlaaEldin Abouelleil, M.S., Hayder Rasheed. Report No. K-TRAN: KSU-14-4. Kansas Department of Transportation Column Expert: Ultimate Shear Capacity of Circular Columns Using the Simplified Modified Compression Field Theory, September 2015.
 17. Shipulin S.A., Belyaeva Z.V., Mironova L.I. Evaluation of calculation methods of reinforced concrete elements subjected to biaxial action of shear forces. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024, no. 8, pp. 39–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-8-39-53>.
 18. Manual for design and building of underground structures. Research institute of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ., 1986 (In Russian).

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
2. Borishansky M.S. Analysis of inclined rebars and stirrups in collapse stage [dissertation]. 1942. (In Russian).
3. Zalesov A.S. Resistance of reinforced concrete elements under the action of transverse forces. Theory and new methods of strength calculation [dissertation]. Moscow, 1979, 369 p. (In Russian).
4. SNiP 2.03.01-84*. Concrete and reinforced concrete structures. Moscow, 1985. (In Russian).
5. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy lightweight concrete without prestressing reinforcement (to SNiP 2.03.01-84). Moscow: Central Institute for Standard Design, 1989, 192 p. (In Russian).
6. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with

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

Сергей Алексеевич Зенин✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab01@mail.ru

Sergey A. Zenin✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of Reinforced Concrete and Constructive Systems, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab01@mail.ru

Евгений Александрович Редикульцев, аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург

Evgeniy A. Redikultsev, Postgraduate Student, FSAEI HE Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



Розенталь Н.К., Чехний Г.В.

Морозостойкость бетона. Обзор / Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний. – М.: АО «НИЦ «Строительство», 2023. – 156 с.

ISBN 978-5-9903545-5-5

Монография «Морозостойкость бетона. Обзор» посвящена изучению проблемы морозостойкости бетона. Авторы рассматривают широкий круг вопросов, касающихся гипотез морозостойкости, методов испытаний, назначения марок по морозостойкости, а также технологии изготовления морозостойких бетонов и оценки состояния бетона в конструкциях после длительной эксплуатации в условиях морозного воздействия.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся изучением бетона и железобетона, инженерно-технических работников проектных и строительных организаций, преподавателей и студентов соответствующих вузов.

С.И. ИВАНОВ¹, Е.Н. ПАНЬКОВ², А.А. КВАСНИКОВ^{1,3,✉}

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 ООО «Инфорспроект», ул. Ленинская слобода, д. 19, г. Москва, 115280, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ И ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМАМИ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШПОНОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация

Введение. Обеспечение совместной работы усиливаемой конструкции и конструкций усиления является ключевым фактором для успешного усиления конструкций. Традиционные методы обеспечения совместной работы не всегда применимы на практике. Один из возможных методов – создание бетонных шпонок в усиливаемой конструкции и передача с них усилий на стальные пластины-шпонки, закрепленные на конструкциях усиления (балки) или наоборот (колонны).

Цель. Проиллюстрировать применение рассматриваемого метода на примере усиления монолитных железобетонных балок и стальных колонн.

Материалы и методы. Усиление выполнялось с применением современных строительных материалов, в том числе строительной химии фирмы Мапей, и современных методов, в том числе лазерной очистки поверхности стальных конструкций от продуктов коррозии.

Результаты. Было установлено, что применение рассматриваемого метода включения конструкций усиления в работу не требует уникальной квалификации исполнителя, метод достаточно прост в реализации, включение конструкций усиления косвенно подтверждено результатами мониторинга конструкций, однако вследствие условий эксплуатации конструкций их испытание (в том числе до разрушения) не выполнялось.

Выводы. Рассмотренный в статье метод может быть рекомендован для применения в сложных условиях. Однако необходимо провести экспериментальную проверку путем испытания конструкций до разрушения.

Ключевые слова: усиление железобетонных конструкций, совместная работа усиления и конструкции, бетонные шпонки, армирование, несущая способность, прочность, арматура

Для цитирования: Иванов С.И., Паньков Е.Н., Квасников А.А. Усиление сжатых и изгибаемых железобетонных конструкций системами внешнего армирования с применением шпоночных соединений // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 19–26. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-19-26](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-19-26). EDN: IPAEMJ

Вклад авторов

Иванов С.И. – разработка проектного решения по усилению балок и колонн, оформление проекта усиления, подготовка статьи.

Паньков Е.Н. – разработка проектного решения по усилению балок и оформление проекта усиления.

Квасников А.А. – корректировка проектных решений по усилению конструкций, подготовка статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.05.2025

Поступила после рецензирования 04.07.2025

Принята к публикации 07.07.2025

S.I. IVANOV¹, E.N. PANKOV², A.A. KVASNIKOV^{1,3,✉}

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 LLC "Inforsproekt", Leninskaya Sloboda str., 19, Moscow, 115280, Russian Federation

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

STRENGTHENING OF THE COMPRESSED AND BENT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH EXTERNAL REINFORCEMENT SYSTEMS USING KEYED CONNECTIONS

Abstract

Introduction. Ensuring of the joint operation of the reinforced structure and the reinforcement structures is a key factor for successful reinforcement of structures. Traditional methods of ensuring of the joint operation are not always applicable in practice. One possible method is to create concrete keys in the reinforced structure and transfer forces from them to steel key plates fixed on the reinforcement structures (beams) or vice versa (columns).

Aim. To illustrate the application of the method under consideration, we used the example of reinforcing of the monolithic reinforced concrete beams and steel columns.

Materials and methods. The reinforcement was carried out using modern construction materials, including Mapei construction chemicals, and modern methods, including laser cleaning of the surface of steel structures from corrosion products.

Results. It was found that the application of the method under consideration does not require unique qualifications from the performer, and the method is quite effective. The inclusion of reinforcement structures is indirectly confirmed by the results of structure monitoring, but due to the operating conditions of the structures, they have not been tested (including failure test).

Conclusions. The method discussed in the article can be recommended for use in difficult conditions. However, it is necessary to conduct an experimental verification by testing the structures to failure.

Keywords: reinforcement of reinforced concrete structures, joint work of reinforcement and structure, concrete keys, reinforcement, bearing capacity, strength, rebar

For citation: Ivanov S.I., Pankov E.N., Kvasnikov A.A. Strengthening of the compressed and bent reinforced concrete structures with external reinforcement systems using keyed connections. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 19–26. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-19-26](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-19-26). EDN: IPAEMJ

Authors contribution statement

Ivanov S.I. – development of a design solution for beams and columns strengthening, design of a strengthening project and preparation of the article.

Pankov E.N. – development of a design solution for beams and design of a strengthening project.

Kvasnikov A.A. – adjustment of design solutions for structures strengthening and preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.05.2025

Revised 04.07.2025

Accepted 07.07.2025

Введение

При усилении железобетонных конструкций наращиванием сечения основным вопросом является обеспечение совместной работы усиливаемой конструкции и конструкций усиления. Для обеспечения совместной работы бетона усиливаемой конструкции с бетоном усиления необходимо как при проектировании, так и при производстве работ уделять внимание мероприятиям, способствующим повышению сцепления старого бетона с новым.

Традиционные методы усиления хорошо известны и приведены в нормативной документации [1]:

- добавление или замена замоноличенных или наружных арматурных стержней;
- добавление арматуры, закрепляемой в заранее сформированных или пробуренных каналах;
- внешнее армирование приклеиванием полос, холстов, сеток;
- добавление бетона или раствора;
- инъектирование в трещины, пустоты или полости;
- заполнение трещин, пустот или полостей;
- установка предварительно напряженной арматуры;
- усиление жесткими или упругими опорами;
- устройство обойм из стального проката;
- усиление заменяющими конструкциями.

Данные методы широко применяются в практике [2], при выборе конструкций усиления необходимо уделить особое внимание требованиям технологии выполнения работ, условиям эксплуатации. Технологические требования включают перечень указаний и ограничений, устанавливающих соответствие конструкций усиления (толщина и конфигурация обойм, вид армирования и др.) параметрам применяемой оснастки, оборудования, инструмента и т. п.

Методы приварки новой арматуры к старой через коротыши и накладки; создание замкнутых обойм с включением в работу за счет обжатия при усадке бетона подробно описаны в [3].

Метод выполнения шпонок вдоль контакта сборной и монолитной части конструкций и методики расчета описаны в своде правил [4]. При этом на поверхностях сборных элементов, соприкасающихся с бетоном омоноличивания, следует устраивать шпонки, шероховатость поверхностей контакта, продольные выступы и пазы, выпускать арматуру в соответствии с расчетными или конструктивными требованиями.

Метод расчета и конструирования шпонок в стаканах фундаментов отражен в своде правил [5].

Метод установки и учета в расчетах дополнительной арматуры поперек швов бетонирования отражен в [6].

В ряде случаев традиционные методы не позволяют включить в работу конструкции усиления. Например, на одном из объектов было выявлено отступление от проекта в виде изменения отметок верхней и нижней граней балок, которое привело к снижению проектной длины анкеровки верхней рабочей арматуры (рис. 1). Кроме того, было выявлено увеличение толщины защитного слоя бетона до рабочей арматуры более чем в 2 раза. В результате фактическая несущая способность опорного сечения при действии моментов составила не более 60 % проектной величины, этого было недостаточно для обеспечения прочности, жесткости и трещиностойкости балки, потребовалось ее усиление. Несущая способность наклонных сечений была обеспечена.

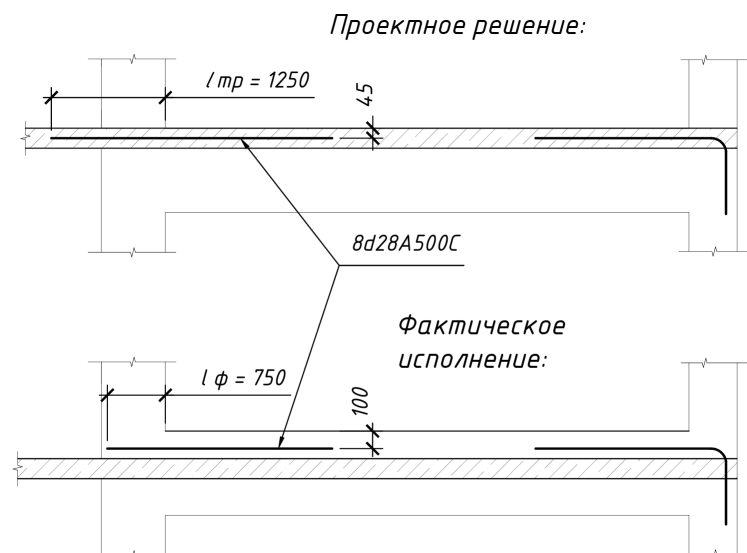


Рис. 1. Изменение проектного решения монолитной железобетонной балки
Fig. 1. Change in the design of the monolithic reinforced concrete beam

Дефицит верхнего армирования был достаточно значительным – дополнительное армирование превышало установленное по проекту. Приварка к установленной арматуре новой арматуры усиления через коротыши вызывало вопросы надежности, так как это приводило к большому плечу силы и эксцентриситетам, не позволяющим применить сварные швы по ГОСТ 14098-2014 [7]. Вариант устройства усиления с помощью шпренгеля применить не получилось, так как при расположении плиты в средней части балки для пропуска наклонных ветвей шпренгеля требовалось фактически вырубить участки опоры плиты на балки, что в данных условиях было неприемлемо.

В связи с вышеизложенным, с учетом повышенной прочности бетона (фактическая прочность была выше проектной), было решено выполнить включение в работу новой арматуры усиления с применением бетон-

ных шпонок, выполненных в бетоне над ослабленной арматурой (рис. 2): усилия на арматуру передавались через приваренные стальные пластины, передающие сдвиг. Эти пластины вклеены в штрабы, выполненные в бетоне балок, с применением клеевого состава для химических анкеров.

Участки бетона между штрабами рассчитывались как шпонки. Участки с растянутым бетоном в расчете не учитывались. По требованиям [8] в расчете учитывались три шпонки. В запас прочности было запроектировано шесть шпонок. Чтобы при эксплуатации шпонки не отклеились, поперечное сечение было охвачено стальной обоймой с преднапряженной поперечной арматурой (рис. 3).

Усиление балок было выполнено увеличением площади растянутой арматуры в опорных сечениях. Для усиления было назначено армирование 4d36A500C.

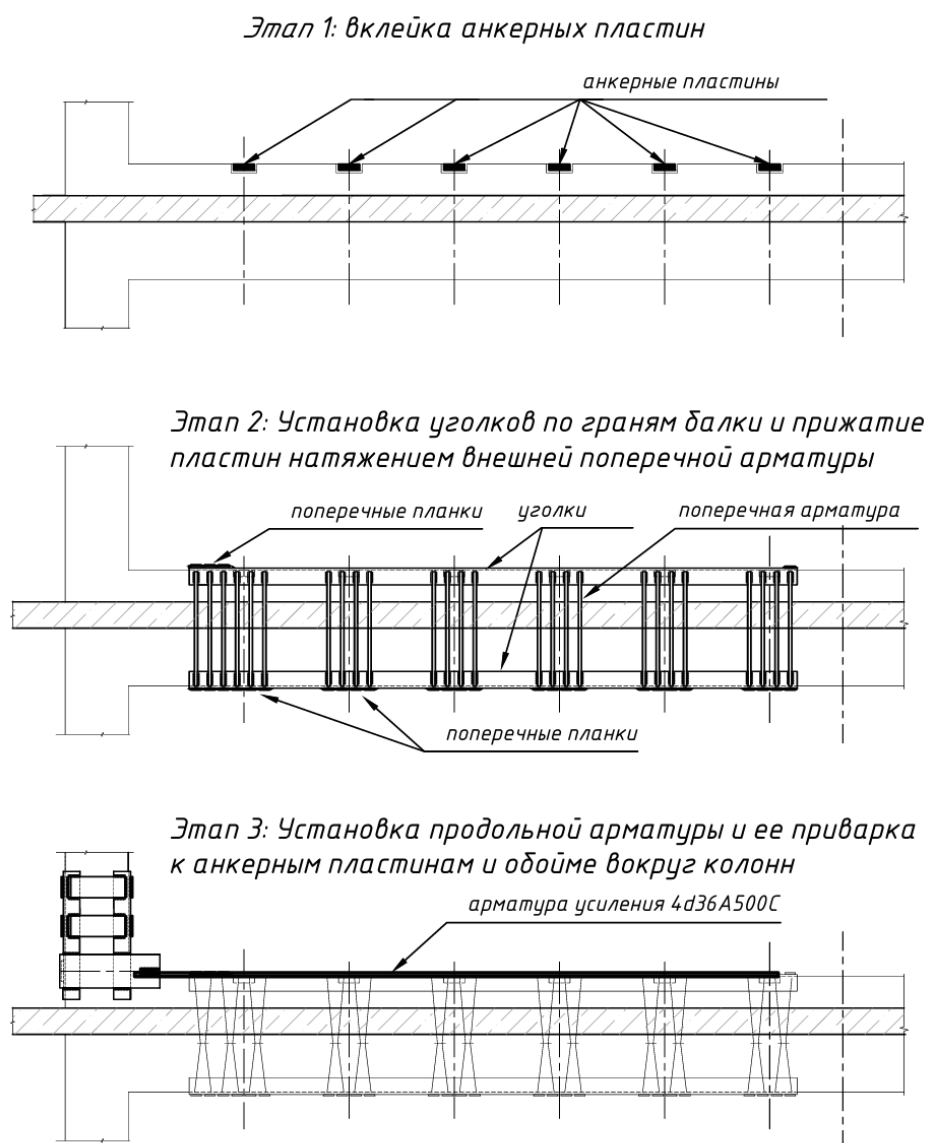


Рис. 2. Принципиальное решение и последовательность выполнения усиления
Fig. 2. Fundamental solution and sequence of reinforcement execution

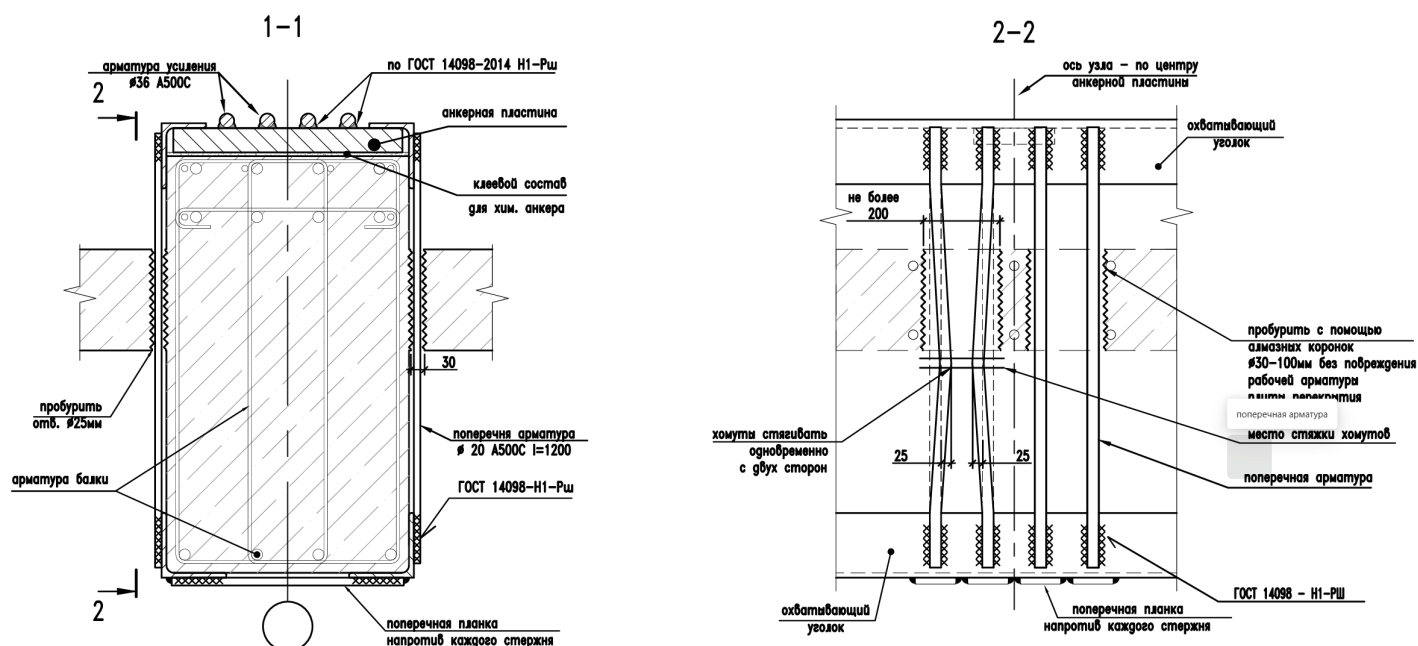


Рис. 3. Поперечное сечение усиливаемых балок
Fig. 3. Cross-section of reinforced beams

При назначении расчетной площади в запас прочности учитывалась возможность повреждения арматуры во время выполнения сварочных работ с помощью коэффициента 0,75 [2].

Общий вид фрагментов конструкций усиления представлен на рис. 4.

В местах с ограниченным доступом для устранения зазоров между бетоном и конструкциями усиления выполнялось нагнетание смеси *Mapei Stabilcem*.

Усиление балок было выполнено в течение 1–1,5 месяцев, перед началом работ была выполнена геодезическая съемка прогибов. После завершения монтажа конструкций усиления, замыкания продольной арматуры усиления и натяжения поперечной арматуры усиления прогиб балок, по данным геодезических измерений, уменьшился, что свидетельствовало о включении конструкций усиления в работу.



а (а)



б (б)



в (с)



г (д)

Рис. 4. Фрагменты конструкций усиления: а – вклейка стальных пластин; б, в – установка охватывающих обойм; г – конструкция крепления к колонне

Fig. 4. Fragments of reinforcement structures: а – gluing of steel plates; б, с – installation of enveloping clamps; д – structure of attachment to the column

Условия эксплуатации не позволили выполнить испытание усиленных конструкций нагружением, однако результаты мониторинга в течение более года подтвердили надежность выполненного усиления: после нагружения конструкций газобетонными перегородками и отделкой приложения эксплуатационной нагрузки прогибы усиленных балок не увеличились.

Включение конструкций усиления в работу усиливаемой конструкции с применением бетонных шпонки было реализовано при усилении внецентренно сжатого элемента в усиливаемой колонне при передаче усилия со стального сечения на бетон подколонника (рис. 5). Причина усиления – потеря более 50 % стального сечения вследствие коррозии.

Было принято решение: восстановление опорного сечения выполнять путем замены стального сечения на железобетонное, выполненное в виде замкнутой прямоугольной обоймы толщиной 160 мм, с заполнением бетоном центральной части сечения.

Для передачи напряжений с колонны на бетон опорной зоны было запроектировано три шпонки глубиной 2 см с шагом не менее 13 см в свету между шпонками (рис. 6). Было назначено четыре шпонки в запас прочности: три шпонки расположены на неповрежденной части стального сечения колонны, одна шпонка расположена в зоне наибольшего повреждения коррозией.



а (a)



б (b)



в (c)

Рис. 5. Общий вид колонны (a) и расположенной выше балочной клетки, опорного участка (б) и локальных повреждений (в) сечения

Fig. 5. General view of the column (a) and the beam cage above it, the support section (b), and local damage (c)

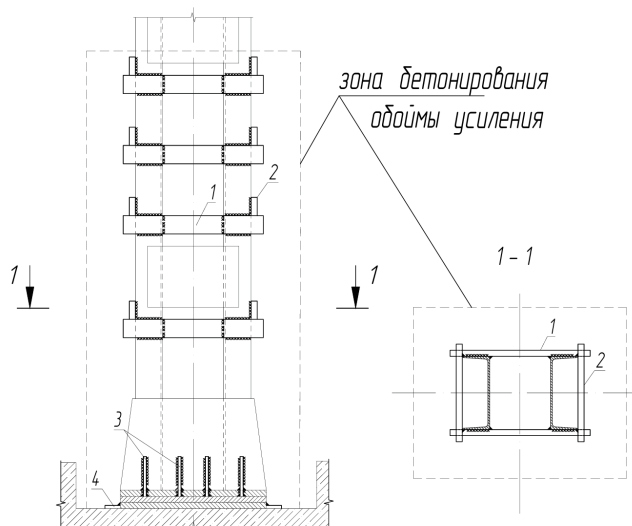


Рис. 6. Схема расположения стальных пластин сечением 20 × 60 мм (поз. 1 и 2), образующих шпонки, и пластин (поз. 3 и 4) для приварки продольных арматурных стержней обоймы усиления

Fig. 6. Layout of steel plates with a cross-section of 20 × 60 mm (positions 1 and 2), which form the keys, and plates (positions 3 and 4) for welding the longitudinal reinforcement rods of the reinforcement cage

Перед началом усиления выполнялось временное переопирание балок, опертых на усиливаемую колонну, выполнялась очистка продуктов коррозии. Было установлено, что лазерная очистка продуктов коррозии дает хороший результат только после тщательной механической очистки с помощью щеток со стальным ворсом. Затем выполнялась приварка элементов усиления, очистка от окалины и нанесение на очищенные поверхности состава *Марефер 1К* (рис. 7).

Усиление колонн выполнялось силами заказчика, не имевшего опыта общестроительных работ. Несмотря на это, усиление одной колонны было выполнено ориентировочно за 3 месяца, что свидетельствовало о простоте конструкции даже для неспециализированного исполнителя.

Выводы

По результатам разработанных проектов усиления и их реализации можно утверждать, что совместная работа старой и новой конструкций обеспечивается за счет применения шпонок путем передачи напряжений со стержней усиления на стальные пластины, установленные в выполненные на верхней грани балки штрабы.

Данное решение показало простоту и технологичность с учетом соблюдения надежности и безопасности строительных конструкций.

Список литературы

1. СП 349.1325800.2017. Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта и усиления. Москва: Стандартинформ, 2017.
2. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Наземные конструкции и сооружения. НИИЖБ Госстроя СССР. Москва: Стройиздат, 1992.
3. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций изменением их конструктивной схемы. Ленинград: Стройиздат, 1949. 254 с.
4. СП 337.1325800.2017. Конструкции железобетонные сборно-монолитные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2017.
5. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.
6. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87.
7. ГОСТ 14098-2014. Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры. Москва: Стандартинформ, 2015.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003. Москва, 2018.



Рис. 7. Общий вид конструкций усиления перед установкой опалубки
Fig. 7. General view of reinforcement structures before formwork installation

References

1. SP 349.1325800.2017. Concrete and reinforced concrete structures. Rules of structural reinforcement and repair. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
2. Recommendations on the design of reinforcement of reinforced concrete structures of buildings and structures of reconstructed enterprises. Ground structures and constructions. NIIZhB of Gosstroy of the USSR. Moscow: Stroyizdat Publ., 1992. (In Russian).
3. Onufriev N.M. Reinforcement of the reinforced concrete structures by changing their structural scheme. Leningrad: Stroyizdat Publ., 1949, 254 p. (In Russian).
4. SP 337.1325800.2017. Prefabricated reinforced concrete construction. Design rules. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
5. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83*. (In Russian).
6. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87. (In Russian).
7. State Standard 14098-2014. Welded joints of reinforcement and inserts for reinforced concrete structures. Types, constructions and dimensions. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
8. 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

Сергей Ильич Иванов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией № 7, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey I. Ivanov, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory No. 7, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Евгений Николаевич Паньков, канд. техн. наук, главный специалист, ООО «Инфорспроект», Москва

Evgeny N. Pankov, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist, LLC "Inforsproekt", Moscow

Александр Анатольевич Квасников✉, канд. техн. наук, руководитель центра № 23, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: a.a.kvasnikov@gmail.com

Alexander A. Kvasnikov✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Center No. 23, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: a.a.kvasnikov@gmail.com

✉Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.074

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44)**И.Г. ОВЧИННИКОВА¹, И.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}, Б.С. СОКОЛОВ^{1,✉}**

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

РАБОТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЛИТ В ТРЕХОСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация

Введение. В данной работе приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований железобетонных цилиндрических элементов в трехосном напряженном состоянии.

Цель. Основной задачей данной работы явился анализ экспериментальных данных о влиянии различных конструктивных и силовых факторов на напряженно-деформированное состояние предварительно напряженных железобетонных элементов в трехосном напряженном состоянии на всех стадиях их работы, а также разработка методики их расчета.

Материалы и методы. Использованы материалы ранее выполненных экспериментальных исследований на предварительно напряженных железобетонных образцах цилиндрической формы с навитой по боковой поверхности напряженной проволочной арматурой. Расчеты выполнены методом конечных элементов в физически нелинейной постановке с использованием программного комплекса ATENA.

Результаты. Выполнен анализ экспериментальных данных влияния на несущую способность цилиндрических образцов соотношения их геометрических размеров, прочности бетона, степени бокового обжатия. Рассмотрены особенности характера деформирования под нагрузкой образцов в обойме, поведения при многократном повторном нагружении. Выполнено расчетное конечно-элементное моделирование работы трехосно нагруженных цилиндрических плит на всех стадиях вплоть до разрушения, приведены полученные результаты и сопоставление с экспериментальными данными.

Выводы. Определены рекомендуемые значения геометрических и силовых параметров, обеспечивающие наиболее рациональные конструктивные решения толстых плит, работающих в условиях трехосного напряженного состояния. Разработана методика расчета таких конструкций.

