

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

# БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

2

627

2025

BZHB.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)

Основа: Институт НИИЖБ Госстроя СССР  
и ВНИИЖелезобетон  
Минстройматериалов СССР

# БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

2 (627)

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

А.Н. МАМИН, АВДЕЕВ К.В., ЗЕНИН С.А., БАММАТОВ А.А.

**Анализ возможных механизмов разрушения петлевых  
стыков арматуры монолитных железобетонных конструкций** . . . . . **5**

С.В. СНИМЩИКОВ, И.П. САВРАСОВ, Е.В. СУМАРОКОВ

**Информационная модель алгоритма применения  
машиночитаемых нормативных документов  
при проектировании строительных конструкций** . . . . . **16**

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

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

**Влияние вида заполнителя на физико-технические  
характеристики высокопрочных самоуплотняющихся  
цементных систем** . . . . . **27**

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

**Оценка влияния способа оттаивания образцов на  
морозостойкость бетона по режиму ускоренного  
третьего метода ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1** . . . . . **43**

Е.В. ШЕЙКИН

**Характер разрушения слоистых пористых материалов  
в конструкциях объектов культурного наследия** . . . . . **54**

## ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

А.Л. КАЛИНИЧЕНКО

**Находил применение железобетону там, где,  
казалось бы, этому материалу нет места** . . . . . **63**

### 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

**Founder of the journal:**

«Reinforced concrete» Association  
**Address:** 22, building 2, Ryazansky prospect,  
Moscow, 109428, Russian Federation

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

# BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

2 (627)

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

A.N. MAMIN, K.V. AVDEEV, S.A. ZENIN, A.A. BAMMATOV

**Analysis of possible failure mechanisms of loop joints  
in reinforced concrete monolithic structures. . . . . 5**

S.V. SNIMSHCHIKOV, I.P. SAVRASOV, E.V. SUMAROKOV

**Information model of the algorithm for the application  
of machine-readable normative documents in the design  
of building structures. . . . . 16**

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

S.S. KAPRIELOV, A.V. SHEYNFELD, N.I. KARPENKO, N.M. SELYUTIN, G.A. MOISEENKO, I.M. BEZGODOV

**The influence of the type of filler on the physical and technical  
characteristics of high-strength self-compacting  
cement systems. . . . . 27**

G.V. CHEKHNI, A.V. BUCHKIN, N.K. ROZENTAL, S.A. OREKHOV

**Assessment of the effect of the sample thawing method  
on the frost resistance of concrete according  
to the accelerated third method of the State Standard 10060-2012  
with Amendment No. 1 . . . . . 43**

E.V. SHEIKIN

**The nature of the destruction of layered porous materials  
in the structures of cultural heritage sites. . . . . 54**

## HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

A.L. KALINICHENKO

**He found use for reinforced concrete where, it would seem,  
this material has no place. . . . . 63**

**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:** bzhb.ru@yandex.ru

**http://bzhb.ru**

Free price

## Редакционная коллегия

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

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

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

---

**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)

**МАИЛЯН Д.Р.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Донской государственной технической 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 – КИТ (Германия)

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

**РАХМАНОВ В.А.**, канд. техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, председатель Совета директоров, ООО «Институт ВНИИжелезобетон» (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, заведующий центром № 21, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

## Editorial team

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

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

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

---

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

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

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

**KAPRIELOV 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, Head of the Center No. 21, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, 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.

**А.Н. МАМИН<sup>1,2,✉</sup>, К.В. АВДЕЕВ<sup>1</sup>, С.А. ЗЕНИН<sup>3</sup>, А.А. БАММАТОВ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> АО «ЦНИИПромзданий», Дмитровское шоссе, д. 46, к. 2, г. Москва, 127238, Российская Федерация

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

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> АО «Северсталь менеджмент», ул. Клары Цеткин, д. 2, г. Москва, 127299, Российская Федерация

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕТЛЕВЫХ СТЫКОВ АРМАТУРЫ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## Аннотация

*Введение.* В статье рассматриваются аналитические методы расчета петлевых стыков арматуры в монолитных железобетонных конструкциях. Основное внимание уделено анализу механизмов разрушения, отличающихся от классического перехлеста арматуры, и определению условий прочности конструкции.