Ключевые слова: железобетон, цилиндрическая плита, преднапряженная арматура, трехосное напряженное состояние, физическая нелинейность, трещинообразование, станина прессы, экспериментальные исследования, конечно-элементный расчет

Для цитирования: Овчинникова И.Г., Черный И.А., Соколов Б.С. Работа железобетонных цилиндрических плит в трехосном напряженном состоянии // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 27–44. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44). EDN: CDXULK

Вклад авторов

Овчинникова И.Г. – сбор и анализ экспериментальных данных, написание статьи.

Черный И.А. – выполнение и анализ результатов расчетов, написание статьи.

Соколов Б.С. – анализ результатов расчетов, написание статьи.

Финансирование

Исследование финансировалось за счет средств АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.06.2025

Поступила после рецензирования 12.07.2025

Принята к публикации 17.07.2025

I.G. OVCHINNIKOVA¹, I.A. CHERNYI^{1,2}, B.S. SOKOLOV^{1,✉}

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

THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE CYLINDRICAL SLABS IN A TRIAXIALLY STRESSED STATE

Abstract

Introduction. This paper presents the results of experimental and theoretical studies of reinforced concrete cylindrical elements in a triaxially stressed state.

Aim. The main objective of this work was to analyze experimental data on the influence of various structural and force factors on the stress-strain state of prestressed reinforced concrete elements in a triaxially stressed state at all stages of their operation, as well as to develop a methodology for their calculation.

Materials and methods. The materials of previously performed experimental studies on prestressed reinforced concrete samples of cylindrical shape with stressed wire reinforcement wound along the side surface were used. The calculations were performed by the finite element method in a physically nonlinear formulation using the ATENA software package.

Results. The analysis of experimental data on the effect on the bearing capacity of cylindrical samples of the ratio of their geometric dimensions, concrete strength, degree of lateral compression. The features of the nature of deformation under load of samples in the cage, their behavior during repeated loading are considered. Computational finite element modeling of the operation of triaxially loaded cylindrical slabs at all stages up to destruction is performed, the results obtained and comparison with experimental data are presented.

Conclusions. Recommended values of geometric and force parameters have been determined, providing the most rational design solutions for thick slabs operating in a triaxially stressed state. A method for calculating such structures has been developed.

Keywords: reinforced concrete, cylindrical slab, prestressed reinforcement, triaxially stressed state, physical nonlinearity, crack formation, press frame, experimental studies, finite element analysis

For citation: Ovchinnikova I.G., Chernyi I.A., Sokolov B.S. The behavior of reinforced concrete cylindrical slabs in a triaxially stressed state. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 27–44. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-27-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-27-44). EDN: CDXULK

Authors contribution statement

Ovchinnikova I.G. – collection and analysis of experimental data, writing the article.

Chernyi I.A. – performing and analyzing calculation results, writing the article.

Sokolov B.S. – analysis of calculation results, writing the article.

Funding

The study was funded by JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.06.2025

Revised 12.07.2025

Accepted 17.07.2025

Введение

Экспериментальные исследования двухосно и трехосно напряженного состояния железобетона применительно к станинам прессов и клетям прокатных станов проводились в НИИЖБ с 1957 по 1996 г. под научным руководством д-р техн. наук, проф. И.Г. Людовского.

Рассматривались разные формы станин: цилиндрические, эллиптические и квадратные в плане. Так, для кузнечно-прессового оборудования целесообразным оказалось использовать трехосно преднапряженные железобетонные цилиндрические формы, обеспечивающие станине все необходимые прочностные и деформативные свойства при эксплуатации (рис. 1). Раму станины целесообразно разделять на отдельные элементы – стенки и ригели, а в дальнейшем соединять между собой вертикальными стержнями или проволокой с натяжением на бетон после набора бетоном необходимой прочности.

При действии эксплуатационной нагрузки стенки станин работают на растяжение с некоторым эксцентриситетом. Верхний ригель воспринимает эксплуатационную нагрузку через пирамиду штампов, распределяющих ее до величины, безопасной для железобетона. Усилия натяжения арматуры действуют на бетон постоянно, увеличиваясь в момент работы пресса до максимального значения.

В цилиндрических станинах ригели выполняют в виде круглых железобетонных плит большой толщины, армированных в направлении, перпендикулярном действию усилия пресса. Напрягаемой арматурой обжимают плиту снаружи, что позволяет обеспечить

малые габариты деталей и снижение веса конструкции. Подобные решения применяют также для сильно нагруженных деталей машин, таких как головки растяжных машин, подвижные траверсы, плиты и др., где элементы машин работают как толстые железобетонные плиты, опертые по контуру или по части контура и нагруженные центральной или эксцентрично приложенной многократно повторяющейся нагрузкой.

В ходе экспериментальных исследований определяли влияние основных факторов на несущую способность ригелей на образцах, представляющих собой толстые плиты цилиндрической формы. Напряженное состояние этих плит при изменении основных параметров, влияющих на конструкцию ригеля, изучалось на образцах размером в 2–3 раза меньше натурных размеров ригелей прессов. Всего было испытано до разрушения около 100 образцов.

В поисках рациональных параметров конструкции ригелей методика изготовления и исследования всех образцов была принята одинаковой. На боковую поверхность образцов навивали с натяжением стальную проволоку диаметром 4–5 мм (ГОСТ 7348-55 [1]) в 1–3 слоя, создавая предварительное напряжение сжатия в бетоне. Натяжение арматуры производили через 15–28 дней после изготовления с использованием намоточной машины ДН-5.

Образцы испытывали в прессе усилием 10 000 кН и на горизонтальной машине 15 000/30 000 кН, опирая их на жесткое металлическое кольцо с наружным диаметром, равным диаметру образца. Конструкция образцов и схема нагружения были приняты наиболее простыми и ясными.

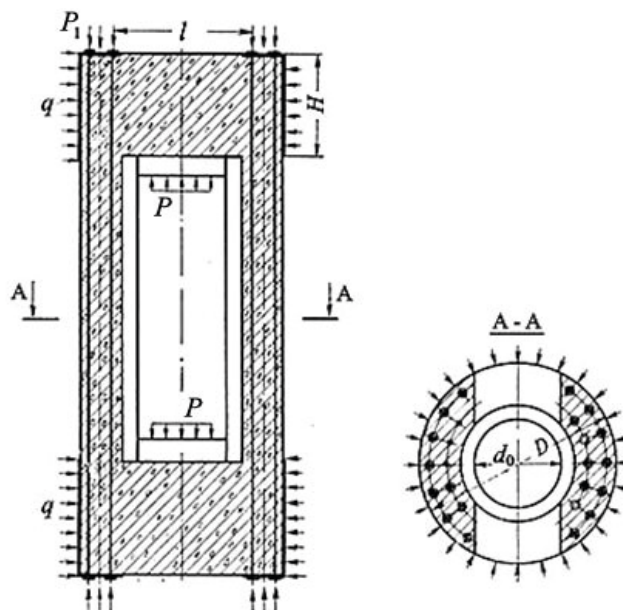


Рис. 1. Схема нагрузок на цилиндрическую станину пресса: P – рабочее усилие; P_1 – давление продольной рабочей арматуры; q – давление поперечной напряженной обоймы

Fig. 1. Diagram of the loads on the cylindrical bed of the press: P is the working pressure; P_1 is the pressure of the longitudinal working reinforcement; q is the pressure of the transverse stressed cage

Для определения напряженного состояния образцов использовали наружные и глубинные тензодатчики, которыми измеряли деформации бетона в аксиальном, радиальном и тангенциальном направлениях. Кроме того, контролировали усилия натяжения арматуры на бетон.

Влияние бокового обжатия цилиндров в зависимости от прочности бетона

Исследования проводили на двух сериях цилиндрических образцов, которые различались размерами. В образцах каждой серии создавали разные величины бокового обжатия. В серии КПО было испытано 27 образцов цилиндрической формы диаметром 50 см, высотой 40 см, установленных на кольцо с внутренним диаметром 30 см, диаметр штампа

составлял 22,5 см. Прочность бетона на момент испытания была 53,5–60,0 МПа (табл. 1, рис. 2).

Для преднапряжения бетона на боковую поверхность в образцах использовали проволоку диаметром 4 мм с фактическим пределом прочности при растяжении 1700 МПа. При натяжении учитывали потери напряжения в арматуре в размере 30,0 МПа. Кроме того, учитывали потери напряжения в арматуре от упругой деформации бетона под витками. По данным [2], эта величина составляла по $0,05P$ от каждого последующего слоя, где P – усилие натяжения проволоки. В серии КПО величины преднапряжения бетона составляли с учетом потерь напряжения 2,5; 5,0; 8,0; 12,0; 17,0 и 25,0 МПа, а объемный коэффициент армирования – 0,025, 0,050 и 0,075.

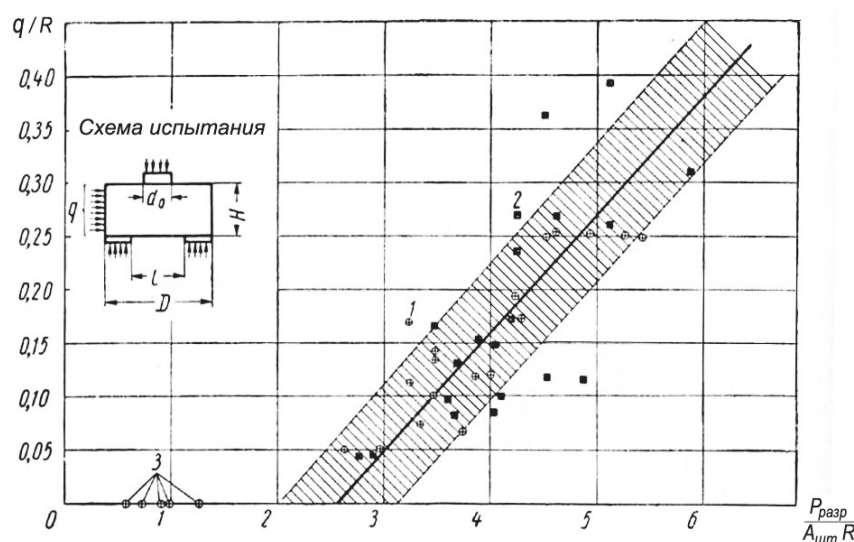


Рис. 2. Разрушающая нагрузка образцов [2] от величины предварительного обжатия: 1 – серии ВП; 2 – серии КПО; 3 – серии ВП без обжимы

Fig. 2. Destructive load of samples [2] from the value of pre-compression: 1 – VP series; 2 – KPO series; 3 – VP series without cage

Таблица 1

Испытания образцов серии КПО [2]

Table 1

Testing of KPO series samples [2]

Шифр образца	Прочность бетона при испытании, МПа	Основные размеры, см			Предварительное напряжение			Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Высота, H	Высота обжимы, h	Усилие в проволоке, кН	Число слоев обжимы	Величина обжатия, МПа			
КПО-1	53,5	51,0	40,7	38,0	3	1	2,57	6,70	167,5	53,3
КПО-2	66	51,0	41,0	36,0			2,57	7,99	200,0	63,6
КПО-3	63	51,2	41,0	36,0			2,55	7,59	190,0	60,5

Продолжение таблицы 1

Шифр образца	Прочность бетона при испытании, МПа	Основные размеры, см			Предварительное напряжение			Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольце при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Высота, H	Высота обоймы, h	Усилие в проволоке, кН	Число слоев обоймы	Величина обжатия, МПа			
КПО-4	63	52,0	39,8	37,8	6	1	5,60	7,95	197,5	63,4
КПО-5			42,0	39,5				9,40	235,0	74,8
КПО-6			39,8	37,0				6,75	169,0	53,8
КПО-7	53,5	51,2	40,1	36,1	9	1	8,40	9,00	225,0	71,6
КПО-8	62,7	50,6	40,5	38,0			8,50	10,00	250,0	79,5
КПО-9	62,7	50,9	39,2	37,1			8,45	10,00	250,0	79,5
КПО-10	53,5	51,1	40,8	37,5	2,9	2	5,15	8,40	210,0	66,9
КПО-11	63	52,0	40,0	37,0	3		5,30	10,05	250,0	79,6
КПО-12	63	51,5	41,0	36,5	3		5,35	11,00	275,0	87,6
КПО-13	53,5	51,2	41,0	37,0	3	3	8,00	9,35	234,0	74,5
КПО-14	66	52,5	40,5	36,0			7,80	13,99	350,0	111,5
КПО-15	66	51,5	40,5	37,5			7,90	12,97	325,0	103,2
КПО-16	53,5	51,0	40,7	38,1	6,8	2	12,70	9,90	247,0	78,8
КПО-17	63	51,0	40,0	38,0	6		11,00	11,40	285,0	90,3
КПО-18	66	51,5	40,0	36,0	6		11,00	10,05	250,0	79,6
КПО-19	53,5	50,7	41,0	38,3	6	3	–	9,00	225,0	71,6
КПО-20	63	51,0	40,0	38,0	6	3	16,50	13,91	348,0	110,9
КПО-22	53,5	51,0	40,5	37,0	9	3	16,50	13,67	342,0	108,8
КПО-21	63	51,0	40,0	38,0	6	2	16,80	14,07	352,0	112,0
КПО-23	62,7	51,5	40,5	37,5	9	2	16,80	11,58	290,0	92,2
КПО-24	62,7	51,0	40,0	38,5	9	2	16,80	12,58	315,0	100,0
КПО-25	53,5	51,5	41,0	37,0	9	3	2,55	13,86	347,0	110,2
КПО-26	62,7	51,0	40,0	36,0				13,91	348,0	111,0
КПО-27	66	51,0	41,0	38,5				13,00	326,0	103,5

В серии ВП было изготовлено 32 образца диаметром 120 см. В отличие от образцов серии КПО во время испытания на верхней поверхности образцов имелось еще бетонное кольцо высотой 8 см и шириной 30 см. Таким образом, рабочая высота цилиндров составляла 67 см. Образцы были изготовлены из тяжелых бетонов марок 100 (В7,5), 300 (В22,5), 400 (В30) и 500 (В37,5). Образцы одной марки бетона отличались только величиной предварительного обжатия. Результаты испытаний сравнивали по величине с разрушающей нагрузкой образцов без арматуры.

Преднапряжение бетона в образцах серии ВП создавали гладкой проволокой диаметром 4,0 и 4,5 мм прочностью 1250–1400 МПа, навитой на боковую поверхность в два слоя, не доводя на-

вивку до торцов образца. Предварительное напряжение бетона с учетом потерь составляло 2,2; 5,6; 7,4 и 9,5 МПа. Все образцы этой серии, кроме образцов группы Д, испытывались штампом диаметром 400 мм. Опорное кольцо имело внутренний диаметр 600 мм, образцы группы Д испытывали на сегментных опорах. Во всех образцах группы Д данной серии в бетоне создавалось одинаковое преднапряжение – 5,6 МПа, а переменным являлась прочность бетона в образцах от 10 до 50 МПа (табл. 2, рис. 3).

В бетонных образцах без обоймы наблюдалось пропорциональное увеличение несущей способности лишь при низкой прочности бетона – до 20 МПа. При увеличении прочности бетона образцов происходило отставание несущей способности. При

наличии обоймы прочность трехосно обжатого бетона в цилиндрах возросла в 3,9–5,2 раза по сравнению с необжатыми. Однако в преднапряженных образцах при повышении прочности бетона прирост несущей способности заметно опережал прирост

деформативности и трещиностойкости, что объяснено непропорциональностью роста прочности бетона и роста начального модуля деформаций, а также незначительным изменением сопротивляемости бетона растяжению.

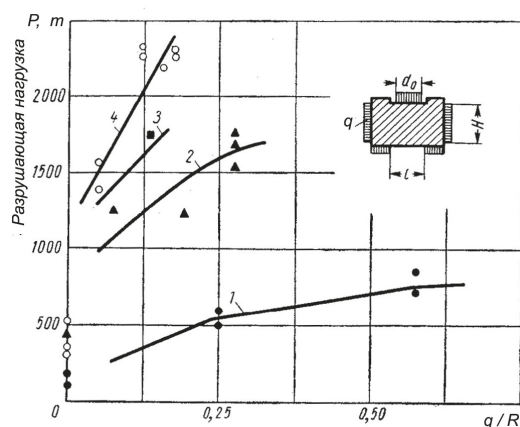


Рис. 3. Разрушающая нагрузка образцов серии ВП [2] от величины предварительного обжатия при бетоне марки: 1 – «100», 2 – «300», 3 – «400», 4 – «500»

Fig. 3. Destructive load of VP series samples [2] on the value of pre-compression in concrete grade: 1 – “100”, 2 – “300”, 3 – “400”, 4 – “500”

Таблица 2

Испытания образцов серии ВП [2]

Table 2

Testing of VP series samples [2]

Шифр образца	Прочность бетона, R , при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см			Диаметр проволоки в обойме, $D_{пр}$, мм	Предварительное напряжение		Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Полная высота образца	Расчетная высота, H		Усилие в про-волоке, кН	Величина обжатия, q , МПа			
А. Влияние прочности бетона										
ВП-16	49	122,5	75,5	68,5	4	7,2	5,6	20	159,5	21,1
ВП-1	46,5	120	75	68	5	9	5,6	22,72	181	29
ВП-2	46,5	120	76	68	5	9	5,6	23,56	187,5	30
ВП-12	40	123	76	70,8	4	7,2	5,7	17,6	140,1	18,5
ВП-13	40	123	81	75	4	7,2	5,5	17,6	140,1	18,5
ВП-5	28,9	120	76	68	5	9	5,6	15,4	123	19,6
ВП-30	10	121,1	76	69,5	4	7,2	5,7	8,61	69	11
ВП-31	10	120	76	69	4	7,2	5,7	7,31	58,3	93,2
ВП-32	10	121,4	75,7	69,7	4	7,2	5,7	7,63	60,7	97,5
Б. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «500»										
ВП-11	56	120	76	69	4	11,8	9,5	22,73	1810	23,9
ВП-10	50	120,8	76,3	68,8	4	9	7,6	20*	–	–
ВП-3	42,5	120	77	73	4,5	9	7,4	23	1830	29,4
ВП-14	42,5	122	76	70,5	4	3	2,2	15,72	1250	20
ВП-15	42,5	120,5	77,5	71,2	4	3	2,2	14	1115	18
ВП-23	46,5	120	75	68	–	–	–	5,2	414	6,6
ВП-24	46,5	120	76	68	–	–	–	3,12	249	4
ВП-25	51	120	75	68	–	–	–	4,38	350	5,6

Продолжение таблицы 2

Шифр образца	Прочность бетона, R , при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см			Диаметр проволоки в обойме, $D_{пр}$, мм	Предварительное напряжение		Разрушающая нагрузка, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление на кольцо при разрушении, МПа
		Диаметр, D	Полная высота образца	Расчетная высота, H		Усилие в про-волоке, кН	Величина обжатия, q , МПа			
В. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «300»										
ВП-4	28,9	120	75	68	4,5	9	7,4	17,74	1412	22,6
ВП-6	29	120	76	70	4,5	9	7,4	16,93	1350	21,5
ВП-7	29	120	77	70	4,5	9	7,4	15,4	1230	19,6
ВП-17	29,5	120	77	70,5	4	3	2,2	12,5	996	16
ВП-18	34	123	77	71	4	3	2,2	16	1275	20,4
ВП-26	28,9	120	75	69,5	—	—	—	4,5	358	5,7
ВП-27	29,5	120	75	67,5	—	—	—	3,5	279	4,5
Г. Влияние предварительного напряжения для бетона марки «100»										
ВП-21	8,75	120,3	75,4	68,9	4	3	2,2	5,97	476	7,6
ВП-22	8,75	118,4	76	68,9	4	3	2,2	5	398	6,4
ВП-28	8,7	120	77	65	—	—	—	1,069	85	1,4
ВП-29	10	121,5	77	—	—	—	—	1,7	135	2,17
Д. Влияние способа опирания										
ВП-10	50	120,8	76,3	68,8	4	9	7,6	20	1395	36,3
ВП-19	40	121	76	70	4	11,8	9,4	18	1431	32,8
ВП-20	36	111,5	75,8	69,6	4	11,8	9,3	16	1274	29,1
ВП-8	10	121,7	77,3	68	—	—	—	1,9	151	2,42
ВП-9	10	121,5	77	68	—	—	—	1,58	126	2
* — образец не доведен до разрушения										

Влияние величины предварительного обжатия q повышается с ростом кубиковой прочности бетона R . Но с увеличением прочности бетона отношение предельного давления под штампом к призменной прочности бетона уменьшается. Заметное снижение деформативности от интенсивности обжатия наблюдается на более поздних стадиях нагружения. Увеличение степени бокового обжатия бетона более всего повышает трещиностойкость в тангенциальном направлении, что наблюдается даже при небольших величинах бокового обжатия — до $0,25R$.

В образцах, в которых боковое давление составляет $0,3–0,5R$, радиальные трещины появляются при нагрузках, близких к разрушающим. Сопротивление бетона срезу повышалось с ростом осевого сжатия до величины, равной $0,5$ фактической прочности бетона.

При предварительном обжатии бетона напряжением q менее $0,2$ прочности бетона разрушающая нагрузка повышается в линейной зависимости от величины обжатия. Если выше этого, то эффективность обжатия начинает снижаться. Установлена эффективность величины обжатия до $0,27$ от прочности бетона.

Для бетона прочностью 10 МПа эффективным является обжатие до значения $0,2R$, при этом разрушающая нагрузка повышалась пропорционально величине обжатия. Для бетона прочностью R выше 10 МПа разрушающая нагрузка $P_{разр}$ увеличивается при повышении q до $0,15R$. Для бетонов более высокой прочности коэффициент пропорциональности снижается, поэтому величина обжатия сверх указанных пределов может считаться нецелесообразной.

По результатам испытания этих серий получено, что независимо от диаметра цилиндров критическими величинами обжатия бетона прочностью выше $40–50$ МПа является q , равная $0,1–0,2$ от прочности бетона. Для бетонов меньшей прочности допустимо принимать q , равной $0,2–0,3$ от прочности бетона.

Влияние высоты образца, диаметра штампа и опорного кольца

При исследовании влияния отношения высоты к диаметру цилиндра и отношения диаметра штампа к рабочему пролету испытания проводили на образцах диаметром 50 см, высотой $10, 20, 30$ и 40 см. Образцы изготавливали из бетона фактической проч-

ностью 49,5–70,9 МПа с навивкой высокопрочной проволоки диаметром 4 мм фактической прочностью от 1740 до 2070 МПа. Натяжение арматуры проводили машиной ДН-5. В проволоке создавалось напряжение 600–630 МПа, при этом в бетоне возникало напряжение 6 МПа (с учетом потерь). Процент армирования составлял 2,5 %. Испытание образцов производили на жестком металлическом кольце с внутренним диаметром 300 мм, принятым за рабочий пролет при нагружении. Отношения высоты образцов к пролету изменялось и составляло 0,33; 0,67; 1,00 и 1,33. Образцы одинаковой высоты испытывали тремя видами жестких штампов, имеющих диаметр 100, 225 и 317 мм, с отношением диаметра штампа к пролету 0,37; 0,75 и 1,05 соответственно. Усилие пресса распределялось по всей поверхности штампа, что исключало изгибающий момент. Несколько образцов высотой 100 мм испытывали штампами диаметром 225 и 317 мм с опиранием их на кольцо с внутренним диаметром 200 мм, моделируя практические случаи, в которых диаметр штампа больше рабочего пролета. Для каждого типа плит испытаны контрольные образцы с исключением трения покрытием парафином опорной поверхности кольца и плоскости штампа.

Все образцы разрушались по бетону. Внешними признаками потери несущей способности явились кольцевые и радиальные трещины на опорной и нагружаемой поверхностях, раздробление бетона вокруг штампа и смятие его под штампом, перемещение средней части относительно наружного кольцевого слоя. Величина разрушающей нагрузки

$P_{\text{разр}}$ увеличивалась примерно пропорционально изменению высоты образца, и коэффициент пропорциональности зависел от диаметра штампа. При увеличении отношения штампа к рабочему пролету несущая способность образца также увеличивалась. Так, трехкратное увеличение отношения диаметра штампа к пролету привело к повышению $P_{\text{разр}}$ в образцах высотой 100 мм в 5 раз, а для образцов высотой 200 и 400 мм – в 2 раза.

Цилиндры, нагруженные штампом диаметром больше внутреннего диаметра опорного кольца, разрушались в результате раздавливания бетона при сжатии. В этом случае $P_{\text{разр}}$ возросла примерно в 3 раза по сравнению со случаем, когда диаметр штампа и рабочий пролет были равны между собой.

При устранении сил трения на опорной поверхности образцы в большинстве случаев разрушались при несколько меньшей нагрузке (табл. 3, рис. 4).

Характер деформирования образцов в обойме при нагружении

С ранних этапов нагружения на верхней поверхности образца, по свидетельству расчетных данных, образуются горизонтальные сжимающие напряжения, а на нижней поверхности – растягивающие напряжения, что характерно для изгибающего элемента. По данным испытаний и расчетов деформации под штампом, уже на ранних этапах нагружения носят неупругий характер. Однако местное смятие до определенного момента не влияло на общую упругую деформацию массивного цилиндра.

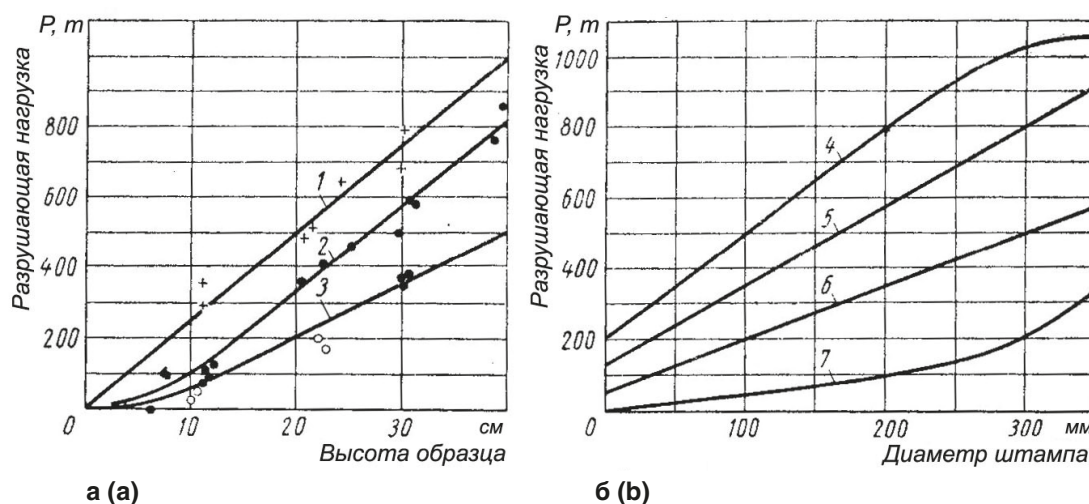


Рис. 4. Разрушающая нагрузка образцов серии КРБ [2] в зависимости от: а – высоты образца; б – диаметра штампа.

1 – $d = 317$ мм, $d/l = 1,05$; 2 – $d = 225$ мм, $d/l = 0,75$; 3 – $d = 110$ мм, $d/l = 0,37$;
4 – $H = 40$ см; 5 – $H = 30$ см; 6 – $H = 20$ см; 7 – $H = 10$ см

Fig. 4. Destructive load of samples of the KRB series [2] depending on: a – the height of the sample; b – the diameter of the stamp.