*Цель.* Выделить основные возможные механизмы разрушения петлевых стыков, разработать аналитическую модель их работы и предложить усовершенствованную методику расчета для обеспечения надежности соединений.

*Материалы и методы.* Исследование основано на анализе существующих расчетных методик, а также на результатах численных и натуральных экспериментов. Рассмотрено три основных механизма разрушения: местное повреждение бетона от смятия, разрушение бетонного ядра между петлями и потеря сцепления арматуры с бетоном. Для описания передачи усилий через бетонное ядро предложено использование каркасно-стержневой модели.

*Результаты.* На основании анализа данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к принятой на сегодняшний день методике.

*Выводы.* Сравнительный анализ результатов расчетов по различным методикам показал некоторые различия. Для дальнейшего развития и уточнения аналитических методик расчета бетонного ядра петлевых стыков рекомендовано продолжить проведение фи-

зических и численных экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** петлевой стык, арматура, железобетонные конструкции, разрушение бетона, сцепление арматуры с бетоном, каркасно-стержневая модель, радиальное давление, прочность бетона, аналитический расчет

**Для цитирования:** Мамин А.Н., Авдеев К.В., Зенин С.А., Бамматов А.А. Анализ возможных механизмов разрушения петлевых стыков арматуры монолитных железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 5–15. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-5-15](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-5-15). EDN: OSIWVY

## Вклад авторов

Мамин А.Н. – постановка задачи, участие в разработке методики расчета, обобщение и систематизация результатов, формулирование выводов.

Авдеев К.В. – постановка задачи, анализ экспериментальных данных, участие в формулировании выводов.

Зенин С.А. – анализ экспериментальных данных, анализ результатов выполненных расчетов, участие в формулировании выводов.

Бамматов А.А. – подбор литературы, анализ экспериментальных данных, разработка методики, выполнение и анализ результатов расчетов, участие в формулировании выводов, подготовка и оформление статьи

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.03.2025

Поступила после рецензирования 04.04.2025

Принята к публикации 10.04.2025

**A.N. MAMIN<sup>1,2, ✉</sup>, K.V. AVDEEV<sup>1</sup>, S.A. ZENIN<sup>3</sup>, A.A. BAMMATOV<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> JSC "TsNIIPromzdaniy", Dmitrovskoye Shosse, 46, bld. 2, Moscow, 127238, Russian Federation

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

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> JSC "Severstal Management", Klara Zetkin str., 2, Moscow, 127299, Russian Federation

# ANALYSIS OF POSSIBLE FAILURE MECHANISMS OF LOOP JOINTS IN REINFORCED CONCRETE MONOLITHIC STRUCTURES

## Abstract

*Introduction.* This paper examines analytical methods for calculating of loop joints in monolithic reinforced concrete structures. The main focus is on analyzing failure mechanisms that differ from classical reinforcement overlap and determining structural strength conditions.

*Aim.* To identify the main possible failure mechanisms of loop joints, develop an analytical model of their behavior, and propose an improved calculation methodology to ensure the reliability of connections.

*Materials and methods.* The study is based on an analysis of existing calculation methods as well as the results of numerical and full-scale experiments. Three main failure mechanisms are considered: local concrete crushing, failure of the concrete core between loops, and loss of reinforcement bond with concrete. A frame-bar model is proposed to describe force transmission through the concrete core.

*Results.* Based on the analysis of physical and numerical experiment data, as well as international experience, additions and alternative solutions to the currently adopted methodology are proposed.

*Conclusions.* A comparative analysis of calculation results using different methods revealed some discrepancies. For further development and refinement of analytical calculation methods for the concrete core of loop joints, continued physical and numerical experimental studies are recommended.