1 – $d = 317$ мм, $d/l = 1,05$; 2 – $d = 225$ мм, $d/l = 0,75$; 3 – $d = 110$ мм, $d/l = 0,37$;
4 – $H = 40$ см; 5 – $H = 30$ см; 6 – $H = 20$ см; 7 – $H = 10$ см

Таблица 3

Испытания образцов серии КПБ [2]

Table 3

Testing of samples of the KPB series [2]

Пролет, l , см	Шифр образца	Прочность бетона при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см		Условия на опоре	Размеры штампа			Разрушающая нагрузка, $R_{разр}$, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление в кольце при разрушении, МПа
			Диаметр, D	Высота, H		Диаметр, d_0 , мм	Площадь, $см^2$	Высота, h_0 , мм			
30	КПБ-1	53,0	52,0	39,8	Кольцо	225	400	52	7,95	197,5	63,4
	КПБ-2		52,0	42,0		225	400	52	9,40	235,0	74,8
	КПБ-3		52,0	39,8	Кольцо с парафином	225	400	52	6,75	169,0	53,8
	КПБ-4		52,5	40,8		225	400	52	6,75	169,0	53,8
	КПБ-5		51,3	40,0	Кольцо	110	95	78	5,06	534,0	40,4
	КПБ-6		51,5	40,0		110	95	78	4,20	443,0	33,5
	КПБ-7		52,5	40,9	Кольцо с парафином	110	95	78	4,50	475,0	35,9
	КПБ-8		52,3	41,1		110	95	78	4,48	473,0	35,7
	КПБ-9	49,5	51,2	29,8	Кольцо	225	400	52	5,00	125,0	39,8
	КПБ-10		51,0	31,0		225	400	52	5,69	147,0	46,9
	КПБ-11		51,0	31,0	Кольцо с парафином	225	400	52	5,90	147,0	47,0
	КПБ-12		51,0	30,0	Кольцо	317	792	55	7,75	98,0	61,6
	КПБ-13		52,5	30,0		317	792	55	6,82	86,2	54,3
	КПБ-14		52,5	30,5		110	95	78	3,80	400,0	30,3
	КПБ-15		52,5	30,0		110	95	78	3,70	390,0	29,5
	КПБ-16		52,5	31,0		110	95	78	3,69	389,0	29,4
	КПБ-17	51,8	51,0	20,5	Кольцо	225	400	55	3,57	89,3	28,4
	КПБ-18		52,0	22,0		225	400	55	4,12	106,0	32,8
	КПБ-19		52,0	21,6	Кольцо с парафином	225	400	55	3,21	80,3	25,6
	КПБ-20		52,0	22,4	Кольцо	110	95	78	1,75	184,3	13,9
	КПБ-21		52,0	22,0		110	95	78	1,96	206,0	15,3
	КПБ-22		52,0	21,5		317	792	55	5,20	65,7	41,4
	КПБ-23		50,0	22,8		317	792	55	6,32	79,8	50,4
	КПБ-24		50,0	20,6	Кольцо с парафином	317	792	55	4,75	60,0	37,8
	КПБ-25	70,9	52,0	11,5	Кольцо	225	400	55	1,19	29,8	9,5
	КПБ-26		51,2	11,0		225	400	55	0,90	22,5	7,2
	КПБ-27		52,0	11,0	Кольцо с парафином	225	400	55	1,05	26,3	8,4
	КПБ-28		52,0	10,8	Кольцо	110	95	78	0,53	55,8	4,2
	КПБ-29		52,0	10,5		110	95	78	0,50	52,7	4,0
	КПБ-30		51,3	10,0		110	95	78	0,36	37,4	2,8
	КПБ-31		52,0	11,0		317	792	55	3,49	44,2	27,8
	КПБ-32		52,0	11,5		317	792	55	2,88	36,4	22,9

Продолжение таблицы 3

Пролет, l , см	Шифр образца	Прочность бетона при намотке и испытании, МПа	Основные размеры, см		Условия на опоре	Размеры штампа			Разрушающая нагрузка, $P_{разр}$, МН	Удельное давление под штампом при разрушении, МПа	Удельное давление в кольце при разрушении, МПа
			Диаметр, D	Высота, H		Диаметр, d_0 , мм	Площадь, $см^2$	Высота, h_0 , мм			
20	КПБ-33	54,0	50,0	10,5	Кольцо	225	400	55	3,00	75,0	18,2
	КПБ-34		51,0	10,0		225	400	55	2,80	70,0	17,0
	КПБ-35		51,5	11,5	Кольцо с парафином	225	400	55	2,35	58,8	14,3
	КПБ-36		51,0	11,2		225	400	55	2,10	52,5	12,7
	КПБ-37		51,0	11,0	Кольцо	317	792	55	9,00	113,8	54,5
	КПБ-38		51,0	9,8		317	792	55	7,84	99,0	47,5
	КПБ-39	60,0	51,0	10,4	Кольцо с парафином	317	792	55	5,32	67,3	32,2
	КПБ-40		51,5	11,2	Кольцо	110	95	78	0,70	73,7	4,3
	КПБ-41		51,5	11,5	Кольцо	110	95	78	0,75	79,0	4,6
	КПБ-42		51,5	11,0	Кольцо с парафином	110	95	78	0,60	63,1	3,6

При нагрузке, равной $0,14P_{разр}$ в образцах с прочностью бетона 10 МПа на нижней поверхности образца под штампом образовалась первая радиальная трещина. По средним значениям экспериментальных данных четырех образцов с бетоном прочностью 50–53 МПа такая же трещина образовалась при нагрузке $0,4P_{разр}$, что соответствовало границе упругой стадии. Тогда же за счет смятия бетона на верхней поверхности образца вокруг штампа появилась кольцевая трещина.

Далее местные деформации под штампом продолжали резко распространяться на глубину примерно одной трети высоты образца. Однако поперечное обжатие бетона существенно препятствовало развитию среза сердечника.

До границы упругой работы деформации бетона развиваются линейно. Сверх этого начинается небольшая потеря линейности деформаций в бетоне, появляются пластические деформации и первые микротрещины. Границей упругопластической стадии принята точка перехода к развитию значительных деформаций, ведущих к разрушению образца.

При переходе в упругопластическую стадию волосные трещины в нижней части образца начали постепенно множиться, особенно в зоне, близкой к оси образца. Внутри опорного кольца после появления радиальных трещин начинали развиваться кольцевые трещины. Но до границы упругопластической зоны они не оказывали практического влияния

на упругую работу образца в целом. В нижних рядах проволоки к моменту достижения упругопластической границы отмечено увеличение деформаций в 5–6 раз. При этом проволока продолжала работать по диаграмме, близкой к линейной, поскольку в ней отсутствовала площадка текучести.

В процессе нагружения в бетоне и обойме верхней части цилиндра развивалось два противоположных вида деформаций и напряжений: сжатие от изгибающего момента и растяжение от расклинивающего действия бетона под штампом. До тех пор пока в бетоне под штампом не развились значительные неупругие деформации, горизонтальные растягивающее усилие были невелики. В этот период преобладают условия сжатия от изгиба. При высоком уровне напряжения под штампом (более $4R_{bn}$) горизонтальные усилия растяжения превысили суммарные усилия от преднапряжения и изгиба. Это содействовало началу выдавливания сердцевин в верхней зоне и дополнительному растяжению обоймы.

Одновременно при дальнейшей нагрузке характер напряженно-деформированного состояния образца с трещинами менялся. Если до нагрузки $0,6P_{разр}$ радиальные трещины распространялись снизу на небольшую высоту цилиндра, то по мере увеличения нагрузки они быстро распространились по высоте и на последних этапах доходили до нагружаемой поверхности. По всей высоте цилиндра происходило увеличение объема образца.



Рис. 5. Трещины в образце при нагрузках $0,75P_{разр}$
Fig. 5. Cracks in the sample at loads of $0.75P_{destr}$



Рис. 6. Выдавленная сердцевина при разрушении образца
Fig. 6. The core extruded during the sample destruction

При нагрузках, составляющих $0,75P_{разр}$, деформации цилиндра имели выраженный неупругий характер. На границе упругопластической зоны возникли косые трещины, идущие от сердечника к внутреннему диаметру опорного кольца (рис. 5). Сверх границы упругопластической зоны деформации обоймы начали резко возрастать. На нижнем основании цилиндра в пролете появились множественные радиальные и кольцевые трещины, что с увеличением ширины их раскрытия привело образец к разрушению. Полное разрушение образцов сопровождалось выдавливанием сердцевин вниз. При обследовании этих сердцевин установлено, что верхняя треть имеет цилиндрическую форму диаметром, равным диаметру штампа, и поверхность бетона соответствует разрушению при срезе. Нижняя часть приоб-

рела конусообразный вид и имеет поверхность, соответствующую разрыву бетона (рис. 6).

Исследование работы образцов в обойме расчетным путем

Для оценки процессов, происходящих внутри тела образцов (деформаций, напряжений, раскрытия трещин), использован программный комплекс ATENA, реализующий метод твердотельного моделирования с триангуляцией на конечные элементы. В программном комплексе используются законы нелинейного деформирования и прочности материала – закон развития трещин и работы материала с трещинами Уильяма Ранкина и поверхности разрушения (критерий прочности) Менетрея – Виллама (Menetrey – Willam) [3].

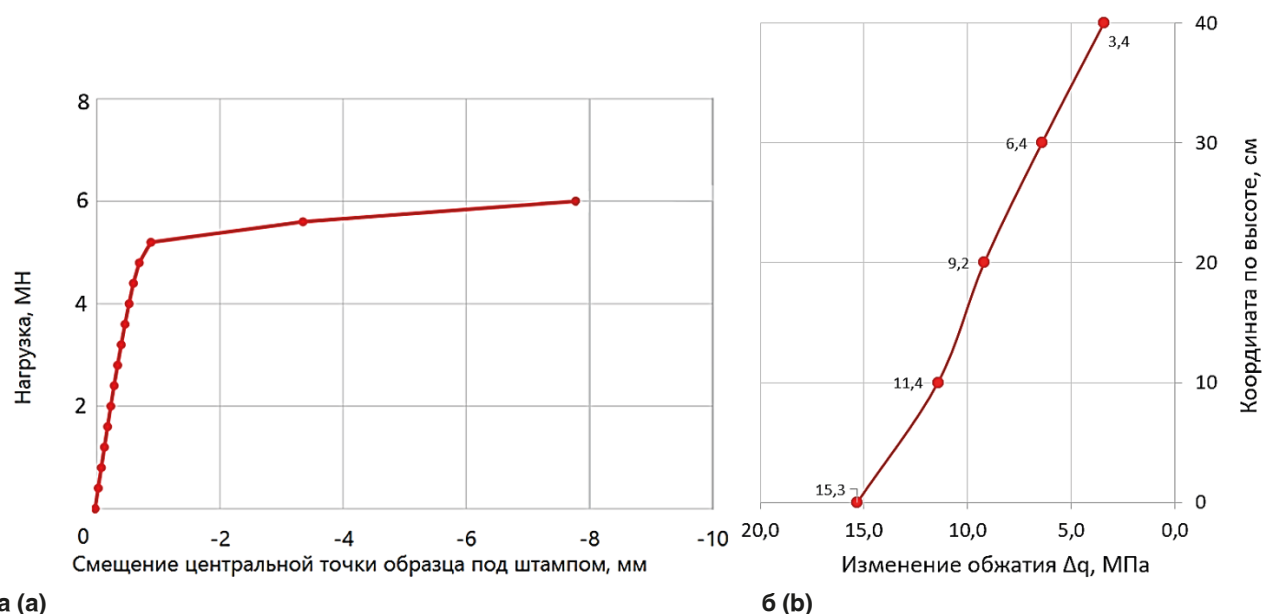


Рис. 7. Графики расчетных испытаний образца диаметром 50 см, высотой 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре: а – перемещение точки образца под центром штампа; б – изменение обжатия бетона напрягаемой проволокой по высоте образца
Fig. 7. Graphs of design tests of a sample with a diameter of 50 cm, a height of 40 cm and a span of 30 cm without taking into account friction on the support: а – movement of the sample point under the center of the stamp; б – change in compression of concrete by a tensioned wire along the height of the sample

Таблица 4
Сопоставление экспериментальных и расчетных границ характера работы конструкций
Table 4
Comparison of experimental and calculated limits of the nature of the work of structures

Наименование	Характеристики	Нагрузка, кН				
		$P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр.э}} \approx 0,4P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр.расч}}$	$P_{\text{упр-пл.э}} \approx 0,6P_{\text{разр.э}}$	$P_{\text{упр-пл.расч}}$
КПБ-1,2	$D = 50$ см, $H = 40$ см, с трением	8700	3480	3900 (+12 %)	5220	6400 (+22 %)
КПБ-3,4	$D = 50$ см, $H = 40$ см, без трения	6750	2700	3200 (+19 %)	4050	5000 (+23 %)
ВП-10	$D = 120$ см, $H = 70$ см, без трения	20 000	8000	9500 (+19 %)	12 000	14 500 (+21 %)

Моделирование выполнено на $\frac{1}{4}$ части образца с учетом его симметрии. Рассмотрено 5 образцов с геометрическими параметрами и характеристиками используемых материалов, аналогичными исследованным при натурных испытаниях. Использовано два типоразмера образцов: диаметром 50 см, высотой 40 см, диаметром штампа 22,5 см и пролетом 30 см (и один образец с опиранием на сплошную пластину без пролета) с учетом и без учета трения на опоре при обжатии 6 МПа; диаметром 120 см, высотой 70 см, диаметром штампа 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре при обжатии 7,6 и 15,2 МПа. Кубиковая прочность бетона в расчетной модели принята 50 МПа.

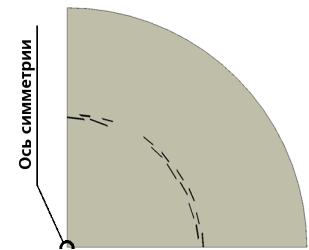
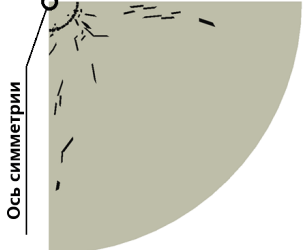
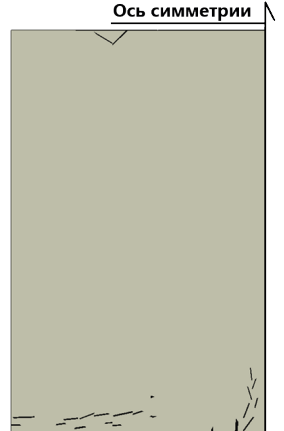
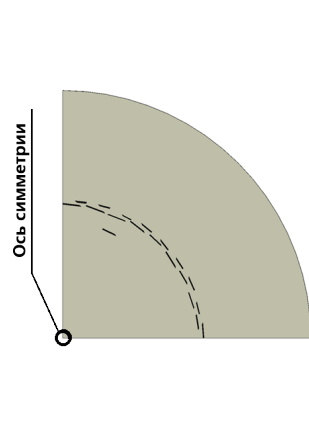
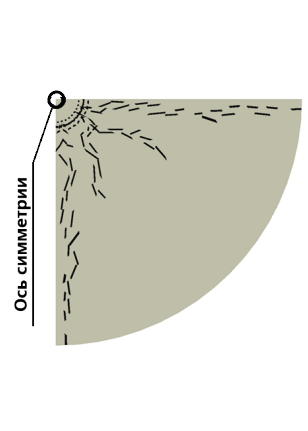
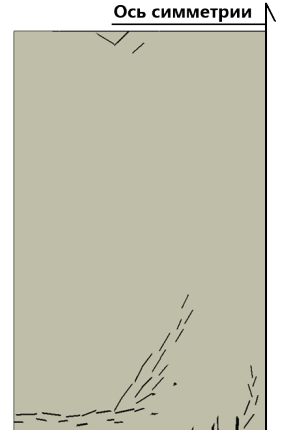
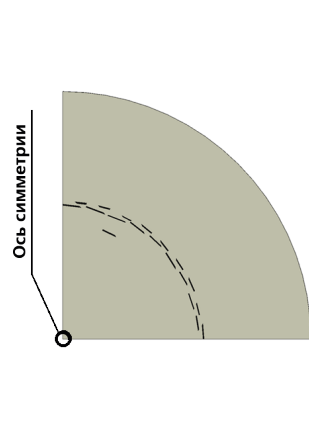
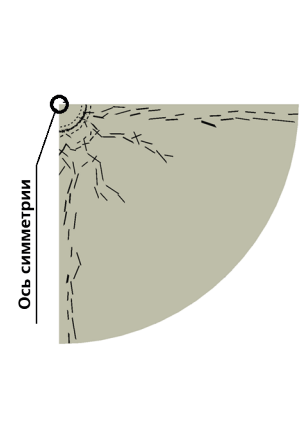
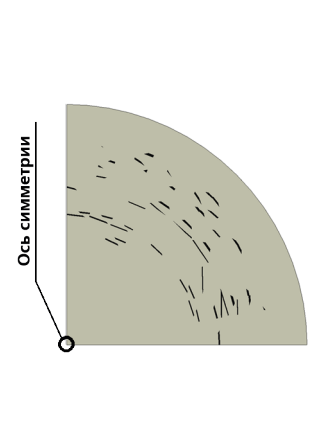
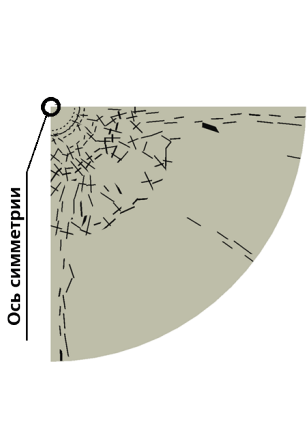
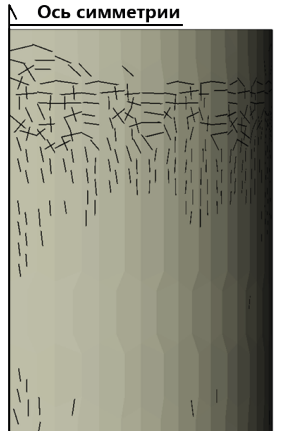
Для анализа деформаций в конструкции при этапном нагружении выбрана центральная точка образца на верхней его поверхности – под штампом (рис. 7а). На графиках хорошо видна граница упругой работы материала, составляющая около $0,70-0,75P_{\text{разр.э}}$. Также установлена картина изменения обжатия бетона напрягаемой арматурой по высоте образца (рис.7б). Аналогичные результаты были получены в работе [4]. Программный комплекс позволяет получить не только оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, но и картину развития и ширину трещин внутри бетона. Из анализа НДС конструкции и характера развития трещин можно определить границу упругой и упругопластической работы материала (табл. 4).

Таблица 5

Этапы развития трещин по результатам расчетов

Table 5

Stages of cracks development based on calculation results

Нагрузка, кН	Иллюстрации			
	Радиальный разрез	Вид сверху	Вид снизу	Наружная поверхность
2800				
3200				
4000				
5200				

В ходе нагружения образца диаметром 50 см, высотой 40 см, с пролетом 30 см без учета трения на опоре можно выделить следующие этапы, характеризующиеся возникновением трещин (табл. 5):

$P = 2800$ кН – возникновение радиальных трещин на нижней поверхности образца и кольцевых трещин у краев штампа по верхней поверхности образца;

$P = 3200$ кН – проявление радиальных трещин на наружной поверхности образца снизу; **расчетная граница упругой зоны;**

$P = 4000$ кН – возникновение конусообразной трещины внизу образца;

$P = 5200$ кН – нарастание нелинейных деформаций; появление радиальных трещин на наружной поверхности в верхней и средней частях образца, а также радиальные трещины за пределами действия штампа; **расчетная граница упругопластической зоны.**

По иллюстрациям табл. 5 видно, что первыми трещинами в образцах являются радиальные на опорной поверхности образца и тангенциальные по контуру штампа при нагрузке около $0,4P_{разр,э}$ (рис. 8а). С ростом нагрузки при $0,6P_{разр,э}$ возникает почти вертикальная трещина, создающая в пролете образца усеченный конус (рис. 8б). Волосная трещина быстро развивается и приостанавливает свой рост примерно на середине образца по высоте. Ширина раскрытия трещин при этом незначительна – менее 0,1 мм.

После зоны упругопластической работы образца при нагрузке порядка $0,7-0,75P_{разр,э}$ раскрытие трещин начинает стремительно увеличиваться. При этом возникают радиальные и тангенциальные трещины в верхней части образца за пределами штампа, отсекающие верхнюю кромку образца. Радиальные трещины снизу и сверху образца соединяются, образуя сплошные радиальные трещины по всей

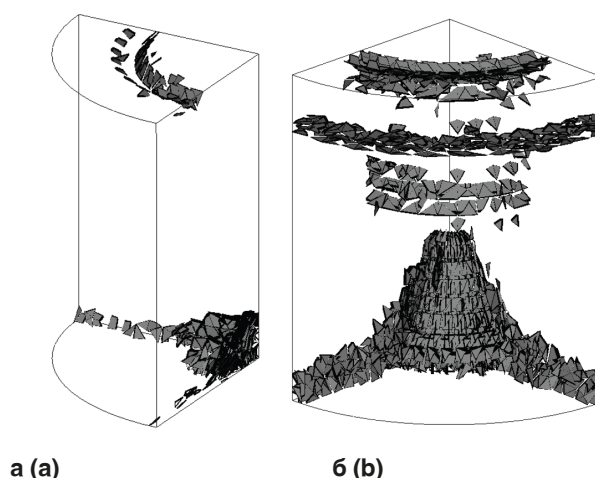


Рис. 8. Образование трещин в расчетной модели в толще образца при нагрузке: а – $0,4P_{разр,э}$; б – $0,6P_{разр,э}$
Fig. 8. Crack formation in the calculated model in the sample thickness under load: а – $0,4P_{разр,э}$; б – $0,6P_{разр,э}$

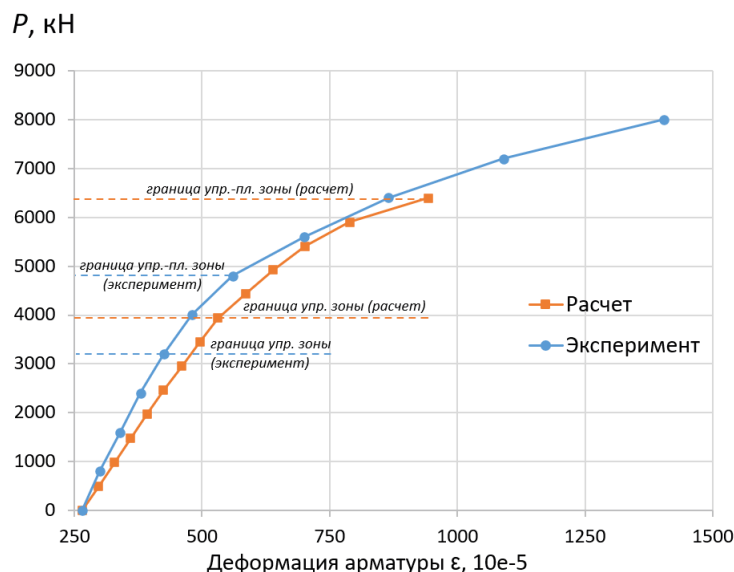


Рис. 9. Графики деформаций проволоки у опорной поверхности образца по результатам эксперимента и расчета
Fig. 9. Graphs of wire deformations at the sample support surface based on experimental and calculated results

высоте, ширина раскрытия которых снизу достигает 0,4 мм, на порядок превышая ширину раскрытия трещины вверху образца.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных деформации проволоки вблизи опоры для образца диаметром 50 см, высотой 40 см и пролетом 30 см без учета трения на опоре приведено на рис. 9. Графики деформации арматуры сопоставимы и имеют хорошую корреляцию вплоть до границы упругопластической зоны расчетной модели. Следует отметить, что в эксперименте относительная деформация арматуры при разрушающей нагрузке ($P_{\text{разр},э} = 8000 \text{ кН}$) составляет $\approx 1400 \times 10^{-5}$, что намного больше нормируемой предельной деформации 850×10^{-5} использованной проволоки прочностью 1700 МПа. При расчетном моделировании предельная деформация проволоки достигается на верхней границе упругопластической зоны работы.

Сопоставительные графики деформаций напрягающей проволоки у опорной поверхности образцов диаметром 120 см при изменении числа слоев обоймы (увеличения величины обжатия с 7,6 до 15,2 МПа) приведены на рис. 10. Границы упругой и упругопластической зон работы образца не увеличились кратно увеличению величины обжатия, при этом характер и моменты возникновения трещин в образцах совпадают.

Выполнено также расчетное исследование влияния величины обжатия на величину нагрузки на границе упругопластической зоны. На рис. 11 представлен график изменения нагрузки на границе упругопластической зоны в зависимости от величины обжатия (в долях от кубиковой прочности бетона образ-

ца диаметром 50 см). Получена высокая сходимость результатов при малых значениях величины обжатия (менее $0,2q/R$), однако при повышении величины обжатия графики постепенно расходятся.

По средним значениям экспериментальных данных пяти образцов серии КПО граница упругой стадии соответствовала 0,4 от разрушающей нагрузки, а граница упругопластической деформации – 0,6 от разрушающей нагрузки, соответственно 320 и 480 т. Значения экспериментальных и расчетных усилий на этих границах были близки между собой (рис. 9).

Выносливость образцов в обойме при многократном повторном нагружении

Для испытания на выносливость [2] были использованы образцы диаметром 50,5 см. Обжатие бетона с учетом потерь составило 6 МПа. При испытании цилиндры устанавливали на опорное кольцо с внутренним диаметром 300 мм, металлическая плита, лежащая на бетоне, имела диаметр 225 мм и толщину 35 мм. Деформации в бетоне измеряли тензодатчиками на опорной поверхности образца и на обжимающей арматуре в трех уровнях по высоте. Перед началом пульсации образец нагружали статической нагрузкой усилием, равным заданному верхнему пределу многократно повторяющейся нагрузки. При этом деформации бетона и арматуры измеряли при статическом нагружении через каждые 200–250 тыс. циклов. Верхние пределы пульсации принимали равными 0,9; 0,8 и 0,7 от статической разрушающей нагрузки. Нижние пределы устанавливали в зависимости от технической возможности пульсатора, они

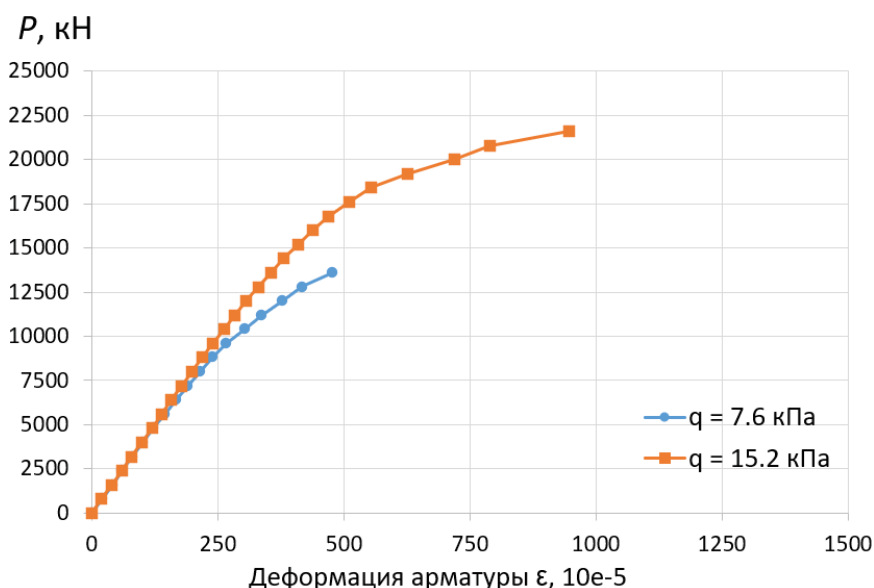


Рис. 10. Графики деформаций проволоки у опорной поверхности образцов диаметром 120 см с различной степенью обжатия q
 Fig. 10. Graphs of wire deformations at the support surface of samples with diameters of 120 cm with varying degrees of compression q

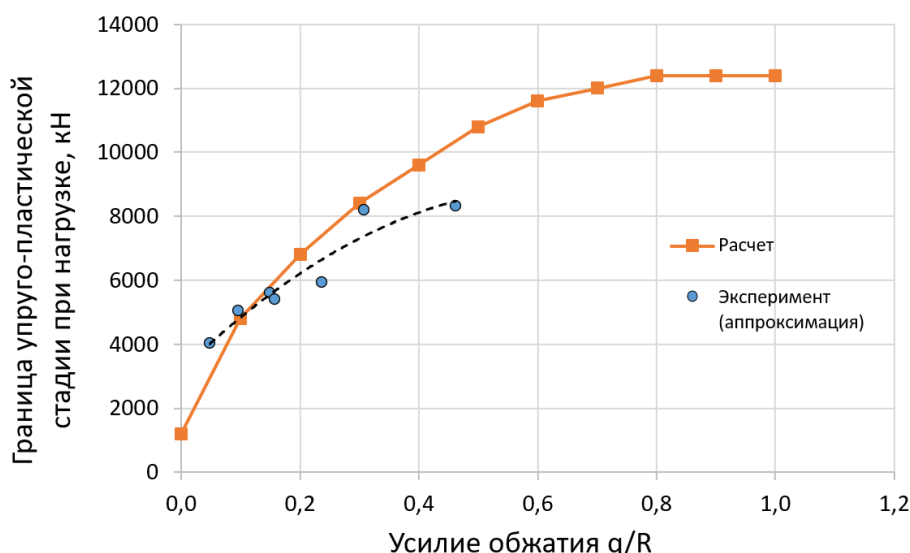


Рис. 11. График зависимости величины нагрузки, соответствующей границе упругопластической стадии, от усилия обжатия в долях от прочности бетона образца

Fig. 11. Graph of the dependence of the load value corresponding to the boundary of the elastoplastic stage on the compression force in fractions of the strength of the concrete sample

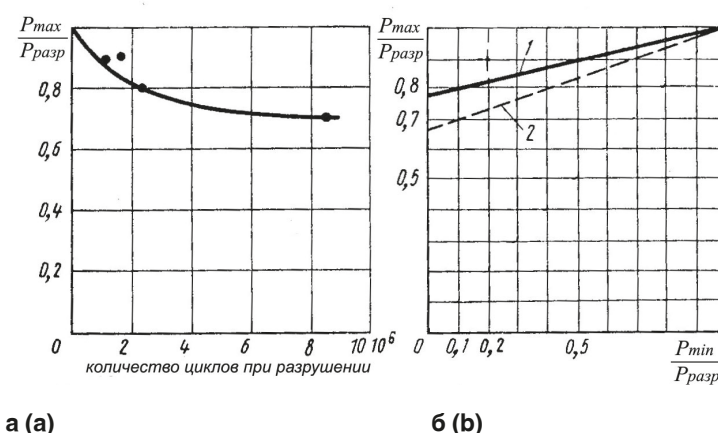


Рис. 12. Результаты испытания образцов при многократно повторяемом нагружении: а – зависимость предела выносливости плит от количества циклов при разрушении; б – пределы выносливости: 1 – круглой предварительно напряженной в двух направлениях плиты; 2 – бетонной призмы при одноосном сжатии

Fig. 12. Results of testing of samples under repeated loading: а – dependence of the endurance limit of plates on the number of cycles during fracture; б – endurance limits: 1 – round plate prestressed in two directions; 2 – concrete prism under uniaxial compression

составляли $0,1-0,2P_{\text{разр}}$. Коэффициенты асимметрии цикла соответственно составляли 0,222; 0,125 и 0,140 (серия КПМ). Задавая параметры испытания, учитывали данные испытаний, полученные Т.С. Каранфиловым (НИИЖБ) и Н.С. Карпухиным (МИИТ) [5–9], о том, что коэффициент асимметрии, равный 0,10–0,25, незначительно влияет на выносливость бетона, а главным является уровень верхней границы цикла пульсации в зависимости от разрушающей нагрузки при статическом нагружении.

На рис. 12 показаны результаты испытания образцов при коэффициенте асимметрии 0,125–0,222 в зависимости от уровня верхнего предела пульсации.

В пределах изменения его значения от 1,0 до 0,7 даже при незначительном уменьшении нагрузки резко возрастает возможность увеличения количества циклов. При отношении верхнего уровня пульсации к статической разрушающей, равном 0,7, кривая переходит в линию, почти параллельную оси абсцисс. При указанном коэффициенте асимметрии усталостные явления практически не проявлялись и при 8,5 млн циклов.

Из сопоставления с аналогичными испытаниями на призмах, проведенными без предварительного напряжения О.Я. Бергом [10, 11], двухосное предварительное напряжение бетона повышало предел выносливости примерно на 15 %. Разрушение образцов

наступало при появлении усталостных явлений в бетоне. Форма разрушения образцов была везде одинакова и мало зависела от изменения параметров. В проволоке на боковой поверхности образца возникало дополнительное напряжение, величина которого вблизи опорной поверхности составляла 0,5–1,0 от начальной величины обжатия. Эти испытания явились еще одним подтверждением упругой работы цилиндров в целом при наличии местных неупругих деформаций и трещин. Испытание на многократно повторную нагрузку при $\rho = (0,122–0,22)$ и отношении $P_{\max}/P_{\text{разр}} = 0,7$ показало, что деформации оставались упругими на всем протяжении испытания до 9,5 млн циклов при соотношениях $H/L > 0,4$ и $d_0/L > 0,4$ и предельной величине трещинообразования $0,6P_{\text{разр}}$, где L – рабочий пролет, d_0 – диаметр штампа.

Выводы

1. Использование в объемных железобетонных конструкциях (например, ригелей станин прессов) толстых цилиндрических плит, предварительно напряженных с боковой поверхности спирально натянутой проволокой, при вертикальной нагрузке позволяет многократно повысить прочность элементов по сравнению с плитами без преднапряжения.

2. По экспериментальным исследованиям на несущую способность круглых толстых плит в основном влияют высота плиты, прочность бетона, величина предварительного обжатия. Несущая способность плит находится в линейной зависимости от этих факторов.

3. Боковое обжатие плит интенсивностью более 0,2–0,3 от прочности бетона применять не рекомендуется.

4. Наибольшая прочность конструкции достигается при использовании соотношения диаметра плиты к диаметру штампа не более 2.

5. По результатам экспериментальных и расчетных исследований на диаграмме деформаций плиты с преднапряжением отмечены две границы, имеющие практическое значение. Первая – на уровне 0,4 от разрушающей нагрузки – граница упругой зоны работы бетона, когда деформации развиваются линейно, а в бетоне отсутствуют трещины. Вторая – на уровне 0,6 от разрушающей нагрузки – граница упругопластической зоны, когда в плите появляются волосные трещины, но они не отражаются на работе конструкции в целом. В эксплуатируемых конструкциях более высокие напряжения не допустимы.

6. По результатам выполненных экспериментальных исследований круглые толстые плиты в обойме обладают повышенной выносливостью. Однако этот вывод требует подтверждения в более обширных исследованиях конструкций на многократно повторяющуюся нагрузку.

7. Полученные результаты исследований и разработанная методика расчета железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях трехосного напряженного состояния, открывают возможность для эффективного использования преднапряженного железобетона в машиностроении и ряде других отраслей.

Список литературы

1. ГОСТ 7348-55. Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия. Москва: Госстандарт СССР, 1955.
2. Браиловский М.И., Астрова Т.И. Экспериментальное исследование элементов железобетонных станин цилиндрической формы для кузнечно-прессовых машин и другого оборудования. В: Применение железобетона в машиностроении. Москва: Издательство Машиностроение, 1964.
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
4. Людковский И.Г. Основы расчета и конструирования опытных железобетонных конструкций (несущие элементы машин, высоконапорные сосуды) [диссертация]. Москва, 1968.
5. Каранфилов Т.С. Выносливость и деформативность при воздействии многократно повторной нагрузки. В: Труды Гидропроекта. № 13. Москва: Энергия, 1966.
6. Каранфилов Т.С., Волков Ю.С. Работа железобетонных конструкций на многократно повторную нагрузку. В: Применение железобетона в машиностроении. Москва: Издательство Машиностроение, 1964.
7. Каранфилов Т.С. Волков Ю.С. Расчет сопротивления бетона на выносливость. ЦИНИС, реферативный сборник. 1970. № 1.
8. Карпухин Н.С. Исследование выносливости железобетонных балок при воздействии многократно приложенной нагрузки // Труды МИИТ. Вып. 152. Москва: Трансжелдориздат, 1962.
9. Карпухин Н.С. Исследование выносливости бетона под воздействием многократно приложенной растягивающей нагрузки // Труды МИИТ. Вып. 153. Москва: Трансжелдориздат, 1963.
10. Берг О.Я. О выносливости железобетонных конструкций // Труды ЦНИИС. Вып. 36. Москва: Трансжелдориздат, 1960.
11. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Москва: Госстройиздат, 1962. 96 с.

References

1. State Standard 7348-55. Carbon steel wire for reinforcement of prestressed concrete constructions. Specifications. Moscow: Gosstandart of the USSR, 1955. (In Russian).

2. Brailovsky M.I., Astrova T.I. Experimental study of elements of reinforced concrete cylindrical frames for forging and pressing machines and other equipment. In: Application of reinforced concrete in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. (In Russian).
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague, 2021.
4. Lyudkovsky I.G. Fundamentals of calculation and design of experimental reinforced concrete structures (load-bearing elements of machines, high-pressure vessels) [dissertation]. Moscow, 1968. (In Russian).
5. Karanfilov T.S. Endurance and deformability under the influence of repeated load. In: Proceedings of Hydroproject. No. 13. Moscow: Energy Publ., 1966. (In Russian).
6. Karanfilov T.S., Volkov Yu.S. Performance of reinforced concrete structures under repeated load. In: Application of reinforced concrete in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. (In Russian).
7. Karanfilov T.S., Volkov Yu.S. Calculation of concrete resistance for endurance. TsINIS, abstract collection. 1970, no. 1. (In Russian).
8. Karpushin N.S. Study of endurance of reinforced concrete beams under the influence of repeatedly applied load. *Proceedings of MIIT*. Issue 152. Moscow: Transzheldorizdat, 1962. (In Russian).
9. Karpushin N.S. Study of endurance of concrete under the influence of repeatedly applied tensile load. *Proceedings of MIIT*. Issue 153. Moscow: Transzheldorizdat, 1963. (In Russian).
10. Berg O.Ya. On the endurance of reinforced concrete structures. *Proceedings of TsNIIIS*. Issue 36. Moscow: Transzheldorizdat, 1960. (In Russian).
11. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1962, 96 p. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Гавриловна Овчинникова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Irina G. Ovchinnikova, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Иван Александрович Черный, инженер, лаборатория тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; магистрант, НИУ МГСУ, Москва

Ivan A. Chernyi, Engineer, Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Master's degree student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

Борис Сергеевич Соколов✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: moo-shell@mail.ru

Boris S. Sokolov✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.555

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-45-57](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-45-57)**А.Н. ГУДКОВ**

АО «Тулаоргтехстрой», проспект Ленина, д. 108, г. Тула, 300026, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТИ ЛЕГКОЙ ШТУКАТУРКИ «СПАДАР СК-450» НА ПРОЦЕСС ОСУШЕНИЯ (САНАЦИЮ) ОСНОВАНИЯ ИЗ ГАЗОБЕТОНА

Аннотация

Введение. Одним из методов санации кладки стен является их покрытие слоем специального штукатурного раствора, который предназначен для: защиты материала кладки от влаги; постепенного вывода влаги из материала кладки через слой штукатурки в виде пара. Очень важным параметром для фасадной штукатурки является ее влагопроницаемость, то есть способность пропускать сквозь себя влагу, поступающую из материала кладки. В данной работе проведено сравнительное исследование двух фасадных штукатурок: легкой минеральной штукатурки «СПАДАР СК-450» и тяжелой минеральной фасадной выравнивающей штукатурки (ФВШ) по их влагопроницаемости.

Цель. Сравнительные исследования влияния влагопроницаемости штукатурок («СПАДАР СК-450» и ФВШ) на эффективность процесса осушения основания из газобетона.

Материалы и методы. Для проведения исследования были использованы образцы газобетона со слоем легкой минеральной штукатурки «СПАДАР СК-450» и минеральной тяжелой штукатурки ФВШ. В процессе работы определялись и сравнивались: изменение процента массы образцов во времени, после их водонасыщения; изменение во времени плотности потока водяного пара через подготовленные образцы; динамика изменения влажности штукатурного покрытия.

Результаты. Установлено, что плотность потока водяного пара в штукатурке ФВШ максимальна в первые 24 часа с последующим динамичным снижением. Плотность потока водяного пара в штукатурке «СПАДАР СК-450» практически равномерна на протяжении всего времени наблюдений с незначительными колебаниями.

Выводы. Установлено, что легкая штукатурка «СПАДАР СК-450» имеет большую эффективность в качестве санирующей штукатурной смеси в сравнении со штукатуркой ФВШ, так как способствует равномерному постепенному отводу влаги от газобетонного основания без существенного увеличения собственной влажности. Равномерный вывод влаги из основания через слой штукатурки «СПАДАР СК-450» способствует защите от образования солей, мигрирующих с влагой, из основания к поверхности штукатурки.

Ключевые слова: санация, влагопроницаемость, легкая минеральная штукатурка, тяжелая минеральная штукатурка, газобетон, штукатурное покрытие, плотность потока водяного пара, паропроницаемость, капиллярное водопоглощение

Для цитирования: Гудков А.Н. Исследование влияния влагопроницаемости легкой штукатурки «СПАДАР СК-450» на процесс осушения (санацию) основания из газобетона // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 45–57. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-45-57](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-45-57). EDN: XCIGEN

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 01.07.2025

Поступила после рецензирования 18.08.2025

Принята к публикации 21.08.2025

A.N. GUDKOV

JSC Tulaorgtekhstroy, Lenin Avenue, 108, Tula, 300026, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MOISTURE PERMEABILITY OF "SPADAR SK-450" LIGHT PLASTER ON THE PROCESS OF DEHUMIDIFICATION (SANITATION) OF THE AERATED CONCRETE BASE

Abstract

Introduction. One of the methods of rehabilitation of masonry walls is to cover them with a layer of special plaster mortar, which is designed to: protect the masonry material from moisture; gradual removal of moisture from the masonry material through a layer of plaster in the form of steam. A very important parameter for facade plaster is its moisture permeability, that is, the ability to pass through moisture coming from the masonry material. In this work, a comparative study of two facade plasters was carried out: "SPADAR SK-450" light mineral plaster and heavy mineral facade leveling plaster (hereinafter referred to as FLP) according to their moisture permeability.

Aim. Comparative studies of the effect of moisture permeability of plasters ("SPADAR SK-450" and FLP) on the effectiveness of the dehumidification process of the aerated concrete base.

Materials and methods. For the study, samples of non-autoclaved aerated concrete with a layer of "SPADAR SK-450" light mineral plaster and FLP heavy mineral plaster were used. During the work, the following parameters were determined and compared: the change in the percentage of mass of the samples over time, after their water saturation; the change in time in the density of the water vapor flow through the prepared samples; the dynamics of changes in the moisture content of the plaster coating.

Results. It was found that the density of the water vapor flow in the FLP plaster is maximum in the first 24 hours, followed by a dynamic decrease. At the same time, the density of the water vapor flow in the "SPADAR SK-450" plaster is almost uniform throughout the entire observation period with minor fluctuations.

Conclusions. It has been established that the "SPADAR SK-450" light plaster is more effective as a sanitizing plaster mixture in comparison with FLP plaster, as it promotes uniform gradual removal of moisture from the aerated concrete base without a significant increase in its own humidity. The uniform removal of moisture from the base through the

"SPADAR SK-450" plaster layer helps protect against the formation of salts migrating with moisture from the base to the plaster surface.

Keywords: sanitation, moisture permeability, light mineral plaster, heavy mineral plaster, aerated concrete, plaster coating, water vapor flow density, vapor permeability, capillary water absorption

For citation: Gudkov A.N. Investigation of the effect of moisture permeability of "SPADAR SK-450" light plaster on the process of dehumidification (sanitation) of the aerated concrete base. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 45–57. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-45-57](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-45-57). EDN: XCIGEN

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 01.07.2025

Revised 18.08.2025

Accepted 21.08.2025

В данной работе для сравнительного исследования были использованы две штукатурки на основе портландцемента и минеральных заполнителей (минеральные штукатурки):

- легкая минеральная штукатурка «СПАДАР СК-450», производство ООО «СПАДАР»;
- тяжелая минеральная фасадная выравнивающая штукатурка – ФВШ, изготовленная в лабораторных условиях по ранее разработанной рецептуре.

В соответствии с требованиями ГОСТ 33083-2014 [1] тяжелый штукатурный раствор имеет плотность в сухом состоянии более 1300 кг/м³, а легкий штукатурный раствор – менее 1300 кг/м³.

Составы исследуемых штукатурных смесей представлены в табл. 1

Фактические физико-механические характеристики исследуемых штукатурных составов представлены в табл. 2.

В качестве основы для изготовления испытательных образцов использовался неавтоклавный газобетон D600 (марка по плотности).

Методика проведения эксперимента

Исследованиям подвергались испытательные образцы, которые представляют собой выпиленные из газобетонного блока прямоугольные параллелепипеды размером 100 × 100 × 30 мм в количестве 6 штук для каждой испытуемой партии (рис. 1).

На одну из сторон основания подготовленных образцов газобетона слоем 5 мм наносились штукатурные растворы «СПАДАР СК-450» и ФВШ (рис. 2).

Составы штукатурных смесей

Compositions of plaster mixtures

Таблица 1

Table 1

Наименование материала	Расход материала, % от смеси	
	«СПАДАР СК-450»	ФВШ
Портландцемент белый СЕМІ R 52.5, Турция	49,0	25,0
Гранулы пенокерамики (песок) «СПАДАР»	48,1	–
Песок строительный сухой сеяный фр. 0,63 мм	–	68,79
Известь-пушонка	–	5,0
Эфир целлюлозы вязкостью 40 000 МПа×с	–	0,15
Эфир крахмала	–	0,01
Редиспергируемый порошок, VAc-E	–	1,0
Модифицирующие добавки, гидрофобизатор	2,9	–
Волокна целлюлозы, 800 мкм	–	0,05
Водотвердое отношение, В/Т	0,6	0,2

Физико–механические характеристики исследуемых штукатурных составов

Physico–mechanical characteristics of the studied plaster compositions

Таблица 2

Table 2

Наименование показателя	«СПАДАР СК-450»	ФВШ
Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³	500	1680
Прочность на осевое сжатие	2,5	12,0
Капиллярное водопоглощение, кг/(м ² ×мин ^{0,5})	0,14	0,35
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м×ч×Па)	0,23	0,1

Нанесенные на газобетон штукатурные растворы твердели 28 суток в нормальных условиях при температуре воздуха от +20 до +25 °С, после чего подготовленные образцы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре +60 °С.

Образцы 1–6 выполнены с покрытием штукатурным раствором «СПАДАР СК-450» – **партия 1**.

Образцы 7–12 выполнены с покрытием штукатурным раствором ФВШ – **партия 2**.

Для проведения исследований подготовленные вышеописанным образом образцы помещались

в воду на толщину до 20 мм и выдерживались до водонасыщения газобетона в течение 30 минут (рис. 3). Среднее значение водопоглощения по массе газобетона исследуемых образцов за этот промежуток времени составило $Wm^{г.6.} = 22,2 \%$.

Извлеченные из воды образцы в водонасыщенном состоянии оборачивались в полиэтиленовую пленку таким образом, чтобы влага из них могла выходить только через слой штукатурного покрытия (рис. 4).



Рис. 1. Фото образцов газобетона, выпиленных из блока
Fig. 1. Photos of aerated concrete samples cut from the block



Рис. 2. Фото образцов газобетона, покрытых слоем исследуемых штукатурных смесей
Fig. 2. Photos of aerated concrete samples covered with a layer of the studied plaster mixtures



Рис. 3. Фото подготовки исследуемых образцов (погружение в воду для водонасыщения газобетона)
Fig. 3. Photos of the preparation of the studied samples (immersion in water for water saturation of aerated concrete)

После чего производилась серия контрольных взвешиваний образцов через интервалы времени: 24, 48, 72, 144 и 168 часов (рис. 5).

Также осуществлялся замер влажности поверхностного штукатурного покрытия влагомером-МГ4 (зав. № 6075) образцов через интервалы времени: 24, 48, 72, 144 и 168 часов (рис. 6).

Исследование динамики изменения массы образцов во времени после их водонасыщения

В ходе проведенных исследований были получены значения массы исследуемых образцов, показанные в табл. 3.



Рис. 4. Фото образцов, подготовленных к испытаниям
Fig. 4. Photos of samples prepared for testing



Рис. 5. Фото контрольных взвешиваний образцов. Образец 9 со штукатуркой ФВШ визуально увлажнен
Fig. 5. Photos of control weighings of samples. Sample 9 with FLP plaster is visually moistened



Рис. 6. Измерение влажности поверхности штукатурного покрытия исследуемых образцов влагомером МГ4
Fig. 6. Measuring the moisture content of the plaster coating surface of the studied samples with MG4 moisture meter

Масса исследуемых образцов через анализируемые периоды времени

Таблица 3

Table 3

The mass of the studied samples over the analyzed time periods

№ образца	Исходная масса, г	Масса образцов через интервал времени Δt (час), $m_{\Delta t}$, г				
	m_0	m_{24}	m_{48}	m_{72}	m_{144}	m_{168}
Партия образцов 1, штукатурка «СПАДАР СК-450»						
1	264,59	262,39	259,48	257,39	249,26	246,64
2	285,63	282,68	279,39	277,00	266,00	262,29
3	290,00	287,57	285,00	283,00	274,39	271,00
4	272,38	270,39	268,00	266,00	258,57	255,65
5	253,47	250,68	247,72	245,33	237,00	234,00
6	287,66	285,00	282,00	279,39	270,41	267,00
Среднее значение массы, m^{cp}	275,62	273,12	270,26	268,02	259,27	256,10
Партия образцов 2, штукатурка ФВШ						
7	305,00	301,00	298,23	296,51	291,66	290,00
8	301,45	300,00	298,00	296,50	292,00	290,44
9	319,00	314,00	309,00	305,50	296,72	294,57
10	341,00	334,64	329,00	325,00	316,31	314,00
11	314,22	312,00	310,00	309,00	304,00	302,00
12	306,43	301,00	296,77	294,58	289,56	288,00
Среднее значение массы, m^{cp}	314,52	310,44	306,83	304,51	298,37	296,5

Примечание. Большая масса образцов в партии 2 в сравнении с партией 1 объясняется тем, что нанесенная на них тяжелая штукатурка ФВШ имеет в 3,36 раза больший объемный вес.

Изменение (уменьшение) среднего значения массы исследуемых образцов в процентах с течением времени вычисляют по формуле (1):

$$\Delta W_m^{cp} = (m_0^{cp} - (m_{\Delta t}^{cp})) / m_0^{cp} \times 100 \%, \quad (1)$$

где m_0^{cp} – средняя масса водонасыщенных образцов в начальной точке отсчета, г;

$m_{\Delta t}^{cp}$ – средняя масса образца, насыщенного водой, через интервал времени, Δt , г.

Или формулу (1) можно записать:

$$\Delta W_m^{cp} = \Delta m_{\Delta t}^{cp} / m_0^{cp} \times 100 \%,$$

$\Delta m_{\Delta t}^{cp} = m_0^{cp} - m_{\Delta t}^{cp}$ – средняя величина изменения массы образцов за время Δt , г;

Δt – интервал времени от нулевого значения до времени последнего взвешивания, ч.

Рассчитывая изменение (уменьшение) среднего значения массы исследуемых образцов по формуле (1), получаем значения, представленные в табл. 4.

Динамика уменьшения среднего значения массы (в процентном выражении) исследуемых образцов в процессе постепенного испарения влаги через слой исследуемых штукатурных покрытий отражена на графике рис. 7.

Анализ полученных результатов

В первые 72 часа после водонасыщения штукатурка ФВШ интенсивнее удаляет влагу из исследуемых образцов в сравнении со штукатуркой «СПАДАР СК-450», о чем свидетельствует большее снижение средней массы образцов со штукатуркой ФВШ в сравнении с (табл. 4, рис. 7) «СПАДАР СК-450». Тем не менее образцы партии 2 (образцы 7–12) со штукатуркой ФВШ находятся визуально в увлажненном состоянии,

что свидетельствует о большей концентрации влаги в их слое в сравнении с партией 1 (образцы 1–6) (рис. 5), которые визуально выглядят сухими.

В период от 84 до 168 часов (рис. 7) происходит обратный процесс. Образцы со штукатуркой «СПАДАР СК-450» (партия 1) начинают больше терять в весе в сравнении с образцами со штукатуркой ФВШ. Так, к 168 часам наблюдения средняя потеря массы ΔW_{cp}^m на образцах со штукатуркой «СПАДАР СК-450» составила 7,08 %, в то время как на образцах со штукатуркой ФВШ средняя потеря массы $\Delta W_{cp}^m = 5,7$ %.

Динамика изменения во времени средней массы образцов связана напрямую с капиллярно-пористой структурой исследуемых штукатурных покрытий, что в свою очередь является следствием их состава.

Таблица 4

Уменьшение среднего значения массы образцов в течение анализируемого периода времени

Table 4

Decrease in the average weight of the samples during the analyzed time period

Номер партии образцов	ΔW_{cp}^m , % через интервал времени				
	24 ч	48 ч	72 ч	144 ч	168 ч
Партия 1 (СПАДАР)	0,91	1,94	2,76	5,93	7,08
Партия 2 (ФВШ)	1,30	2,43	3,16	5,13	5,70

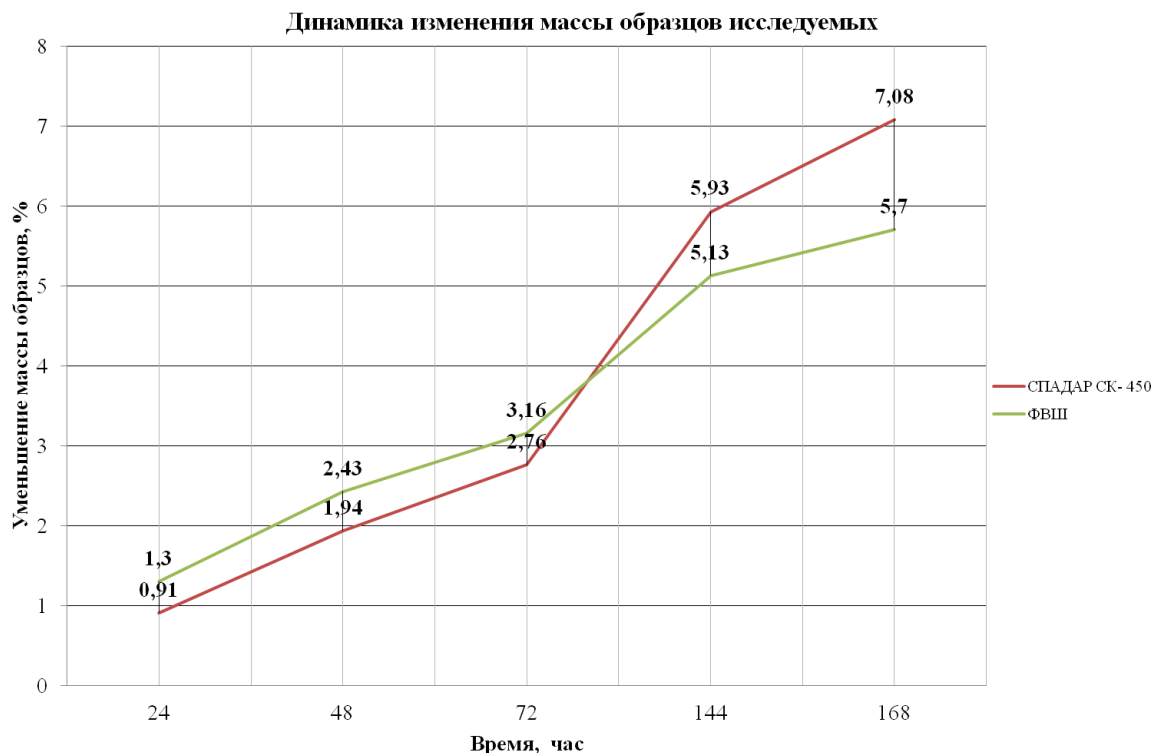


Рис. 7. График уменьшения средней массы исследуемых образцов в течение анализируемого периода времени
Fig. 7. A graph of the decrease in the average mass of the studied samples during the analyzed time period

Большее капиллярное водопоглощение штукатурки ФВШ (табл. 2) в сравнении со штукатуркой «СПАДАР СК-450» заставляет более интенсивно концентрировать воду в слое данного штукатурного покрытия, а меньшая паропроницаемость штукатурки ФВШ заставляет влагу задерживаться в штукатурном слое.

Тем не менее ввиду большей концентрации влаги в штукатурном слое ФВШ происходит и большая ее отдача в атмосферу в виде пара в первые 72 часа наблюдений. Постепенно высыхая, образцы со штукатуркой ФВШ уже примерно к 80 часам наблюдений сравняются по среднему процентному уменьшению массы.

Исследование изменения плотности потока водяного пара через образцы

По результатам взвешиваний исследуемых образцов газобетона со штукатурными покрытиями «СПАДАР СК-450» и ФВШ установлена динамика изменения плотности потока водяного пара через исследуемые образцы за анализируемый период времени.

Плотность потока водяного пара через образцы вычислялась по формуле ГОСТ 25898-2020 [2].

Данная формула имеет вид:

$$g = \Delta m / (\Delta \tau \times A), \quad (2)$$

где g – плотность потока водяного пара через образец, мг/(ч×м²);

Δm – изменение массы исследуемого образца за интервал времени $\Delta \tau$, мг;

$\Delta \tau$ – интервал времени между двумя последовательными взвешиваниями, ч;

A – площадь рабочей поверхности образца, через которую проходит поток водяного пара, м².

В нашем случае формула имеет вид:

$$g = \Delta m_{\Delta \tau}^{cp} / (\Delta \tau \times A) \text{ г/(ч×м²)},$$

где $\Delta m_{\Delta \tau}^{cp}$ – средняя величина изменения массы образцов за время $\Delta \tau$, г;

$\Delta \tau$ – интервал времени от нулевого значения до времени последнего взвешивания, ч.

Динамика изменения плотности потока водяного пара через исследуемые образцы газобетона со штукатурными покрытиями «СПАДАР СК-450» и ФВШ показана в табл. 5 и на графике рис. 8.

Таблица 5

Изменение плотности потока водяного пара через слой штукатурного покрытия образцов за анализируемые периоды времени

Table 5

Changing of the density of the water vapor flow through the samples plaster coverage layer for the analyzed time periods

Номер партии образцов	Плотность потока водяного пара g , г/(ч×м²) через интервал времени				
	24 ч	48 ч	72 ч	144 ч	168 ч
Партия 1 (СПАДАР)	10,4	11,2	10,5	11,3	11,6
Партия 2 (ФВШ)	17,0	15,9	13,8	11,2	10,7

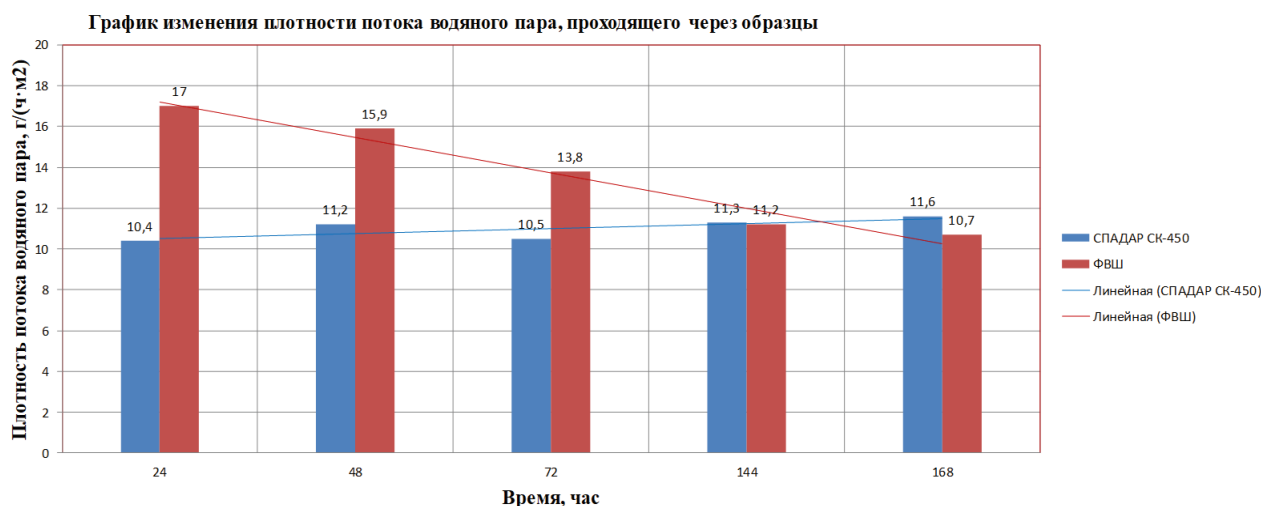


Рис. 8. График изменения плотности потока водяного пара через исследуемые образцы в течение анализируемого периода времени

Fig. 8. Graph of changes in the density of the water vapor flow through the test samples during the analyzed time period

Анализ полученных результатов

Так как образцы партии 2 со штукатуркой ФВШ имеют большую влажность, особенно в первые 72 часа наблюдений (что отмечается визуально), то в этот период времени наблюдается большее испарение влаги из них, чем на образцах партии 1 со штукатуркой «СПАДАР СК-450». Об этом свидетельствует значительно более интенсивная плотность потока водяного пара через образцы партии 2 (рис. 8).

По истечении 144 часов плотность потока водяного пара через образцы с обеими исследуемыми штукатурками выравнивается, в дальнейшем растет на образцах со штукатуркой «СПАДАР СК-450» и падает на образцах со штукатуркой ФВШ.

Анализируя линии тренда на графике рис. 8, можно однозначно заключить:

- плотность потока водяного пара через слой штукатурного покрытия неуклонно и существенно снижается с течением анализируемого периода времени на образцах со штукатурной смесью ФВШ;
- плотность потока водяного пара через слой штукатурной смеси «СПАДАР СК-450» за анализируемый период времени равномерен (с незначительными колебаниями) с динамикой к росту.

Исследование изменения влажности поверхности штукатурного покрытия образцов за анализируемый период времени

Следует отметить, что после водонасыщения газобетонных образцов водой начался интенсивный перенос влаги из газобетонного основания в слой штукатурного покрытия путем капиллярного подсоса воды из основания в штукатурку. Это особенно наглядно выразилось на штукатурном покрытии ФВШ, что визуально наблюдалось в намокании ее поверхности (рис. 9). Особенно интенсивно этот процесс наблюдался в первые 24 часа.

В то же время штукатурное покрытие «СПАДАР СК-450» визуально выглядело сухим (рис. 9).

В ходе замера влажности обозначим ее как $W_{mcp}^{шп}$ поверхности исследуемых штукатурных покрытий на тестируемых образцах получились средние значения влажности $W_{mcp}^{шп}$ для каждой исследуемой партии за анализируемые периоды времени, показанные в табл. 6.

Анализ полученных результатов

Как наглядно видно из табл. 6 и графика на рис. 10, концентрация влаги в штукатурном слое ФВШ значительно выше, чем в штукатурке «СПАДАР СК-450» в течение всего анализируемого периода времени, хотя и с динамикой интенсивного снижения до значений $W_{mcp}^{шп}$ с 9,6 до 5,2 %.



Рис. 9. Фото исследуемых образцов. Сверху образцы со штукатуркой «СПАДАР СК-450», снизу со штукатуркой ФВШ
Fig. 9. Photos of the studied samples. Samples with SPADAR SK-450 plaster on top and FLP plaster on the bottom

Таблица 6

Средние значения влажности поверхности исследуемых штукатурных покрытий за анализируемые периоды времени

Table 6

The average values of the humidity of the surface of the studied plaster coatings for the analyzed time periods

Номер партии образцов	$W_{mcp}^{шп}$, % через интервал времени				
	24 ч	48 ч	72 ч	144 ч	168 ч
Партия 1 (СПАДАР)	1,8	1,9	0,96	1,1	0,9
Партия 2 (ФВШ)	9,6	8,2	6,6	4,8	5,2

Как показано на схеме (рис. 11), на границе контакта «газобетон – штукатурка ФВШ» перенос влаги происходит в виде жидкости с помощью капиллярного подсоса и, в меньшей степени, миграцией влаги в виде пара, вследствие чего штукатурный слой находится в увлажненном состоянии. Максимальная концентрация влаги в штукатурном слое ФВШ происходит в первые 24 часа с последующим ее снижением (табл. 6, рис. 10).

Раз концентрация влаги в слое штукатурки ФВШ максимальна в первые 48 часов (рис. 10), то и ее испарение происходит более интенсивно в сравнении со штукатуркой «СПАДАР СК-450». Об этом свидетельствуют результаты динамики изменения массы (табл. 3 и 4, рис. 7) и динамики изменения плотности потока водяного пара через исследуемые образцы (табл. 5, рис. 8).

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ШТУКАТУРОК

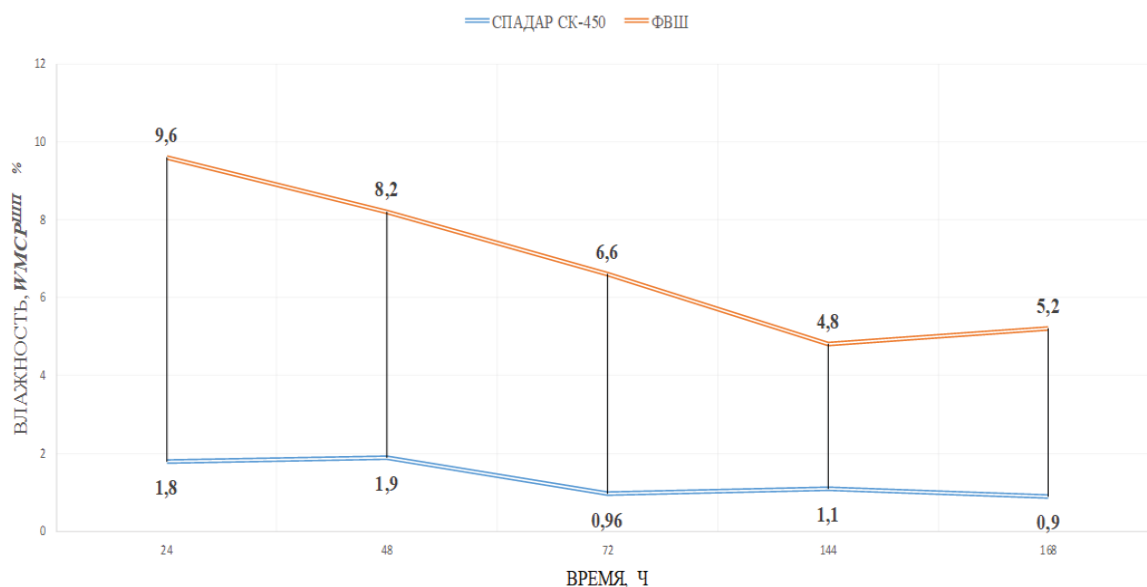


Рис. 10. График изменения влажности поверхности штукатурок в исследуемых образцах
Fig. 10. Graph of changes in the humidity of the plaster surface in the studied samples

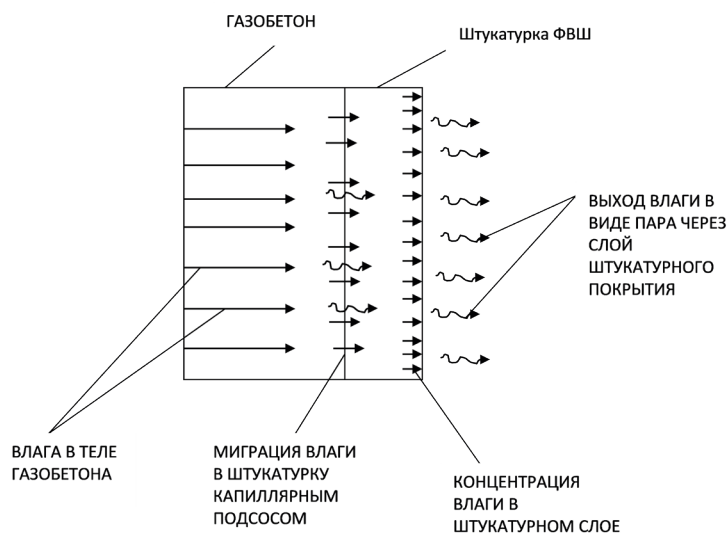


Рис. 11. Схема миграции влаги из слоя газобетона через слой штукатурки ФВШ
Fig. 11. The scheme of moisture migration from a layer of aerated concrete through a layer of FLP plaster

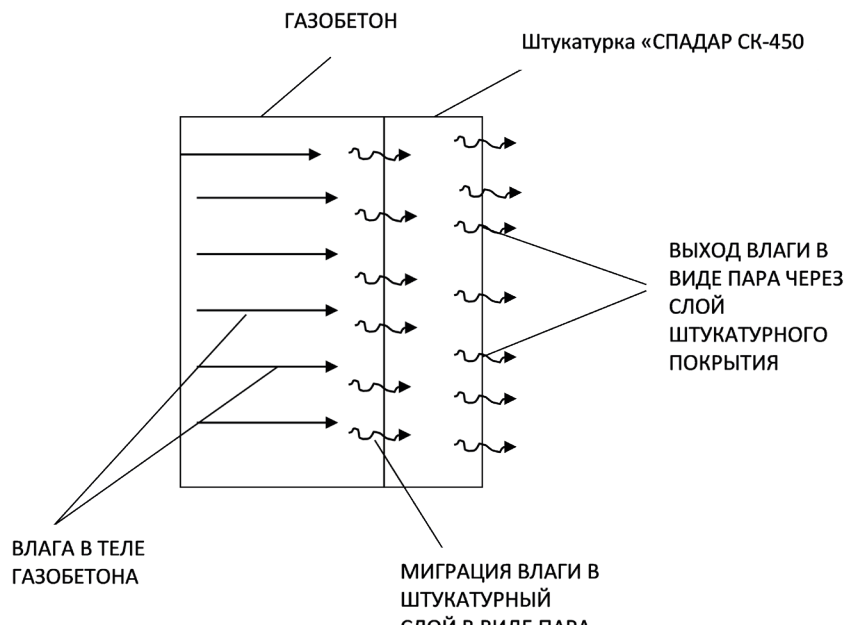


Рис. 12. Схема миграции влаги из слоя газобетона через слой штукатурки «СПАДАР СК-450»

Fig. 12. The scheme of moisture migration from a layer of aerated concrete through a layer of plasters "SPADAR SK-450"

Штукатурка «СПАДАР СК-450» незначительно концентрирует влагу в своем слое в количестве до 1,8 % в первые 48 часов с последующим плавным снижением (табл. 6, рис. 10). Наблюдается постепенное плавное снижение влажности $W_{тср}^{шт}$ с 1,8 % через 24 часа до 0,9 % к 168 часам наблюдений.

Влага выходит из штукатурного слоя «СПАДАР СК-450» равномерно (табл. 4, рис. 7) и постепенно в виде пара, не концентрируясь в теле штукатурки (рис. 12).

Надо отметить, что полученные выше результаты по динамике влагопроницаемости и влагопереноса в исследуемых штукатурных покрытиях определяются во многом их составом и как функция от состава физико-техническими характеристиками, представленными в табл. 2, в частности капиллярным водопоглощением и коэффициентом паропроницаемости. Низкое значение капиллярного водопоглощения штукатурки «СПАДАР СК-450», равное $0,14 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{мин}^{0,5})$, а также ее высокая паропроницаемость, равная $0,23 \text{ мг}/(\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па})$, обеспечиваются не только оптимальным соотношением вяжущего и легкого пенокерамического заполнителя «СПАДАР», но и комплексом функциональных добавок, среди которых есть высокоэффективный комплексный гидрофобизатор.

Именно наличие гидрофобного агента обеспечивает низкую проницаемость при капиллярном подсосе штукатурки, а ее низкая плотность (до $500 \text{ кг}/\text{м}^3$) и высокая пористость обеспечивают высокую паропроницаемость, все это в комплексе позволяет штукатурному покрытию «СПАДАР СК-450» работать, как показано на рис. 12.

В отличие от легкой штукатурки «СПАДАР СК-450» штукатурка ФВШ имеет значительно большую плотность ($1680 \text{ кг}/\text{м}^3$, табл. 2) и меньшую проницаемость ($0,1 \text{ мг}/(\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па})$), в то же время капиллярное водопоглощение ФВШ составляет $0,35 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{мин}^{0,5})$. **Все эти факторы заставляют данную штукатурку быстро вбирать в себя воду из тела газобетона и накапливать в себе, что и подтверждается результатами испытаний на влажность** (табл. 6, рис. 10). Данная штукатурка работает, как показано на рис. 11.

Повышенная влажность штукатурного покрытия ФВШ, вследствие капиллярного поглощения воды из тела газобетона, может отрицательно сказаться на ее эксплуатационных свойствах и долговечности, особенно в период знакопеременной температуры наружного воздуха.

Выводы

На основании данных проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Газобетонное основание начинает быстрее отдавать влагу с легкой штукатуркой «СПАДАР СК-450», примерно через 78 часов от начала наблюдений, вследствие равномерного испарения влаги через слой штукатурки на протяжении всего периода наблюдений.

В то же время большее снижение массы образцами с тяжелой штукатурной смесью ФВШ в течение 78 часов от начала наблюдений объясняется их большим водонасыщением в первые 24 часа и, как следствие, большим испарением влаги (рис. 7).

2. В течение 168 часов (7 суток) наблюдения общая потеря влаги из исследуемых образцов со штукатуркой «СПАДАР СК-450» составила 7,08 % с динамикой к дальнейшему увеличению скорости влагопотери (высыхания), а общая потеря влаги из исследуемых образцов со штукатуркой ФВШ составила 5,7 % и динамикой к дальнейшему снижению скорости высыхания (рис. 7).

3. Штукатурка «СПАДАР СК-450» способствует постепенному равномерному выводу влаги через себя, о чем свидетельствует динамика изменения плотности потока водяного пара (рис. 8). В то же время у тяжелой штукатурки ФВШ наблюдается максимальная плотность потока водяного пара в течение 24 часов от начала наблюдений с тенденцией к постепенному снижению до значений плотности потока водяного пара, сопоставимых со значениями у штукатурки «СПАДАР СК-450» к 144 часам наблюдения. Это является следствием постепенного «высыхания» штукатурного слоя ФВШ с установлением равновесного влагопереноса (рис. 8).

4. Штукатурка «СПАДАР СК-450» выводит влагу из газобетона без значительного увеличения собственной влажности в отличие от штукатурки ФВШ (рис. 10). Это существенно повышает ее эксплуатационные свойства и долговечность, а также saniрующие свойства.

5. Легкая штукатурка «СПАДАР СК-450» обладает несомненным преимуществом в сравнении с тяжелой фасадной выравнивающей штукатуркой ФВШ в качестве материала для saniрующего покрытия газобетонного основания.

6. Необходимо провести дальнейшую работу по исследованию физико-механических свойств смеси сухой штукатурки «СПАДАР СК-450» с возможным усовершенствованием ее рецептуры для получения наилучших физико-технических характеристик (например, повышение прочности штукатурки и скорости твердения, повышение белизны штукатурного покрытия вводом в состав высших пуццоланов типа «белой сажи», а также оксидов алюминия).

Благодарности

Автор выражает благодарность компании ООО «СПАДАР» за предоставленные для проведения данной работы образцы смеси сухой штукатурной смеси «СПАДАР СК-450».

Список литературы

1. ГОСТ 33083-2014. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
2. ГОСТ 25898-2020. Материалы и изделия строительные. Методы определения паропрооницаемости и сопротивления паропрооницанию. Москва: Стандартинформ, 2021.
3. Гудков А.Н. Сравнительные исследования влагозащитных свойств легких гидрофобных штукатурок на легких заполнителях

по отношению к газобетону // Бетон и железобетон. 2024. № 6 (625). С. 40–50. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-40-50](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-40-50). EDN: RYWDVC.

4. ГОСТ Р 58277-2018. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2019.
5. ГОСТ 28013-98. Растворы строительные. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
6. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2018.
7. СП 82-101-98. Приготовление и применение растворов строительных. Москва: Госстрой России, 1999.
8. Баженов Ю.М. Технология бетона. Москва: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
9. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г.А. Технология сухих строительных смесей. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. 112 с.
10. Корнеев В.И., Зозуля П.В., Медведева И.Н., Богоявленская Г.А., Нуждина Н.И. Рецептурный справочник по сухим строительным смесям. Санкт-Петербург: РИА «Квинтет», 2010. 318 с.
11. Корнеев В.И., Зозуля П.В. и др. Сухие строительные смеси. Состав, свойства: Учебное пособие. Москва: РИФ «Стройматериалы», 2010. 320 с.

References

1. State Standard 33083-2014. Dry building plaster cement binder mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
2. State Standard 25898-2020. Building materials and products. Methods for determination of water vapor permeability and water vapor resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
3. Gudkov A.N. Comparative studies of moisture protection properties of the lightweight hydrophobic plasters on lightweight fillers in relation to aerated concrete. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2024, no. 6 (625), pp. 40–50. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-40-50](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-40-50). EDN: RYWDVC.
4. State Standard R 58277-2018. Dry building mixes based on cement binder. Test methods. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
5. State Standard 28013-98. Mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
6. State Standard 5802-86. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
7. SP 82-101-98. Manufacturing and usage of solutions in construction industry. Moscow: Gosstroy of Russia, 1999. (In Russian).
8. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete. Moscow: ASV Publ., 2002, 500 p. (In Russian).

9. Bazhenov Yu.M., Korovyakov V.F., Denisov G.A. Technology of dry building mixes. Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2011, 112 p. (In Russian).
10. Korneev V.I., Zozulya P.V., Medvedeva I.N., Bogoyavlenskaya G.A., Nuzhdina N.I. Compounding guide to dry building mixes. Saint Petersburg: RIA "Quintet", 2010, 318 p. (In Russian).
11. Korneev V.I., Zozulya P.V. Dry building mixes. Composition, properties: Textbook. Moscow: RIF "Building materials", 2010, 320 p. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Николаевич Гудков, руководитель лаборатории строительных материалов и технологий проектно-технологического центра, АО «Тулаоргтехстрой», Тула

e-mail: alekseygudkov2016@yandex.ru

Alexey N. Gudkov, Head of the Laboratory of Building Materials and Technologies of the Design and Technology Center, JSC Tulaorgtekhstroy, Tula

e-mail: alekseygudkov2016@yandex.ru

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.

«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» – 36569.

Приглашаем к сотрудничеству ученых, аспирантов, исследователей!



**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

УДК 624.012.4–183.2; 624.044:539.384

[https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–4\(629\)–58–66](https://doi.org/10.37538/0005–9889–2025–4(629)–58–66)**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 « σ – ϵ » БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ. ЧАСТЬ 2

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 согласно СП 63.13330.2018. Вторая часть посвящена разработке математического аппарата и расчетному обоснованию введенных в первой части новых понятий о законах и диаграммах деформирования бетона в условиях сжатия и растяжения.

Цель. Разработать и обосновать расчетный аппарат, уточняющий положения метода предельных состояний в части нормирования зависимостей « σ – ϵ » бетона при сжатии и растяжении.

Материалы и методы. Формальная логика (анализ, синтез, индукция, дедукция), методы теории вероятностей и математической статистики, метод предельных состояний.

Результаты. Показана несогласованность и несовершенство нормативных документов РФ: по контролю однородности свойств бетона; на технические условия его применения; на технические условия цемента как главной составляющей бетона; по механическому расчету железобетонных конструкций. Предложен коэффициент статистической трансформации эталонного закона деформирования бетона при сжатии – γ_c (растяжении – γ_t), который позволяет переходить от эталонного ко всем прочим законам деформирования, необходимым в расчетах железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний.

Выводы. Для устранения противоречий в нормах необходимо ввести единый стандарт однородности физико-механических свойств бетона, например принять $V = 0,135$ либо иное значение, выработанное и согласованное в результате обсуждения сообществом ученых и инженеров. Ужесточить требования по однородности для цемента, например принять $V = 0,03–0,05$, как это было ранее регламентировано в советских нормах. Для полноценного нормирования прочностных и деформационных характеристик бетона, входящих в зависимости « σ – ϵ », необходимо занормировать минимально 7 параметров, представленных в формулах данной статьи.

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 « σ – ϵ » бетона при сжатии и растяжении. Часть 2 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 58–66. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-58-66](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-58-66). EDN: JPLHAM

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 23.04.2025

Поступила после рецензирования 21.05.2025

Принята к публикации 29.05.2025

O.V. RADAYKIN

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

FSAEI HE Kazan (Volga Region) 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 2

Abstract

Introduction. In two parts of the article, the conceptual and methodological issues arising in the calculations of reinforced concrete structures by the limit state method using a nonlinear deformation model according to SP 63.13330.2018 are investigated. The second part is devoted to the development of a mathematical apparatus and a computational justification of the new concepts introduced in the first part about the laws and diagrams of concrete deformation under compression and stretching conditions.

Aim. To develop and substantiate a calculation apparatus clarifying the provisions of the limit state method in terms of normalization of the " $\sigma - \varepsilon$ " dependencies of concrete under compression and tension.

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

Results. The inconsistency and imperfection of regulatory documents of the Russian Federation is shown: on the control of the uniformity of concrete properties; on the technical conditions of its use; on the technical conditions of cement as the main component of concrete; on the mechanical calculation of reinforced concrete structures.

The coefficient of statistical transformation of the reference law of concrete deformation under compression – γ_c (for tension – γ_t) is proposed, which makes it possible to switch from the reference law to all other laws of deformation necessary in the calculations of reinforced concrete structures for two groups of limiting states.

Conclusions. To eliminate contradictions in the norms, it is necessary to introduce a single standard for the uniformity of the physical and mechanical properties of concrete, for example, to adopt $V = 0.135$ or another value developed and agreed upon as a result of discussion by the community of scientists and engineers. To tighten the uniformity requirements for cement, for example, to adopt $V = 0.03-0.05$, as it was previously regulated in Soviet standards. In order to fully normalize the strength and deformation characteristics of concrete, which are included in the dependences " $\sigma - \varepsilon$ ", it is necessary to normalize at least 7 parameters presented in the formulas of this article.

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 2. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 58–66. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-58-66](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-58-66). EDN: JPLHAM

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 23.04.2025

Revised 21.05.2025

Accepted 29.05.2025

Введение

Введем понятие: **коэффициент статистической трансформации эталонного закона деформирования бетона при сжатии – γ_c (растяжении – γ_t)** – это такой коэффициент надежности, деля на который значения нормальных напряжений σ и умножая на него соответствующие относительные деформации ε в эталонном законе деформирования бетона, получают минимальные пределы односторонних доверительных интервалов в оценках p -перцентилей σ и ε для построения через эти оценки соответствующего расчетному случаю трансформированного закона деформирования бетона. Исходя из данного определения, вытекают следующие выражения трансформации (расшифровку обозначений входящих в формулу величин см. в первой части статьи [1])

$$f_{b,tr}(\varepsilon_b) = \frac{1}{\gamma_c} f_{b,st}(\gamma_c \varepsilon_b), \varepsilon_b \in \left[0; \frac{\varepsilon_{b,ult}}{\gamma_c}\right], \quad (1)$$

$$f_{bt,tr}(\varepsilon_{bt}) = \frac{1}{\gamma_t} f_{bt,st}(\gamma_t \varepsilon_{bt}), \varepsilon_{bt} \in \left[0; \frac{\varepsilon_{bt,ult}}{\gamma_t}\right].$$

В общем виде введенный выше коэффициент с учетом принятых предпосылок а) и б) п. 4.1 [1] отдельно для сжатия и растяжения определяется следующими формулами:

$$\gamma_c = \frac{1}{1 - z_p V_c - \frac{t_{\alpha;n-1}}{\sqrt{n}} k_p V_c}, \quad \gamma_t = \frac{1}{1 - z_p V_t - \frac{t_{\alpha;n-1}}{\sqrt{n}} k_p V_t}, \quad (2)$$

$$k_p = \sqrt{1 + 0,5 z_p^2},$$

где V_c, V_t – нормативные коэффициенты вариации в генеральной совокупности для механической характеристики бетона, находящегося соответственно в условиях сжатия и растяжения;

n – количество экспериментальных образцов, по которым проводится контроль данной характеристики (например, $n = 30$ шт.);

z_p – перцентиль стандартного нормального распределения;

$t_{\alpha;n-1}$ – квантиль распределения Стьюдента;

k_p – параметр, уточняющий коэффициент вариации при переходе от интервальных оценок среднего к интервальным оценкам перцентилей, принимается из решения вероятностного уравнения, приведенного в [2];

α – уровень доверительной вероятности ($\alpha = 0,95$);
 p – фиксированная вероятность p -перцентилей нормального распределения: $p = 0,5$ – для эталонного и осредненного законов деформирования (для них $\gamma_c = \frac{1}{1 - \frac{t_{\alpha;n-1} V_c}{\sqrt{n}}}$ и $\gamma_t = \frac{1}{1 - \frac{t_{\alpha;n-1} V_t}{\sqrt{n}}}$); $p = 0,05$ – для нормативного (базового) закон деформирования; $p = 0,004$ – для расчетного закона деформирования бетона для расчетов по первой группе предельных состояний; $p \in (0,004; 0,05]$ – для расчетного закона деформирования бетона для расчетов по второй группе предельных состояний.

При большой выборке $n \geq 1000$ шт. в формуле (5) квантили распределения Стьюдента $t_{\alpha;n-1} \rightarrow 0$, тогда:

$\gamma_c = \frac{1}{1 - z_p V_c}, \quad \gamma_t = \frac{1}{1 - z_p V_t}$. И далее для эталонного и осредненного законов деформирования с большой выборкой будем иметь $\gamma_c = 1$ и $\gamma_t = 1$.

В качестве примера примем $V_c = V_t = 0,135$, $\alpha = 0,95$ и три варианта значений количества контрольных образцов n , равное 3, 30 и 10^6 шт. Получаемые по формулам (2), с учетом этих исходных данных, результаты для различных законов деформирования сведем в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что с увеличением объема выборки (количества контрольных образцов бетона) коэффициенты трансформации уменьшаются и величины σ, ε в законах деформирования стремятся к точечным своим оценкам. Собственные расчеты показали, что при $n = 1000$ шт. отличие в значениях коэффициентов γ_c, γ_t со случаем $n = 10^6$ шт. не превышает 2,7 %, что можно считать несущественным. Из табл. 1 также видно, что при $n = 3$ для первой группы предельных состояний коэффициент трансформации, а, по существу, это и есть коэффициент запаса по прочности бетона, составляет весьма значительную величину – 6,318. Для второй группы предельных состояний обратная величина этого коэффициента $1/\gamma_c$ является по сути

Таблица 1

Коэффициенты статистической трансформации эталонного закона деформирования бетона при сжатии и растяжении для случая $V_c = V_t = 0,135$ и $\alpha = 0,95$

Table 1

Coefficients of statistical transformation of the reference law of concrete deformation under compression and tension for the case of $V_c = V_t = 0,135$ and $\alpha = 0,95$

Закон деформирования бетона	Фиксированная вероятность p для p -перцентилей	Число Стьюдента для одностороннего доверительного интервала, $t_{\alpha, n-1}$			p -перцентиль стандартного нормального распределения, z_p	Коэффициенты статистической трансформации по (5), $\gamma_c = \gamma_t$		
		$n = 3$	$n = 30$	$n = 10^6$		$n = 3$	$n = 30$	$n = 10^6$
Эталонный	0,5	2,920	1,6991	1,0	0	1,295	1,044	1,0
Осредненный	0,5	2,920	1,6991	1,0	0	1,295	1,044	1,0
Нормативный	0,05				1,645	2,332	1,401	1,286
Расчетный для I-й группы ПС	0,004				2,878	6,318	1,808	1,559
Расчетный для II-й группы ПС	0,05				1,645	2,332	1,401	1,286

тем же коэффициентом 0,8, что стоит в формуле (16) ГОСТ 18105-2018 [3] при контроле по схеме Г. Проведем расчет коэффициента $1/\gamma_c$ при соответствующих значениях V_c и n , приведенных в табл. 3 этого ГОСТ [3] (табл. 2).

По последнему столбцу табл. 2 видно, что **ошибка назначения граничных коэффициентов вариации в табл. 3 ГОСТ 18105-2018 [3] составляет от +17,9 до -21,67 %, что весьма существенно и в конечном счете чревато аварийными ситуациями**. Безопасными будут лишь случаи контроля прочности бетона по 3–8 образцам и при количестве образцов более 10^4 .

Теперь покажем, как на основе формулы (5) могут быть вычислены коэффициенты надежности по бетону γ_b и γ_{bt} из п. 6.1.11 СП 63.13330.2018 [4]. Если формализовать подход к их определению, то с точки зрения теории математической статистики и изложенных выше авторских предпосылок каждый из них является отношением длин односторонних доверительных интервалов (при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$) для точечной оценки соответственно 5-го перцентилей и 0,4-го перцентилей прочности бетона на сжатие и растяжение:

$$\gamma_b = \frac{1 - z_5 V_c - \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} k_5 V_c}{1 - z_{0,4} V_c - \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} k_{0,4} V_c}, \quad \gamma_{bt} = \frac{1 - z_5 V_t - \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} k_5 V_t}{1 - z_{0,4} V_t - \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} k_{0,4} V_t}, \quad (3)$$

$$k_5 = \sqrt{1 + 0,5 z_5^2}, \quad k_{0,4} = \sqrt{1 + 0,5 z_{0,4}^2},$$

где z_5 , $z_{0,4}$ – соответственно 5-й и 0,4-й перцентили нормального распределения прочности бетона.

Следствием формулы (3) при предпосылке

$V_c = V_t$ является $\gamma_b = \gamma_{bt}$. Если подставить в нее такие данные: $n = 30$ шт., $V_c = V_t = 0,135$ и $\alpha = 0,95$, то получим $\gamma_b = \gamma_{bt} = 1,291$, что практически совпадает со значением $\gamma_b = \gamma_{bt} = 1,3$ из п. 6.1.11 [4] (отличие всего 0,69 %). Примечание: если контроль прочности бетона на растяжение проводится косвенно через прочность на сжатие по неким корреляционным зависимостям, то в п. 6.1.11 [4] принимается $\gamma_{bt} = 1,5 > 1,3$. Так было принято исходя из предположения, что в действительности бетон имеет более высокую изменчивость (ее характеризует коэффициент вариации V) прочности при растяжении, чем при сжатии. Однако это допущение вступало в противоречие с п. 1.3.2 ГОСТ 26633-91 [5], где было занормировано: $V_c = V_t = 0,135$. Получить значение $\gamma_{bt} = 1,5$ согласно формуле (6) можно только при коэффициенте вариации $V_t = 0,1757$, что также противоречит [5]. Примерно такое же значение $V_t = 0,18$ приводит А.С. Лычев в [6]. Полученное значение превышает на 30,1 % ранее занормированное 0,135 и на 9,8 % предельное значение $V_u = 0,16$ из табл. А.1 актуального на сегодня ГОСТ 18105-2018 [3].

Можно отметить работу [7], в которой приведены коэффициенты запаса (надежности), для которых формулы строятся схожим образом, что предложены в данной статье – формулы (2) и (3). Но в [7] не учитывается влияние выборочных оценок прочности, потребность в которых возникает в связи с выполнением контроля качества выпускаемых бетонов.

Самое важное, что следует сказать в отношении формул (2) и (3) – **пока на уровне ГОСТ окончательно не будут занормированы коэффициенты вариации V_c , V_t прочностных и деформационных**

Таблица 2

Расчет коэффициента $1/\gamma_c$ при исходных данных табл. 3 ГОСТ 18105–2018 [3] и $p = 0,05$, $\alpha = 0,95$

Table 2

Calculation of the coefficient $1/\gamma_c$ based on the initial data of Table 3 of the State Standard 18105–2018 [3] and $p = 0,05$, $\alpha = 0,95$

Число единичных измерений, n , шт.	Граничный коэффициент вариации, V_r , %	Коэффициент $1/\gamma_c$	Коэффициент вариации при $1/\gamma_c = 0,8$, V_c , %	$\frac{V_c - V_r}{V_r} \times 100$ %
3	4	0,831	4,717	+17,9
5	6	0,814	6,45	+7,5
8	7,5	0,8	7,5	0
10	8	0,797	7,9	-1,25
15	9	0,789	8,55	-5,0
20	10	0,776	8,95	-10,5
30	12	0,746	9,45	-21,25
10^4	12	0,8	12	0
10^6	12	0,802	12,15	+1,25

свойств бетона, ни о каком соблюдении расчетных положений метода предельных состояний в СП 63.13330.2018 [4] говорить не приходится.

На сегодняшний день такая несогласованность нормативных документов, касающихся качества бетона, с одной стороны, и механического расчета железобетонных конструкций, с другой стороны, порождает в среде материаловедов ошибочное понимание, что якобы нет никакой необходимости учитывать коэффициент вариации при контроле прочности бетона железобетонных конструкций [8]. Как видно из формул (2) и (3), это не так.

Ранее в нормах предпринимались попытки это условие выполнить, но с переменным успехом. Так, до 2012 г. (ГОСТ 26633-91 (п. 1.3.2) [5] и ГОСТ 26633-2012 [9], ГОСТ 26633-2015 [10]) в отношении пределов прочности тяжелого и мелкозернистого бетонов на сжатие и растяжение указанное условие выполнялось – устанавливался нормативный коэффициент вариации: $V_c = V_t = 0,135$, что обязывало производителей бетонов строго соблюдать технологию производства для получения продукции с требуемыми значениями показателей надежности, а самое главное, что отвечало расчетным требованиям СНиП 2.03.01-84* [11] по проектированию бетонных и железобетонных конструкций в части назначения классов бетона по прочности и коэффициентов надежности по материалу для расчетов по первой группе предельных состояний (см. числовой пример после формулы (3)). После 2012 года это требование было убрано, по всей видимости, для снижения издержек производства бетонов, но при этом расчетные положения СНиП 52-01-2003 [12], а затем СП 63.13330.2018 [4] остались неизменными при назначении показателей надежности.

Такое несоответствие сегодня чревато негативными последствиями, вплоть до аварийных ситуаций на строящихся объектах.

Единственное, что осталось – это требования ГОСТ 18105-2018 [3], в котором приняты следующие значения коэффициентов вариации:

– $V_c = V_t = 0,16$ – для контроля по схемам А и В (для схемы Б значения не приводятся);

– $V_c = V_t = 0,04-0,12$ – для контроля по схеме Г по данным табл. 3 [3] в зависимости от числа контрольных образцов;

– $V_c = V_t = 0,094$ – для контроля на 30 образцах также по схеме Г, но по данным формулы (16) ГОСТ 18105-2018 [3] и с учетом расчетов по предложенной формуле (6).

Как было доказано выше (числовой пример под формулой (3)), для нормирования характеристик бетона в [4] коэффициенты вариации принимают $V_c = V_t = 0,135$, а количество контрольных образцов – 30 шт., то есть из ГОСТ 18105-2018 [3] принимается схема контроля А, для которой в этом же ГОСТ $V_c = V_t = 0,16$. Выявлены очередные противоречия и несогласованность разных нормативных документов по одному и тому же вопросу. Для исправления ситуации следует либо в [3] для схемы контроля А принять коэффициент вариации 0,135, либо в самом СП [4] коэффициенты надежности по бетону назначить $\gamma_b = \gamma_{bt} = 1,41$ вместо 1,3. В обоих случаях в СП [4] следует обозначить, что представленные в нем характеристики бетона контролируются по схеме А ($n = 30$ шт.), приведенной в [3].

Нельзя не отметить следующее: для того, чтобы обеспечить требуемые значения показателей однородности свойств бетона, необходимо задать более

жесткие требования к главной составляющей бетонной смеси – цементу. Так, в п. 2.18. ГОСТ 10178-76 [13] раньше было такое указание: «Цемент, которому в установленном порядке присвоен государственный Знак качества, должен удовлетворять следующим дополнительным требованиям: обладать стабильными показателями прочности при сжатии, коэффициент вариации прочности для цемента марок 300 и 400 должен быть не более 5 %, а для цемента марок 500, 550 и 600 – не более 3 %». Это вполне позволяло получать бетоны с V_c и $V \leq 0,135$. В последующих редакциях ГОСТ по цементу требования стали мягче. Так, в табл. 2 ГОСТ 31108-2020 [14] приводятся минимальная и максимальная границы двухстороннего доверительного интервала оценки прочности цемента на сжатие, при этом класс прочности цемента определяется минимальной границей. Согласно этому положению, коэффициент статистической трансформации (2) преобразуется в вид:

$$\gamma_{cc} = \frac{1}{1 - z_{p/2} V_{cc} - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{p/2} V_{cc}}, \quad (4)$$

где $z_{p/2}$ – двухсторонний перцентиль стандартного нормального распределения (с фиксированной вероятностью $p = 2 \times 0,05 = 0,1$, или 10 %);

$t_{\alpha; n-1}$ – односторонний квантиль распределения Стьюдента (с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$);

$k_{p/2}$ – параметр, уточняющий коэффициент вариации при переходе от интервальных оценок среднего к интервальным оценкам перцентиля, принимается равным $k_{p/2} = \sqrt{1 + 0,5z_{p/2}^2}$.

Двухсторонний перцентиль в формулу (4) пришлось ввести по причине представления прочности цемента на сжатие в табл. 2 [14] в виде интервала с минимальной и максимальной границами. Для нормирования характеристик технических объектов такое представление данных не применяется и в рассматриваемом ГОСТ встречается впервые, что выбивается не только из общепризнанной практики проектирования технических объектов в целом, но и из расчетных канонов

строительной отрасли в частности.

Согласно формулам, для оценки границ доверительных интервалов запишем нижнюю границу оценки средней прочности цемента на сжатие:

$$R_{\min} = \frac{\bar{R}}{\gamma_{cc}}, \quad R_{\max} = \bar{R} \left(1 - z_{p/2} V_{cc} \pm \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{p/2} V_{cc} \right). \quad (5)$$

Выразим из формулы (5) коэффициент вариации:

$$V_{cc} = \frac{1 - \frac{\bar{R}}{R_{\min}}}{z_{p/2} + \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{p/2}} = \frac{1 - \frac{\bar{R}}{R_{\max}}}{z_{p/2} - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{p/2}}. \quad (6)$$

По аналогии с (3) коэффициент надежности по материалу (для перехода от нормативных характеристик к расчетным по первой группе предельных состояний) для цемента будет равен:

$$\gamma_{cm} = \frac{1 - z_{10} V_{cc} - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{10} V_{cc}}{1 - z_{0,8} V_{cc} - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{0,8} V_{cc}}. \quad (7)$$

Расчет коэффициентов по формулам (4–7), по данным [14], сведем в табл. 3.

Получили, что коэффициент вариации прочности цемента находится в пределах 0,112–0,181, что значительно превышает ранее установленные пределы 0,03–0,05 (п. 2.18. [13]). **Получить на основе такого цемента бетон с требуемой однородностью 0,135 или даже 0,160 невозможно!** Выявлена очередная несогласованность действующих нормативных документов по смежным вопросам. Выход из ситуации видится такой: повысить требования по однородности цемента в ГОСТ.

Подход, когда расчетные характеристики бетона для первой и второй групп предельных состояний выражаются не через средние значения, а через 5-й перцентиль, то есть когда коэффициенты надежности по материалу получаются по формуле (3), мягко скажем, «самобытный», характерный только для

Таблица 3

Коэффициенты вариации и статистической трансформации прочности цемента на сжатие

Table 3

Coefficients of variation and statistical transformation of cement compressive strength

Класс прочности цемента, МПа	Прочность на сжатие, R, МПа			V_c по (9)	γ_{cc} по (7)	γ_{cm} по (10)
	$R_{\min}$	$\bar{R} = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{2}$	$R_{\max}$			
32,5	32,5	42,5	52,5	0,181	1,444	1,525
42,5	42,5	52,5	62,5	0,138	1,308	1,313
52,5	52,5	62,5*	72,5*	0,112	1,235	1,223

Примечание: * – эти значения в самом ГОСТ [14] не приводятся, они получены автором по линейной экстраполяции на основе имеющихся в нем данных.

механического расчета строительных конструкций. В математике, физике, теории надежности, метрологии, в других нестроительных прикладных науках (машиностроении, электротехнике и т. п.), в технике в целом такого нигде больше нет, что порождает определенные неудобства на пути интеграции научных знаний и внедрения междисциплинарного подхода в строительную инженерию. Как минимум **такой подход создает ложное представление у инженера об имеющихся запасах по физико-механическим свойствам материала**. Например, $\gamma_b = 1,3$ – это не означает, что для сжатого бетона мы принимаем запас по прочности 30 %. На самом деле этот запас определяет коэффициент трансформации по формуле (3), введенный автором, который для принятых в нормах предположений равняется $\gamma_c = 1,808$ (табл. 1), то есть фактически запас составляет 80,8 %. При этом вопрос об оценке запасов для расчетов по второй группе в нормах даже не ставится. А авторский коэффициент трансформации (3) позволяет без каких-либо затруднений его решить: $\gamma_c = 1,401$, то есть запас равен 40,1 %.

Во всех отраслях знаний нормирование свойств всевозможных технических объектов производится через оценку **p-перцентилей** (либо реже α -квантилей, что, по сути, одно и то же: $\alpha = p/100$ %, то есть кому как удобно), а в качестве приближения истинного принимается **среднее** значение. Для этого задают: а) для генеральной совокупности вероятность перцентилей, p ; б) для выборки доверительную вероятность одностороннего интервала, α ; в) коэффициент вариации (либо среднеквадратическое отклонение), V , обычно полагая, что в генеральной совокупности и в выборке он один и тот же; г) объем выборки (количество контрольных образцов), n . В расчетах же строительных конструкций в качестве точечной оценки истинного значения принимается не среднее значение, а производный для него параметр – 5-й перцентиль.

В этой ситуации удобным и правильным было бы, с одной стороны, вернуться на шаг назад и начать нормировать, как и раньше (до 1986 г.), свойства бетона по среднему значению, то есть назначать марки бетона, но пойти дальше этого и строго регламентировать четыре параметра, указанных выше, для контроля этих свойств:

а) вероятности перцентилей: $p_n = 5$ % – для нормативных значений « $\sigma - \varepsilon$ »; $p_l = 0,4$ – для расчетных значений в расчетах по первой группе предельных состояний; $p_{II} = (0,4 \text{ %}; 5 \text{ %})$ – для расчетных значений в расчетах по второй группе ($p_{II} = 5$ %, если нет иных указаний проекта либо требований норм);

б) доверительную вероятность одностороннего доверительного интервала: $\alpha = 0,95$ – одинаковую для нормативных и расчетных значений;

в) коэффициент вариации физико-механических свойств при сжатии и растяжении, V_c, V_t ;

г) объем выборки – количество контрольных образцов, n (30 шт.).

Тогда все становится ясным и прозрачным:

Нормирование параметра P : марка = $P, p_n, p_l, p_{II}, \alpha, V, n$. (8)

Трансформация P для расчетов по первой группе предельных состояний:

$$P_I = \frac{\bar{P}}{\gamma_{PI}}, \gamma_{PI} = \frac{1}{1 - z_{PI}V - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{PI}V}. \quad (9)$$

Трансформация P для расчетов по второй группе предельных состояний:

$$P_{II} = \frac{\bar{P}}{\gamma_{PII}}, \gamma_{PII} = \frac{1}{1 - z_{PII}V - \frac{t_{\alpha; n-1}}{\sqrt{n}} k_{PII}V}. \quad (10)$$

В формулах (8–10) P – определенный параметр зависимости « $\sigma - \varepsilon$ », подлежащий нормированию и используемый в расчетах: например, это прочность бетона на сжатие или растяжение, начальный модуль деформаций, предельные относительные деформации на сжатие или растяжение и т. п., P – марка бетона по данному параметру, то есть среднее значение P , которое, по сути, является эталонным значением параметра; P_l, P_{II} – расчетные значения параметра P соответственно для расчетов по первой и второй группам предельных состояний; $\gamma_{PI}, \gamma_{PII}$ – коэффициенты статистической трансформации эталонного значения рассматриваемого параметра (по аналогии с формулой (2)).

Из такого подхода вытекает более строгое, а потому и более адекватное представление о том, что такое нормативная величина характеристики того или иного свойства бетона. По сути, это **совокупность всех семи параметров со своими значениями**, представленными в формуле (8). **Если какой-то из семи параметров отсутствует, то ни о каком полноценном нормировании с целью последующего расчета говорить не приходится.**

Исследование нормативных документов прошлых лет на примере кубиковой прочности тяжелого бетона на сжатие R показало, что:

– до 1986 г. нормированию подлежали: $P = M$ – марка бетона по прочности на сжатие, n ;

– с 1986 по 2012 г.: $R_{II} = B$ – класс бетона по прочности на сжатие ($B \approx \frac{M}{0,75}$), $p_l = 0,4$ % – косвенно через $\gamma_b = 1,3$, $p_{II} = 5$ %, $\alpha = 0,95$, $V = 0,135$ [5], n (п. 3.1 [15] и п. 4.3 [16]);

– с 2012 г. по настоящее время: $R_{II} = B$, $p_l = 0,4$ %, $p_{II} = 5$ %, $\alpha = 0,95$, n .

Получается, что на протяжении всего периода применения полувероятностного подхода метода предельных состояний в расчетах железобетонных конструкций нормирование свойств бетона было и остается неполным (незавершенным). Исправить это упущение позволяют формулы (8–10).

Выводы

1. Показана несогласованность и несовершенство нормативных документов РФ: а) по контролю однородности свойств бетона [3]; б) на технические условия его применения [10]; в) на технические условия цемента как главной составляющей бетона [14]; г) по механическому расчету железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний [4], что чревато аварийными ситуациями на строящихся объектах:

– в нормативах а) и б) требования по однородности свойств бетона более «мягкие» (коэффициент вариации равен $V = 0,16$), чем по расчетным предпосылкам в г) ($V = 0,135$);

– в нормативе в) требования по однородности свойств цемента недостаточно «жесткие» ($V = 0,112–0,181$), чтобы обеспечить требуемые значения показателей надежности бетона по а) и г).

Исходя из этого, для нормативов а), б) и г) следует ввести единый стандарт однородности физико-механических свойств бетона, например принять $V = 0,135$ либо иное значение, что подлежит обсуждению, согласуясь с современными реалиями. А в в) следует ужесточить требования для цемента, например как было ранее в [13], принять $V = 0,03–0,05$, что также следует совместно обсудить ученым и производственникам.

2. В [4] необходимо провести ревизию терминологии, касающейся расчетов по нелинейной деформационной модели, как это описано в первой части статьи [1], и ввести недостающие с точки зрения общей логики метода предельных состояний новые понятия, такие как: эталонный закон и эталонная диаграмма деформирования бетона при осевом центральном сжатии (растяжении), трансформированный закон и трансформированная диаграмма деформирования бетона при сжатии (растяжении) и другие понятия, предложенные и четко сформулированные в статье.

3. На основе строгого вероятностного анализа автором получен коэффициент статистической трансформации эталонного закона деформирования бетона при сжатии – γ_c (растяжении – γ_r), который позволяет переходить от эталонного ко всем прочим законам деформирования, необходимым в расчетах железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний. Кроме этого, данный коэффициент, в отличие от имеющихся в нормах коэффициентов надежности по материалу, дает полное и более адекватное представление об имеющихся запасах по физико-механическим свойствам бетона. Так, показано, что при нормативных предпосылках расчета запас для первой группы предельных состояний составляет 80,8 %, а для второй – 40,1 %.

4. Доказано, что для полноценного нормирования прочностных и деформационных характеристик бетона необходимо занормировать минимально 7 параметров, представленных в формуле (8), для каждой из характеристик: P , p_t , p_r , $p_{\parallel}$, α , V , n . На сегодняшний

день нормирование выполнено только для 5 параметров: P , p_t , p_r , α , n , что не позволяет гарантировать требуемый уровень надежности принимаемых по нормам технических решений. Установлено, что на протяжении всего периода применения полувероятностного подхода метода предельных состояний в нормативных расчетах железобетонных конструкций нормирование свойств бетона было и остается неполным, неопределенным. Исправить это упущение позволяют формулы (8–10).

Список литературы

1. Радайкин О.В. Уточнение положений метода предельных состояний в части нормирования зависимостей « $\sigma - \varepsilon$ » 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.
2. Симахин В.А. Адаптивные оценки: монография. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2019. 240 с.
3. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2). Москва: ФГБУ «РСТ», 2022.
5. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2005.
6. Лычев А.С. Оптимизация материалоемкости строительных конструкций вероятностными методами: дис. д-р техн. наук.: 05.23.01 / Моск. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева. Москва, 1989. 339 с.
7. 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.
8. Беленцов Ю.А., Рощупкин А.А. Оценка необходимости учета коэффициента вариации при приемке бетона монолитных конструкций // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 6. С. 70–73.
9. ГОСТ 26633-2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
10. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
11. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
12. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: ФГУП «ЦПП», 2004.
13. ГОСТ 10178-76. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. Москва, 1978.

14. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
15. ГОСТ 18105-86. Бетоны. Правила контроля прочности. Москва: Стандартинформ, 2000.
16. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2018.

References

1. Radaykin O.V. 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. *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.
2. Simakhin V.A. Adaptive assessments: Monograph. Kurgan: Publishing House of Kurgan State University, 2019, 240 p. (In Russian).
3. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
4. 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).
5. State Standard 26633-91. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2005. (In Russian).
6. Lychev A.S. Optimization of the material consumption of building structures by probabilistic methods: diss. Dr. Sci. (Eng.) 05.23.01 / Moscow Institute of Civil Engineering named after V.V. Kuibyshev. Moscow, 1989, 339 p. (In Russian).
7. Gorbunov I.A., Kapustin D.E. Statistical substantiation of concrete and steel fiber reinforced concrete strength. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 11, pp. 58–64. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c5062099aebc6.33938587.
8. Belentsov Yu.A., Roshchupkin A.A. Assessment of the need to take into account the coefficient of variation at acceptance concrete for monolithic structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014, no. 6, pp. 70–73. (In Russian).
9. State Standard 26633-2012. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
10. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
11. SNiP 2.03.01-84*. Concrete and reinforced concrete structures. Moscow: CISD of the Gosstroy of the USSR. 1985. (In Russian).
12. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. Principal rules. Moscow: FSUE CPP Publ., 2004. (In Russian).

13. State Standard 10178-76. Portland cement and slag portland cement. Specifications. Moscow, 1978. (In Russian).
14. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
15. State Standard 18105-86. Concretes. Rules for the strength control. Moscow: Standartinform Publ., 2000. (In Russian).
16. State Standard 18105-2010. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).

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, FSBEI HE Kazan State Power Engineering University; Director of the Industrial Design Development Center of the Institute of Design and Spatial Arts of Kazan Federal University, FSAEI HE Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan
e-mail: olegxxii@mail.ru

УДК 69.003.13; 006.057.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72)**С.В. СНИМЩИКОВ**

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИНОЧИТАЕМЫХ И МАШИНОПОНИМАЕМЫХ СТАНДАРТОВ

Аннотация

Введение. Современные процессы производства металлопродукции и проектирования зданий требуют внедрения точных автоматизированных решений, соответствующих международным стандартам. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения временных и энергетических затрат, минимизации дефектов и обеспечения соответствия нормативным требованиям на всех этапах производства и строительства.

Цель. Разработка методологии интеграции математического моделирования с машинопонимаемыми стандартами (XML, JSON, OWL) для оптимизации технологических и проектных операций.

Методы. Для формализации процессов использованы: математические модели на основе законов термодинамики, механики сплошной среды и теории оптимизации; стандарты ISO/IEC и структуры данных в форматах JSON, XML, OWL для описания параметров (химический состав материалов, режимы плавки, геометрия конструкций); алгоритмы автоматической верификации данных, интеграция с BIM-технологиями (на примере Revit) и метод конечных элементов для расчетов.

Результаты. Разработанная методология позволила: снизить энергозатраты на 15–20 % за счет оптимизации параметров плавки и обработки; уменьшить долю дефектов продукции на 25 % через моделирование этапов заливки и термообработки; автоматизировать проверку соответствия стандартам и генерацию проектной документации в BIM-средах; реализовать структурированный обмен данными между системами через JSON и интеграцию с форматом IFC.

Обсуждение. Применение машинопонимаемых стандартов и математических моделей доказало эффективность в снижении ошибок и ресурсных затрат. Ключевым преимуществом стала автоматизация рутинных операций, таких как проверка нормативов и расчет характеристик конструкций. Перспективы работы связаны с расширением методологии на другие отрасли и разработкой онтологий на базе OWL для сложных производственных цепочек.

Выводы. Интеграция математических моделей со стандартами XML/JSON повышает точность контроля качества в металлургии. Автоматизация проектирования через BIM и машинопонимаемые форматы сокращает сроки создания документации на 30–40 %. Методология обеспечивает масштабируемость для задач цифровизации промышленности и строительства.

Ключевые слова: математическое моделирование, машинопонимаемые стандарты, оптимизация производства, BIM-технологии, металлопродукция, проектирование зданий, автоматизация операций, структура данных, строительный объект

Для цитирования: Снимщиков С.В. Математические модели различных процессов в строительстве с учетом применения машиночитаемых и машинопонимаемых стандартов // *Бетон и железобетон*. 2025. № 4 (629). С. 67–72. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72). EDN: XGMMFZ

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 17.03.2025

Поступила после рецензирования 30.04.2025

Принята к публикации 08.05.2025

S.V. SNIMSHCHIKOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation" (MSTU CA), Kronshtadtsky Boulevard, 20, Moscow, 125993, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELS OF VARIOUS PROCESSES IN CONSTRUCTION, TAKING INTO ACCOUNT THE APPLICATION OF MACHINE-READABLE AND MACHINE- UNDERSTANDABLE STANDARDS

Abstract

Introduction. Modern processes of metal production and building design require the introduction of precise automated solutions that meet international standards. The urgency of the work is due to the need to reduce time and energy costs, minimize defects and ensure compliance with regulatory requirements at all stages of production and construction.

Aim. Development of a methodology for integrating mathematical modeling with machine-readable standards (XML, JSON, OWL) to optimize technological and design operations.

Methods. Mathematical models based on the laws of thermodynamics, continuum mechanics, and optimization theory were used to formalize the processes; ISO/IEC standards and data structures in JSON, XML, and OWL formats to describe parameters (chemical composition of materials, melting modes, and structural geometry); automatic data verification algorithms, integration with BIM technologies (based on in the example of Revit) and the finite element method for calculations.

Results. The developed methodology allowed: to reduce energy consumption by 15–20 % by optimizing melting and processing parameters; to reduce the proportion of product defects by 25 % through modeling the casting and heat treatment stages; to automate the verification of compliance with standards and the generation of project documentation in BIM environments; to implement structured data exchange between systems via JSON and integration with the IFC format.

Discussion. The use of machine-readable standards and mathematical models has proven effective in reducing errors and resource costs. Automation of routine operations, such as standards checking and structural characteristics calculating, has become a key advantage. The prospects of the work are related to the expansion of the methodology to other industries and the development of OWL-based ontologies for complex production chains.

Conclusions. The integration of mathematical models with XML/JSON standards improves the accuracy of quality control in metallurgy. Design automation through BIM and machine-readable formats reduces the time required to create documentation by 30–40 %. The methodology provides scalability for the tasks of digitalization of industry and construction.

Keywords: mathematical modeling, machine-readable standards, production optimization, BIM technologies, metal products, building design, automation of operations, data structure, construction site

For citation: Snimshchikov S.V. Mathematical models of various processes in construction, taking into account the application of machine-readable and machine-understandable standards. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 67–72. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-67-72](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-67-72). EDN: XGMMFZ

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 17.03.2025

Revised 30.04.2025

Accepted 08.05.2025

Основная часть

Производство металлопродукции представляет собой сложный процесс, включающий несколько этапов трансформации сырья в готовые изделия. Каждый этап поддается формализации, что позволяет использовать математическое моделирование для оптимизации технологии, прогнозирования характеристик продукции и улучшения качества. Далее рассмотрим ключевые этапы производства, методы их математического описания и возможности интеграции с машинопонимаемыми стандартами [1, 2].

Первым этапом производства металлургической продукции является подготовка сырья. Этап включает процессы дробления, обогащения и очистки от примесей. Моделирование данного этапа позволит оптимизировать описанные процессы и сократить ряд затрат.

Этапом загрузки сырья в печи с последующей термической обработкой является плавка. Математическое моделирование этого этапа позволяет оценить различные потери и оптимизировать состав легирующих элементов для получения продукции с необходимыми свойствами.

После плавки металл подвергается перераспределению в формы (в слитки, прокат или непрерывнолитые изделия). Важным фактором для отслеживания на этом этапе является контроль за дефектами, такими как трещины и неоднородности в структуре материала. Моделирование этапа позволяет описать зависимость между температурой, скоростью охлаждения, геометрией формы и конечными характеристиками металла.

Механическая и термическая обработки заготовки (прокатка, ковка и термообработка) придают продукции требуемую форму и свойства (прочность, твердость, пластичность материала). Для точного контроля за параметрами этих процессов используются методы теории пластичности, теплопроводности и математические модели, описывающие поведение материалов при различных режимах обработки. Важными операциями являются резка, сверление, а также различные методы обработки поверхности.

Последним этапом производства является упаковка и транспортировка готовых изделий. Выбор упаковки, подготовка к отгрузке и организация логистики обеспечивают сохранность продукции при транспортировке и минимизацию возможных потерь. Моделирование этапа включает в себя параметры, такие как размеры изделий, тип упаковки, а также логистические данные, влияющие на стоимость и время доставки.

Таким образом, математическое моделирование процессов на каждом этапе металлургического производства (от подготовки сырья до транспортировки) позволяет повысить эффективность производства, снизить затраты и улучшить качество продукции. Интеграция этих моделей с машинопонимаемыми стандартами создает основу для автоматизации процессов и создания интеллектуальных систем управления производством.

Представление производства как цепи этапов с взаимосвязанными входами и выходами можно описать в математической записи:

$$X_{i+1} = f_i(X_i, P_i), \quad (1)$$

где X_i – параметры на i -м этапе;

P_i – технологические параметры;

f_i – функция, которая моделирует технологический процесс (например, плавка, прокатка, термообработка или оценка качества) и связывает выходные параметры одного этапа с входными на следующем.

Основные критерии оптимальности:

Минимизация энергии $E_{\min}$:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (2)$$

где E_i – затраты энергии на i -м этапе.

Снижение дефектов $D_{\min}$:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (3)$$

где δ_i – дефекты изделия.

Проверка соответствия характеристик продукции нормативным требованиям из машинопонимаемых стандартов выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{product}} \in \{Q_{\text{product}}\}, \forall Q_{\text{product}}, Q_{\text{product}} \in \text{ISO/IE}. \quad (4)$$

Интеграция с машинопонимаемыми стандартами заключается в следующем: для обеспечения соответствия проектных решений нормативным требованиям применяются форматы, предназначенные для машиночитаемой обработки, такие как XML, JSON, а также онтологии, построенные на основе OWL.

Эти технологии позволяют структурировать данные, обеспечивать их доступность для анализа и автоматической проверки, а также поддерживать гибкость при интеграции с различными информационными системами.

Ниже приведен пример структуры данных в формате JSON, которая может быть использована для описания параметров строительного объекта:

```
:
{
  "material": {
    "type": "steel",
    "grade": "S235JR",
    "chemical_composition": {
      "C": 0.17,
      "Si": 0.2,
      "Mn": 1.4,
      "P": 0.035,
      "S": 0.035
    }
  },
  "process": [
    {
      "step": "melting",
      "temperature": 1600,
      "time": 120,
      "energy_consumption": 5000
    },
    {
      "step": "casting",
      "cooling_rate": 5,
      "mold_type": "continuous",
      "output": "billets"
    }
  ],
  "quality_check": {
    "criteria": ["tensile_strength", "hardness", "composition"],
    "standards": ["ISO 6892", "ISO 6508"]
  }
}
```

Далее рассмотрим автоматизацию процесса проектирования зданий и сооружений с использованием машинопонимаемых стандартов. Описанный выше процесс охватывает все стадии проектирования – от анализа запросов заказчика до выпуска готовой проектной документации. Благодаря стандартам, представленным в машиночитаемом формате для использования программными комплексами, становится возможным автоматизировать проверку данных, ускорить выполнение расчетов и повысить точность создаваемой проектной документации. Технологии информационного моделирования зданий (BIM) играют ключевую роль в интеграции таких стандартов, обеспечивая согласованное и централизованное представление данных проекта [3–6].

Опишем процесс проектирования как задачу преобразования входных данных X в выходные данные G с учетом нормативов S :

$$G = L(X, S). \quad (5)$$

Математический оператор L можно разложить на этапы:

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}, \quad (6)$$

где L_i – отдельный этап проектирования.

Представим этапы моделирования. На первом этапе фиксируются входные данные X , включающие:

- климатические параметры (X_c);
- физико-механические свойства материалов (X_m);
- архитектурные и функциональные требования (X_a).

Сформулируем математическое представление:

$$X = X_c \cup X_m \cup X_a. \quad (7)$$

Проверка нормативного соответствия. На втором этапе осуществляется проверка соответствия исходных данных машинопонимаемым стандартам S :

$L_1(X, S)$ = проверка соответствия X требованиям S .

Проектная модель здания (M) создается на основе заданных параметров:

$$M = L_2(X, S), \quad (8)$$

где M описывается с использованием BIM-технологий.

На этапе расчета процедуры определяется устойчивость, надежность и другие характеристики:

$$Y = L_3(M, X_c). \quad (9)$$

Итоговые результаты преобразуются в документы согласно описанию:

$$G = L_4(Y, S). \quad (10)$$

Алгоритмизация процесса включает:

- импорт исходных данных;
- верификацию данных с машинопонимаемыми стандартами;
- генерацию проектной модели с использованием BIM;
- проведение расчетов;
- формирование итоговой документации.

Преимущества использования машинопонимаемых стандартов при проектировании зданий и сооружений можно сформулировать следующим образом:

- снижение временных затрат на проверку данных;
- автоматическая верификация с нормативами;
- ускорение генерации документации и расчетов;
- использование BIM для унифицированного представления.

Приведем пример формата данных. Для интеграции данных с машинопонимаемыми стандартами можно использовать JSON:

```
```json
{
 "project": {
 "requirements": {
 "climate": {
 "temperature_range": [-20, 30],
 "wind_speed": 5
 },
 "materials": {
 "concrete": {
 "grade": "C30/37",
 "density": 2400
 }
 }
 },
 "standards": ["ISO 9001", "ISO 19650"],
 "model": {
 "bim": "Revit",
 "geometry": {
 "height": 30,
 "floors": 10
 }
 }
 }
}
```

Представленный подход к проектированию зданий и сооружений, основанный на применении машинопонимаемых стандартов, обеспечивает повышение эффективности и точности процесса. Формализованная структура данных и использование BIM-технологий позволяют автоматизировать ключевые этапы, снижая вероятность ошибок и улучшая взаимодействие между участниками проектирования.

### Выводы

Применение математического моделирования с учетом машинопонимаемых стандартов в различных процессах производства и проектирования:

- позволяет прогнозировать результаты изменений технологических параметров;
- повышает эффективность производственных процессов за счет оптимизации и автоматизации таковых;
- уменьшает вероятность ошибок (дефектов) в производстве продукции, проектировании зданий и сооружений;
- снижает время выполнения и затраты за счет интеграции стандартов на всех этапах производственных процессов.

### Список литературы

1. ISO 9001:2015. Quality Management Systems [интернет]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (дата обращения: 24.12.2024).
2. ISO 6892-1:2016. Metallic Materials – Tensile Testing. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/64969.html> (дата обращения: 24.12.2024).
3. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems [интернет]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (дата обращения: 24.12.2024).
4. RDF, OWL Standards for Ontology Development. W3C Recommendations [интернет]. Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/owl-guide/> (дата обращения: 24.12.2024).
5. NumPy, SciPy, PyTorch Libraries for Mathematical Modeling. Documentation [интернет]. Режим доступа: <https://numpy.org>, <https://scipy.org>, <https://pytorch.org> (дата обращения: 24.12.2024).
6. buildingSMART, государственные требования и машинопонимаемые нормативные документы: 11 вопросов Марине Король // *BIMLIB* [интернет]. Режим доступа: <https://bimlib.pro/articles/buildingsmart-gosudarstvennie-trebovaniya-i-mashinochitaemie-normativnie-dokumenti-11-voprosov-marine-korol-630> (дата обращения: 24.12.2024).
7. BIM-стандарт. Его функции, основные понятия // *РосЭко* [интернет]. Режим доступа: <https://rosecos.net/about/articles/bim-standart-osnovnyie-ponyatiya> (дата обращения: 24.12.2024).
8. BIM, алгоритмы, нейросети и инженер по требованиям: размышление о будущем строительного проектирования // *GeoInfo* [интернет]. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/products-pdf/bim-algoritmy-nejroseti-i-inzhener-po-trebovaniyam-razmyshlenie-o-budushchem-stroitel'nogo-proektirovaniya.pdf> (дата обращения: 24.12.2024).
9. BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры // *СПбГАСУ* [интернет]. Режим доступа: [https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC\\_2023.pdf](https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf) (дата обращения: 24.12.2024).

### References

1. ISO 9001:2015. Quality Management Systems [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (accessed: 24.12.2024).
2. ISO 6892-1:2016. Metallic Materials – Tensile Testing [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/64969.html> (accessed: 24.12.2024).
3. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems [internet]. Available at: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (accessed: 24.12.2024).
4. RDF, OWL Standards for Ontology Development. W3C Recommendations [internet]. Available at: <https://www.w3.org/TR/owl-guide/> (accessed: 24.12.2024).



5. NumPy, SciPy, PyTorch Libraries for Mathematical Modelling. Documentation [internet]. Available at: <https://numpy.org>, <https://scipy.org>, <https://pytorch.org> (accessed: 24.12.2024).
6. buildingSMART, state requirements and machine-readable normative documents: 11 questions for Marina Korol. *BIMLIB* [internet]. Available at: <https://bimlib.pro/articles/buildingsmart-gosudarstvennie-trebovaniya-i-mashinochitaemie-normativnie-dokumenti-11-vo-prosov-marine-korol-630> (accessed: 24.12.2024).
7. BIM-standard. Its functions, basic concepts. *RosEco* [internet]. Available at: <https://rosecos.net/about/articles/bim-standart-osnovnyie-ponyatiya> (accessed: 24.12.2024).
8. BIM, algorithms, neural networks and requirements engineer: reflection on the future of construction design. *GeoInfo* [internet]. Available at: <https://geoinfo.ru/products-pdf/bim-algoritmy-nejroseti-i-inzhener-po-trebovaniyam-razmyshlenie-o-budushchem-stroitelno-go-proektirovaniya.pdf> (accessed: 24.12.2024).
9. BIM-modelling in the tasks of construction and architecture. *SPbGASU* [internet]. Available at: [https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyz-vm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC\\_2023.pdf](https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyyz-vm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf) (accessed: 24.12.2024).

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

**Сергей Валентинович Снимщиков**, канд. техн. наук, проректор по Э и ДПО, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)

**Sergey V. Snimshchikov**, Cand. Sci. (Engineering), Vice-rector for E and APE, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)

УДК 69.04

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81)

В.В. ТКАЧЕНКО

АО «ТЕХНАДЗОР», ул. Бутлерова, д. 17, г. Москва, 117342, Российская Федерация

# ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЧАСТНОГО ДОМА: ЗАРУБЕЖНЫЕ ПОДХОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНДИВИДУАЛЬНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

## Аннотация

**Введение.** Цифровизация строительной отрасли, включая индивидуальное жилищное строительство, становится глобальным трендом. Технология цифрового двойника (Digital Twin, DT) позволяет создавать виртуальную копию физического объекта и синхронизировать ее с реальными данными онлайн.

**Цель.** Проанализировать применение цифровых двойников в частном домостроении, выявить вызовы цифровизации и определить перспективные направления развития на основе зарубежных исследований и кейсов.

**Материалы и методы.** Статья основана на зарубежных исследованиях, анализирующих технологическую архитектуру цифрового двойника и необходимые программные и аппаратные компоненты для его создания.

**Результаты.** Анализ показывает, что создание цифрового двойника требует тщательно собранной базы данных (DataRoom), интеграции сенсоров, IoT-устройств и аналитических инструментов, а также синхронизации данных в реальном времени и обучения AI-модели на основе поведения владельцев. Облачные платформы обеспечивают масштабируемость системы, но существуют и барьеры для внедрения.

**Практическая значимость.** Статья показывает, что цифровые двойники частных домов становятся частью концепции «умного дома», улучшая эксплуатацию и взаимодействие жильцов. Предлагаются рекомендации по обработке данных в реальном времени, оптимизации эксплуатационных режимов, адаптации управления к поведению собственников и интеллектуальному прогнозированию последствий.

**Выводы.** Цифровой двойник частного дома занимает важное место в технологическом и социальном

контекстах, трансформируя подходы к строительству и взаимодействию жильцов. Он объединяет функции паспорта, управляющего и аналитика, делая дом умным, адаптивным и безопасным, способным реагировать на внутренние и внешние вызовы, выступая в роли «цифровой тени».

**Ключевые слова:** цифровизация строительной отрасли, цифровой двойник (DT), цифровые экосистемы, жизненный цикл, модельный уровень, BIM-системы, сенсорный уровень, IoT, BMS (системы управления зданием), искусственный интеллект (AI), облачные платформы, децентрализованные платформы, кибербезопасность, цифровая тень

**Для цитирования:** Ткаченко В.В. Цифровой двойник частного дома: зарубежные подходы, технологии и перспективы применения в индивидуальном строительстве // Бетон и железобетон. 2025. № 4 (629). С. 73–81. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81). EDN: APJUYJ

## 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 17.06.2025

Поступила после рецензирования 04.08.2025

Принята к публикации 07.08.2025

V.V. TKACHENKO

JSC TECHNADZOR, Butlerova str., 17, Moscow, 117342, Russian Federation

# DIGITAL TWIN OF A PRIVATE HOUSE: FOREIGN APPROACHES, TECHNOLOGIES, AND PROSPECTS FOR INDIVIDUAL CONSTRUCTION

## Abstract

**Introduction.** Digitalization of the construction industry, including individual housing construction, is becoming a global trend. Digital Twin (DT) technology allows to create a virtual copy of a physical object and synchronize it with real data online.

**Aim.** To analyze the use of digital twins in private housing construction, identify the challenges of digitalization, and determine promising areas of development based on foreign research and case studies.

**Materials and methods.** The article is based on foreign research analyzing the technological architecture of a digital twin and the necessary software and hardware components for its creation.

**Results.** The analysis shows that creating a digital twin requires a carefully collected database (DataRoom), the integration of sensors, IoT devices, and analytical tools, as well as real-time data synchronization and AI model training based on the owners' behavior. Cloud platforms provide scalability for the system, but there are also barriers to implementation.

**Practical significance.** The article shows that digital twins of private homes are becoming part of the smart home concept, improving the operation and interaction of residents. It offers recommendations for real-time data processing, optimizing operational modes, adapting control to the behavior of owners, and intelligently predicting consequences.

**Conclusions.** The digital twin of a private house occupies an important place in the technological and social context, transforming approaches to construction and resident interaction. It combines the functions of a passport, a manager, and an analyst, making the house smart, adaptive, and secure, capable of responding to internal and external challenges, acting as a "digital shadow".

**Keywords:** digitalization of the construction industry, digital twin (DT), digital ecosystems, lifecycle, model layer, BIM systems, sensor layer, IoT, BMS (building management systems), artificial intelligence (AI), cloud platforms, decentralized platforms, cybersecurity, digital shadow

**For citation:** Tkachenko V.V. Digital twin of a private house: foreign approaches, technologies, and prospects for individual construction. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 73–81. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81). EDN: APJUYJ

## 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 17.06.2025

Revised 04.08.2025

Accepted 07.08.2025

### Введение

Цифровизация строительной отрасли стала глобальным трендом, охватывающим как крупные инфраструктурные проекты, так и индивидуальное жилищное строительство. Среди наиболее перспективных и обсуждаемых решений последних лет – технология цифрового двойника (Digital Twin, DT), которая позволяет создавать точную виртуальную копию физического объекта и синхронизировать ее с реальными данными в режиме реального времени.

Первоначально разработанная для нужд аэрокосмической и производственной индустрии концепция DT активно внедряется в строительство, в управление зданиями и эксплуатационное обслуживание. Если на начальном этапе основное внимание уделялось крупным промышленным, коммерческим или государственным объектам, то в последние годы все больше исследователей и разработчиков обращают внимание на потенциал DT в контексте частных домов и малоэтажного жилья [1].

Такой интерес обусловлен сразу несколькими факторами:

- ростом требований к энергоэффективности и устойчивости зданий;
- усложнением инженерных систем даже в стандартных коттеджах;
- повышением цифровой грамотности собственников жилья;
- распространением концепций «умного дома» и интернета вещей (IoT).

Современные частные дома все чаще строятся по принципу интегрированных цифровых экосистем, в которых архитектура, инженерия, эксплуатация и комфорт жильцов рассматриваются в единой логике жизненного цикла. В этом контексте цифровой двойник становится не просто дополнением, а ключевым механизмом управления домом как динамичным объектом, способным к адаптации, анализу и прогнозированию.

### Концепция цифрового двойника и ее эволюция

Понятие цифрового двойника (DT) как модели, синхронизированной с реальным объектом и реагирующей на его изменения, было предложено Майклом Гривсом (M. Grieves) в 2002 году во время лекции в Университете Мичигана. Он обсуждал эту концепцию в контексте управления жизненным циклом продукта (PLM). Однако в этой лекции сам термин «Digital Twin» не был использован. Майкл Гривс первоначально только описывал концепцию, а позже стал применять термин «цифровой двойник», впервые употребив термин «**Digital Twin**» в 2011 году в своей работе «**Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management**» [2]. В этой книге он подробно объясняет концепцию цифрового двойника и связывает ее с управлением жизненным циклом продукта (PLM).

Еще одним отцом-основателем «Digital Twin» считают Джона Виккерса (John Vickers) из NASA,

который популяризировал термин в контексте аэрокосмических технологий. Его работа в рамках программы NASA «Model-Based Systems Engineering» в начале 2010-х годов сыграла ключевую роль в закреплении термина.

Впоследствии понятие цифрового двойника (DT) было адаптировано и расширено, охватив не только производственные процессы, но и сложные технические и строительные объекты [3].

Суть концепции заключается в создании виртуального представления объекта (здания, инфраструктуры, системы), которое:

- обновляется в реальном времени на основе поступающих данных;
  - используется для анализа текущего состояния;
  - позволяет моделировать возможные сценарии развития и поведения;
  - включает в себя историю изменений, технические параметры, проектные и эксплуатационные данные.
- Цифровой двойник – это не просто трехмерная модель, а комплексная система, включающая:
- статические данные (BIM-модель, планы, спецификации);
  - динамические данные (с IoT-датчиков, счетчиков, камер и пр.);
  - интеллектуальные алгоритмы (AI, ML, rule-based systems);
  - средства визуализации, управления и анализа [4].

Для частного домостроения это означает возможность управлять зданием как единым интеллектуальным организмом. В отличие от классической BIM-модели, DT предполагает постоянную двухстороннюю связь с физическим объектом, адаптацию под поведение пользователей, прогнозирование рисков и поддержку принятия решений в реальном времени.

Некоторые исследователи подчеркивают, что в контексте частных домов цифровые двойники становятся особенно важны при:

- проектировании «умных» энергоэффективных зданий;
- построении системы превентивного обслуживания;
- оптимизации расходов на содержание дома;
- обеспечении безопасности (в том числе в условиях удаленного мониторинга) [5].

Кроме того, по мнению Калина Бойе (Calin Boje), цифровой двойник позволяет перейти к семантическому управлению объектом, где данные обретают структуру, контекст и используются для автоматизированных решений на всех этапах жизненного цикла дома – от проекта и фундамента до утилизации [6].

На сегодняшний день в мировой научной литературе прослеживается два подхода к построению цифрового двойника в жилой сфере:

- Технический – ориентирован на данные, оборудование, алгоритмы и моделирование.
- Поведенческий – включает анализ предпочтений



жильцов, автоматизацию сценариев, машинное обучение и интерфейсы взаимодействия.

В итоге частный дом с цифровым двойником трансформируется из обычной недвижимости в цифровой сервис, который адаптирован под потребности владельца, управляется в реальном времени и интегрирован в более обширную цифровую инфраструктуру, такую как коттеджные поселки, сообщества жильцов, энергетические сети и другие элементы.

#### **Зарубежные исследования: частный дом в контексте цифрового двойника**

Применение цифровых двойников в частном домостроении становится все более популярной темой в зарубежных научных и прикладных исследованиях. Несмотря на то что основные проекты DT были сосредоточены в области промышленного и городского строительства, в последние годы наблюдается системный сдвиг в сторону индивидуального жилья. Это обусловлено развитием IoT, доступностью BIM-средств, распространением интеллектуальных устройств и усилением требований к прочности и энергоэффективности зданий.

#### **Европа: стандарты, энергоэффективность и долговечность**

В странах Европейского союза активное продвижение цифровых двойников в частном секторе связано с реализацией программ по декарбонизации и устойчивому строительству. Проекты Horizon, DigiPLACE и ConnectedHome направлены на создание платформ и нормативов для цифровых моделей, охватывающих частные дома.

Так, Ерика Пярн (Erika Pärn) из Бирмингемского городского университета Великобритании подчеркивает, что цифровой двойник позволяет не только повысить эффективность проектирования, но и существенно упростить обслуживание и модернизацию зданий, особенно в условиях перехода к «нулевому потреблению энергии» [7].

В Германии и Нидерландах в рамках национальных программ энергоэффективности внедряются домашние DT-модули, объединяющие BIM-модель с данными от «умных счетчиков», солнечных панелей и климатических систем. Такие модели позволяют:

- следить за утечками тепла и отклонениями от проектных параметров;
- автоматически формировать рекомендации по техобслуживанию;
- обеспечивать соответствие нормативам, включая EU Taxonomy и ESG-параметры.

Особое внимание уделяется адаптации зданий к климатическим изменениям. В совместном исследовании ученых из Дублинского университета (Ирландия) рассматривается сценарий использования DT для оценки поведения дома в экстремальных условиях: жара, ливнях, сильном ветре. DT анализирует термическую

инерцию, поведение окон и кровли, предлагая корректировки в эксплуатации [8].

#### **США и Канада: эксплуатация, страхование и жизненный цикл**

В североамериканском контексте основное внимание уделяется управлению жизненным циклом здания (Life-Cycle Management) и страховым аспектам. Национальный институт стандартов и технологий NIST разработал фреймворк цифрового двойника для «умного дома», включающий:

- интеграцию с голосовыми ассистентами (Alexa, Google Home);
- поддержку аварийного реагирования;
- контроль за критическими элементами инженерии (отопление, электрика, газ) [9].

Также DT используется как прозрачная среда для оценщиков и страховых компаний. Цифровой двойник позволяет зафиксировать состояние дома при покупке, во время эксплуатации и после аварий, что существенно упрощает расчеты страховых выплат [10].

Особый интерес представляет проект Smart Home Digital Twin Lab от лаборатории Массачусетского технологического института (MIT Media Lab), где изучается поведение жильцов в разных сценариях:

- как меняется тепловой баланс при различных привычках (открытие окон, режимы сна);
- как автоматизированные сценарии влияют на комфорт и потребление энергии;
- как можно адаптировать дом под пожилых людей и людей с ограниченной мобильностью [11].

#### **Азия и Австралия: адаптация и устойчивые поселения**

В странах Азии DT рассматривается как ключ к повышению устойчивости зданий к природным катастрофам и демографическим вызовам. В Южной Корее и Японии разработаны прототипы «антикризисных двойников», способных:

- предупреждать о повышении сейсмической активности;
- автоматически отключать системы при аварии;
- поддерживать цифровой профиль семьи и потребностей жильцов.

Автор-корреспондент Сянью Ван (Xiangyu Wang) показывает, что DT может стать инструментом «гибкого домостроения» – когда дом проектируется и эксплуатируется с учетом возможных трансформаций: разделение на квартиры, переезд семьи, адаптация под инвалидность [12].

В Австралии университет RMIT University разработал модель цифрового двойника, встроенную в экосистему устойчивого поселка (города), где каждый дом имеет свою цифровую сущность, а все вместе образуют «цифровую деревню». Это позволяет:

- координировать энергопотребление;
- оптимизировать полив, освещение и охрану;

– делать прогнозы на уровне не одного дома, а целого поселка (города) [13].

В работе ученых Университета Бургундии (Европа) акцентируется необходимость интероперабельности DT: все модели должны «разговаривать» на одном языке, использовать общие протоколы и быть понятны как для жильцов, так и для системного управления городом [14].

### **Технологическая архитектура и инструменты**

Создание цифрового двойника частного дома требует интеграции различных программных, аппаратных и аналитических компонентов в единую экосистему, которая способна функционировать в реальном времени, адаптироваться к условиям и обеспечивать двустороннюю связь между физическим и виртуальным объектами. Зарубежные исследования выделяют несколько ключевых уровней архитектуры DT: модельный, сенсорный, вычислительный, аналитический и пользовательский.

#### **Модельный уровень: BIM и 3D-репрезентация**

На первом этапе создается цифровая модель дома – это может быть как стандартная BIM-модель (например, в Revit, ArchiCAD или SketchUp), так и упрощенное 3D-представление, интегрированное с данными о материалах, геометрии, инженерных системах.

Цифровой двойник требует большего объема данных, чем классическая BIM-модель на стадии проектирования объекта, и по сути является симбиозом двух BIM-моделей объекта: проектной и эксплуатационной, поскольку в его рамках необходимо учитывать поведение конструкций, изменение состояния во времени и взаимодействие с внутренними системами и с внешней средой.

Исследование Бойе Калина (Boje Calin) подчеркивает, что семантическое обогащение модели (например, через IFC) позволяет задать правила, зависимости и контекст для анализа.

В контексте частных домов особое значение приобретают:

- модели интерьеров (для автоматизации сценариев и расчета освещенности);
- представление внешней среды (участок, климат, ориентация по сторонам света);
- визуализация истории изменений (ремонт, перепланировка, модернизация) [6];
- поведенческие особенности обитателей;
- медицинские аспекты жизни собственников.

#### **Сенсорный уровень: IoT, BMS и цифровое восприятие**

Цифровой двойник становится «живым», когда в систему поступают данные от физических источников. Это достигается за счет внедрения сенсоров и устройств IoT, охватывающих:

- температуру, влажность, освещенность, CO<sub>2</sub>;

- движение, открытие окон и дверей;
- потребление воды, электроэнергии, газа;
- состояние инженерных узлов (насосы, котлы, электрошиты).

По Юэ Пану (Yue Pan) интеграция с системой BMS (Building Management System) обеспечивает централизованный контроль, а подключение к облачным платформам (например, Azure Digital Twins, Siemens Mindsphere) позволяет масштабировать решения и использовать AI-аналитику.

Реализация в частном секторе все чаще основана на открытых протоколах: MQTT, BACnet, Zigbee, Thread, Modbus, KNX, LON, что упрощает подключение сторонних устройств и снижает стоимость системы. При этом важно учитывать кибербезопасность, особенно если данные передаются за пределы локальной сети [15].

### **Аналитика и интеллект: AI/ML, предиктивные модели**

Сбор данных сам по себе не дает эффекта без аналитического уровня. Зарубежные решения активно используют методы машинного обучения и предиктивной аналитики:

- алгоритмы прогнозирования выхода из строя инженерных систем;
- обнаружение аномалий (например, резкого роста потребления воды);
- поведенческий анализ жильцов для автоматизации (расписание, привычки).

По данным статьи «Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends» [16], в ряде американских проектов применяется гибридная логика: заранее заданные сценарии + обучение на данных. Это позволяет быстро стартовать, а затем персонализировать систему под конкретного пользователя.

Важным трендом становится сценарная адаптация – система не только реагирует, но и предлагает варианты: например, на основе прогноза погоды и привычек жильцов – заранее прогревает дом или включает приточную вентиляцию.

### **Облачные и децентрализованные платформы**

Облачные хранилища и вычислительные платформы обеспечивают масштабируемость, хранение истории и подключение внешних сервисов (например, цифрового паспорта объекта, страховой платформы, технадзора).

Примеры платформ, применяемых в зарубежных проектах:

- **Azure Digital Twins** – гибкая платформа от Microsoft для управления виртуальными копиями;
- **Autodesk Tandem** – BIM-среда для создания DT на основе Revit и IFC;
- **Home Assistant / openHAB** – open-source системы, используемые для локального управления с возможностью интеграции с DT.

В статье [14] подчеркивается важность интероперабельности – способность обмениваться данными между платформами, независимость от конкретного вендора, поддержка открытых стандартов. Особенно актуально это для малых домов, где владелец хочет избежать «привязки» к одному поставщику решений.

#### **Интерфейсы: голос, AR, визуализация**

Пользовательский уровень – один из наиболее быстро развивающихся. DT в частном доме должен быть **интуитивно понятным** и доступным жильцам без специальных знаний.

Реализуются следующие интерфейсы:

- **голосовые ассистенты** (Alexa, Siri, Google) – контроль климата, света, доступа;
- **AR/VR-решения** – визуализация ремонта, прокладок коммуникаций, истории изменений;
- **мобильные приложения** – отчеты, уведомления, сценарии, контроль доступа;
- **графики, дашборды, тепловые карты** – аналитика в реальном времени.

Исследование Smart Home Digital Twin Lab – MIT подчеркивает, что интерфейс DT должен быть пользовательски ориентированным, адаптироваться к возрасту, поведению, языковым предпочтениям владельца [11].

#### **Актуальные вызовы и барьеры**

Несмотря на очевидные преимущества, цифровые двойники частных домов сталкиваются с рядом технических, организационных, экономических и этических препятствий, замедляющих их широкое внедрение. Зарубежные исследования подчеркивают, что эти барьеры особенно критичны в индивидуальном строительстве, где отсутствует централизованный заказчик и единые цифровые стандарты.

#### **Отсутствие нормативной и методической базы**

Международные стандарты, такие как ISO 16739 (IFC), и национальные стандарты (например, BS ISO в Великобритании или DIN в Германии) задают требования к цифровым информационным моделям коммерческих и инфраструктурных объектов. Однако для частных домов отсутствуют универсальные стандарты и обязательные требования, что создает пробелы в регулировании их проектирования и строительства.

Согласно исследованиям Мохамеда Кассема (Mohamad Kassem) и Билала Суккара (Bilal Succar), даже в высокоразвитых странах с высоким уровнем цифровизации, таких как Великобритания, Германия и США, не существует унифицированных методик, касающихся структуры цифровых двойников (DT) частных домов, включая определение необходимых данных, обеспечение их актуальности и распределение ответственности за сопровождение цифровой модели [17].

В результате каждый разработчик предлагает собственную архитектуру, что снижает совместимость,

усложняет миграцию данных и затрудняет объединение моделей в масштабах поселков и районов.

#### **Высокая стоимость внедрения и поддержки**

Хотя базовые BIM-модели и IoT-решения становятся все более доступными, создание полноценного цифрового двойника с аналитикой, визуализацией и обратной связью требует значительных инвестиций. Особенно это касается:

- установки и калибровки сенсорной сети;
- разработки индивидуальной логики сценариев;
- интеграции с уже существующими системами «умного дома»;
- поддержки облачной инфраструктуры и кибербезопасности.

Ученые в исследованиях подчеркивают, что для частных владельцев важна экономическая целесообразность: DT должен окупаться за счет снижения эксплуатационных расходов, повышения стоимости дома при продаже или страховке. Однако в большинстве случаев окупаемость достигается только при долгосрочном планировании, что не всегда соответствует ожиданиям пользователей [18].

Особенно дорого обходится ретрофит (доработка и модернизация) уже существующих домов. Встраивание сенсоров, оцифровка планов, диагностика инженерии и визуализация отделки могут быть сложны и затратны, особенно без поддержки государства или субсидий.

#### **Кибербезопасность и приватность данных**

Цифровой двойник оперирует большим объемом персонализированных и технических данных, включая:

- поведение жильцов, их маршруты, графики и предпочтения;
- сведения о конструкциях, инженерных системах, уязвимостях;
- информацию, интересную злоумышленникам (например, длительное отсутствие жильцов).

Внедрение DT требует соблюдения норм по защите данных (например, GDPR в ЕС или CCPA в Калифорнии), а также технической защиты от взломов, утечек, несанкционированного доступа. При этом, как показывает исследование ученых из Университета Западного Сиднея, большинство решений на рынке не обеспечивают достаточного уровня изоляции и шифрования, особенно в бюджетных решениях [19].

Проблема усугубляется тем, что многие владельцы не обладают достаточной цифровой грамотностью для настройки прав доступа, обновлений и безопасного подключения устройств.

#### **Недоверие и слабая вовлеченность пользователей**

Психологический и поведенческий барьер тоже значим. Многим владельцам трудно доверить системе с AI и машинным обучением контроль за своим домом.

Особенно в старших возрастных группах распространено мнение, что «дом должен подчиняться человеку, а не наоборот».

Smart Home Digital Twin Lab – MIT фиксирует, что ключевым фактором является прозрачность интерфейса и обучаемость системы [11]. Владельцы хотят видеть, почему система принимает то или иное решение, как ее можно настроить под свои нужды, какие данные она собирает.

Также важен вопрос удобства, так как слишком сложные настройки, перегруженные интерфейсы и отсутствие единого приложения отпугивают пользователей. Особенно это актуально в домах, где проживает несколько поколений, каждое из которых взаимодействует с технологией по-разному.

#### **Недостаток специалистов и экосистемы**

Даже при желании внедрить DT многие владельцы сталкиваются с нехваткой специалистов: проектировщиков, разработчиков сценариев, инженеров по данным и т.д. На рынке мало предложений, ориентированных именно на частный сектор, большинство решений разрабатывается под коммерческую недвижимость или промышленность.

Ученые из различных университетов (Новой Зеландии, Канады и США), ведущие исследования в этой области, подчеркивают, что формирование зрелой экосистемы вокруг DT требует:

- готовых модулей «под ключ» (например, цифровой паспорт, термомодель, графики обслуживания);
- интеграции с уже существующими сервисами (управляющие компании, страховые, госуслуги);
- образовательных программ для архитекторов, строителей и владельцев [20].

#### **Перспективы развития**

Несмотря на существующие препятствия, цифровые двойники частных домов все чаще рассматриваются в международной литературе не как автономная технология, а как элемент более широкой экосистемы «умного и устойчивого жилья». Ученые и разработчики единодушны в том, что ближайшие годы станут периодом перехода от экспериментальных решений к полноценным платформенным моделям, доступным для широкого круга потребителей.

#### **Расширение масштаба: от дома к цифровому району**

Одним из главных векторов развития станет интеграция DT в масштабе нескольких объектов, формирующих цифровую сеть поселков, районов и даже городов. В рамках проектов типа DigiPLACE [21] цифровые двойники частных домов объединяются в единую платформу, что позволяет:

- синхронизировать управление ресурсами (тепло, вода, электричество);
- координировать ремонты и технические работы;

– повысить безопасность и мониторинг на уровне квартала;

– формировать коллективные сценарии реагирования на ЧС.

Такой подход особенно актуален в малоэтажной застройке с единым девелопером или управляющей компанией, где единая цифровая инфраструктура позволяет формировать «цифровой поселок» с возможностью масштабирования и адаптации.

#### **Эволюция автономных домов**

Цифровые двойники становятся основой для создания автономных, самоуправляемых домов, где AI-система не только управляет оборудованием, но и самостоятельно принимает решения на основе долгосрочного анализа поведения жильцов и внешних факторов (погоды, цен на энергию, расписаний).

Примером могут служить проекты двух университетов MIT и UC Berkeley по внедрению цифровых двойников, которые:

- автоматически переносят работу энергосистем в часы низкой нагрузки;
- обновляют сценарии на основе моделей машинного обучения;
- интерпретируют голосовые команды и подстраивают алгоритмы без участия пользователя (Smart Home Digital Twin Lab – MIT) [11].

Такой дом способен «предугадывать» желания жильцов, оптимизировать расходы и обеспечивать максимальный комфорт при минимуме ручного управления.

#### **Интеграция с зелеными стандартами и ESG**

С ростом интереса к устойчивому строительству цифровые двойники все чаще рассматриваются как инструмент достижения стандартов:

- **LEED, BREEAM, WELL** – через контроль за микроклиматом, освещенностью, ресурсами;
- **ESG** – предоставляя прозрачную отчетность по эксплуатации дома;
- **Zero Carbon Homes** – благодаря прогнозированию углеродного следа и оптимизации энергопотребления [19].

Цифровой двойник помогает не только построить дом по зеленому стандарту, но и поддерживать соответствие в течение всего срока службы, обеспечивая владельца и общество надежной экологической информацией.

#### **Новые интерфейсы и метаверс-экосистемы**

С развитием технологий визуализации (VR/AR) и метавселенных цифровые двойники начинают интегрироваться в виртуальные среды, где владелец может:

- управлять домом в формате геймифицированного интерфейса;
- планировать ремонт, перестановку мебели или ландшафтный дизайн в дополненной реальности;



– просматривать показатели, историю и прогнозы в иммерсивной 3D-среде.

Исследования Юэ Пан (Yue Pan) и Марио Челси (Mario Chelse) показывают, что такие подходы повышают вовлеченность пользователей, особенно молодого поколения, и формируют цифровую идентичность дома, которую можно даже передавать при продаже объекта [15].

### Заключение

Цифровой двойник частного дома в зарубежном освещении занимает все более значимое место как с технологической, так и с социальной точки зрения. Если еще 5–10 лет назад DT воспринимался как инструмент для индустриальных и инфраструктурных объектов, то сегодня он активно осваивает индивидуальный сектор, трансформируя подход к проектированию, эксплуатации и взаимодействию с домом.

На основе обширного анализа научной литературы можно сделать следующие выводы:

– **DT для частного дома – это не просто модель**, а целостная экосистема, включающая BIM, IoT, AI и интерфейсы взаимодействия;

– **потенциал применения чрезвычайно высок**, особенно в аспектах энергоэффективности, устойчивости, комфорта и стоимости владения. Современный цифровой дневник начинает становиться цифровым мозгом дома, объединяющим функции паспорта, управляющего, помощника, сервисной службы и аналитика. Он должен не просто фиксировать данные, а делать дом умным, адаптивным, долговечным и безопасным, реагирующим на внутренние проблемы и внешние вызовы как по разработанным сценариям, так и интеллектуально;

– **основные барьеры** – нехватка стандартов (хотя они есть в ISO и наших национальных ГОСТ Р), именно для частного домостроения, высокая стоимость создания, кибер-риски и слабая вовлеченность пользователей постепенно преодолеваются за счет широкого вовлечения все новых и новых компаний в разработку и распространение практики цифровых двойников с промышленности и крупных инфраструктурных объектов на сектор частных домов;

– **будущее за платформенными и автономными решениями**, позволяющими каждому дому стать частью цифровой среды – умной, адаптивной и прозрачной.

Таким образом, цифровые двойники частных домов – это уже не гипотеза, а реальность, начало реализации которой положено в передовых странах и компаниях.

И вот живые примеры:

– **Spotscale (Швеция)** – производитель цифровых двойников на основе дрон-съемки для Riksborgen;

– **Skanska (Финляндия)** внедрила цифровую модель ЖК Sampo с функционалом мониторинга проживания;

– **NNTC (ОАЭ)** – партнер Abu Dhabi Housing Authority

в проекте цифровых двойников массового жилья;

– **TNO и Scenexus (Нидерланды)** разработали региональную платформу для моделирования жилищного роста;

– **AIM Housing (Великобритания)** – коммерческий продукт для цифровых двойников арендуемого жилья;

– **Arup (международная инженерная компания)** предлагает «Neuron» – платформу цифровых двойников зданий для оптимизации энергопотребления;

– **Granlund (Финляндия)** – система «Granlund Manager's Digital Twin»;

– **Autodesk** – облачная платформа для жизненного цикла зданий «Autodesk Tandem»;

– **Siemens** – система «Building Twin» для мониторинга и управления зданиями;

– **Bosch** использует Azure Digital Twins для подключенных зданий;

– **Catenda** – платформа Bimsync Arena для BIM поддержки цифровых двойников.

### Перспективы в ближайшие годы

Массовое внедрение: энергетический аудит, мониторинг потребления, визуализация, обслуживание, оптимизация смарт-функций.

Расширение: с крупных ЖК на отдельные частные дома – технология становится более доступной и миниатюризируется.

Коммерциализация: продукты для владельцев и управляющих (например, от Granlund, Autodesk, Siemens) – переход от пилота к массовым продажам.

Законодательная поддержка: например, во ФРГ и Великобритании законы требуют цифровую документацию для жилья, там цифровые двойники станут стандартом.

Таким образом, цифровые двойники частных домов – это реальность, уже внедренная в Швеции, Финляндии, ОАЭ, Великобритании и Нидерландах. Конкретные цифры (5 000 квартир, 3 000 домов, 62 000) – это не гипотеза, а активно реализуемые кейсы. Их широкое внедрение в ближайшие годы станет неотъемлемой частью цифровой трансформации жилищного фонда.

### Список литературы / References

1. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018, vol. 48, pp. 157–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
2. Grieves M. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. 2011. URL: [https://www.researchgate.net/publication/274835788\\_Virtually\\_Perfect\\_Driving\\_Innovative\\_and\\_Lean\\_Products\\_through\\_Product\\_Lifecycle\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/274835788_Virtually_Perfect_Driving_Innovative_and_Lean_Products_through_Product_Lifecycle_Management).
3. Tao F., Zhang M., Nee A. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, 2019, 282 p. ISBN: 978-0-12-817630-6.

4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
5. Zhou Y., Chao T., Zhang T., Tongrui Z., Zhang Z. Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 9, article number 2616. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092616>.
6. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020, vol. 114, no. 3, p. 103179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
7. Pärn E., Edwards D., Sing M.C.P. The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Automation in Construction*. 2017, vol. 75, no. 3, pp. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.003>.
8. Considine B., McNabola A., Kumar P., Gallagher J. A numerical analysis of particulate matter control technology integrated with HVAC system inlet design and implications on energy consumption. *Building and Environment*. 2022, vol. 211, article number 108726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108726>.
9. NIST Advanced Manufacturing Series 400–2. Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247. National Institute of Standards and Technology Advanced Manufacturing Series 400–2. May, 2021, 30 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.400-2>.
10. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H., Girolami M. Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*. 1: e14. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.
11. Smart Home Digital Twin Lab — MIT Media Lab. Creating “digital twins” at scale. Model could help predictive virtual models become standard practice in engineering. Becky Ham | Department of Aeronautics and Astronautics. Publication Date: June 14, 2021 [интернет]. URL: <https://news.mit.edu/2021/creating-digital-twins-scale-0614> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Wang J., Wu P., Wang X., Shou W. The outlook of blockchain technology for construction engineering management. *Frontiers of Engineering Management*. 2017, vol. 4, no. 1, pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017006>.
13. Mojtaba Mahmoodian, Kevin (Guomin) Zhang, Sujeeva Setunge Digital twins can help monitor infrastructure and save us billions. Creating a digital twin of infrastructure or services makes them easier to monitor and operate safely. RMIT University. Publication Date: June 29, 2020 [интернет]. URL: <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2020/jun/digital-twins-can-help-monitor-infrastructure> (дата обращения: 20.05.2025).
14. Roxin A., Abdou W., Derigent W. Interoperable digital building twins through communicating materials and semantic BIM. *SN Computer Science*. 2022, vol. 3, article number 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00860-w>.
15. 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>.
16. Bilal M., Oyedele L.O., Qadir J., Munir K., Ajayi S.O., Akinade O.O., Owolabi H.A., Alaka H.A., Pasha M. Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced Engineering Informatics*. 2016, vol. 30, no. 3, pp. 500–521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>.
17. Kassem M., Succar B. Macro BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in Construction*. 2017, vol. 81, pp. 286–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2017.04.005>.
18. Piras G., Agostinelli S. Digital Twins for Built Environment. A Review on Key Enablers. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 2, article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020436>.
19. De-Graft Joe Opoku, Srinath Perera, Robert Osei-Kyei, Maria Rashidi, Tosin Famakinwa, Keivan Bamdad. Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Buildings*. 2022, vol. 12, no. 2, article number 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12020113>.
20. GhaffarianHoseini A., Tookey J., GhaffarianHoseini A. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, vol. 75, pp. 1046–1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>.
21. Digital Platform for Construction in Europe. CORDIS — EU research results. Publication Date: 12 December 2023 [интернет]. DOI: <https://doi.org/10.3030/856943>. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/856943> (дата обращения: 20.05.2025).

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

**Виталий Владимирович Ткаченко**, канд. экон. наук, генеральный директор, АО «ТЕХНАДЗОР», Москва  
e-mail: [Vvtkachenko@mail.ru](mailto:Vvtkachenko@mail.ru)  
**Vitaly V. Tkachenko**, Cand. Sci. (Economics), General Director, JSC TECHNADZOR, Moscow  
e-mail: [Vvtkachenko@mail.ru](mailto:Vvtkachenko@mail.ru)



**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



ЦНИИСК  
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ  
ИМ. А.А. ГОРДЕНКО



НИИОСП  
ИМ. Н.М. ГОРБАЧЕВА



г. Москва,  
2-я Институтская ул., д. 6



+7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80



[www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru)



[motorina@cstroy.ru](mailto:motorina@cstroy.ru) | [smirnova@cstroy.ru](mailto: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»



Обучение в аспирантуре,  
докторантуре

Прикрепление для  
подготовки диссертации без  
освоения образовательных  
программ



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](mailto:cok-info@cstroy.ru)**

Научно-технический журнал  
Бетон и железобетон  
Вып. 4 (629) 2025

Редактор выпуска Починина Н.Е.  
Компьютерная верстка Дрозд И.Ю.  
Дата выхода в свет 30.08.2025 Формат 60х88 1/8  
Бумага мелованная. Офсетная печать. Тираж 300 экз. Заказ № 290825  
Подписной индекс в каталоге УРАЛ ПРЕСС 85502

Отпечатано в типографии «Строки»  
(ИП Копыльцов П. И., ИНН 3665824412)  
г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34.  
+7 (995) 494-84-77  
[www.stroki.vrn.ru](http://www.stroki.vrn.ru)