**Keywords:** loop joint, reinforcement, reinforced concrete structures, concrete failure, reinforcement-concrete bond, frame-bar model, radial pressure, concrete strength, analytical calculation

**For citation:** Mamin A.N., Avdeev K.V., Zenin S.A., Bammatov A.A. Analysis of possible failure mechanisms of loop joints in reinforced concrete monolithic structures. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 5–15. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-5-15](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-5-15). EDN: OSIWVY

## Authors contribution statement

Mamin A.N. – problem statement, participation in the development of the calculation methodology, summarization and systematization of results, formulation of conclusions. Avdeev K.V. – problem statement, analysis of experimental data, participation in conclusion formulation.

Zenin S.A. – analysis of experimental data, evaluation of calculation results, participation in conclusion formulation.

Bammatov A.A. – literature review, analysis of experimental data, methodology development, execution and analysis of calculation results, participation in conclusion formulation, article preparation and formatting.

## Funding

No funding support was obtained for the research.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.03.2025

Revised 04.04.2025

Accepted 10.04.2025

**Введение**

Применение в монолитных конструкциях петлевых сопряжений рабочей арматуры без армирования бетонного ядра стыка арматуры имеет заметные технологические преимущества при возведении монолитных железобетонных зданий и сооружений [1–3], однако на сегодняшний день такие сопряжения применяются в основном на объектах атомной промышленности. Их более широкое распространение ограничено сложностью и недостаточной изученностью напряженно-деформированного состояния сопряжения, прежде всего бетонного ядра и участков передачи на него усилий от арматуры. На сегодняшний день в отечественной практике при расчете прочности для статического нагружения нормирована проверка возможных механизмов разрушения (раскалывание бетонного ядра, срез по наклонным площадкам и потеря анкерующей способности петлевых выпусков) полуэмпирическими способами, предложенными в методике НИИЭС Гидропроекта [1, 2, 4]. В статье на основании анализа дополнительных данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к методике [1, 2, 4].

**Методика расчета НИИЭС Гидропроекта**

Методика предполагает проверку несущей способности петлевых стыков при статических нагрузках с учетом трех возможных механизмов разрушения:

- раскалывание ядра под петлями;
- срез ядра по наклонным площадкам от вторичных поперечных сил;
- потеря анкерующей способности петлевых выпусков с образованием шарнира.

Расчет на раскалывание ядра под петлями основан на анализе локального поля напряжения при различных соотношениях шага петель к диаметру

ядра с учетом прямой вставки, общая схема показана на рис. 1.

Расчет на раскалывание бетона под петлями производится из условия:

$$N_{cl} > N_s, \tag{1}$$

где  $N_{cl}$  – несущая способность ядра петлевого стыка;  $N_s$  – усилие в одном арматурном стержне.

Несущую способность ядра петлевого стыка  $N_{cl}$  при проверке бетона на раскалывание определяют по формуле:

$$N_{cl} = \left[ 2,3 \left( \frac{U_0}{D+c_h} \right)^2 + 1,3 \right] \times S_c l \times k_c \times R_b t. \tag{2}$$

При расчете несущей способности петлевого стыка по срезу ядра бетона по наклонным сечениям, соединяющим встречные петли, используется теория прочности Мора, составляющая основу расчетной методики [1, 4]. Общая схема показана на рис. 2.

Расчет петлевых стыков при срезе по наклонным сечениям производят из условия:

$$N_{cl} > N_s, \tag{3}$$

$$N_{cl} = \gamma_l \times S_s \times k_c \times ([\tau] \times \cos \beta_s + [\sigma] \times \sin \beta_s). \tag{4}$$

Расчет несущей способности стыка по критерию потери анкеровки арматуры основывается на условии равновесия арматурного стержня, состоящего из прямолинейных и криволинейных участков.

Проверку анкеровки предлагается выполнять по условию:

$$D_k \geq D_{req?} \tag{5}$$

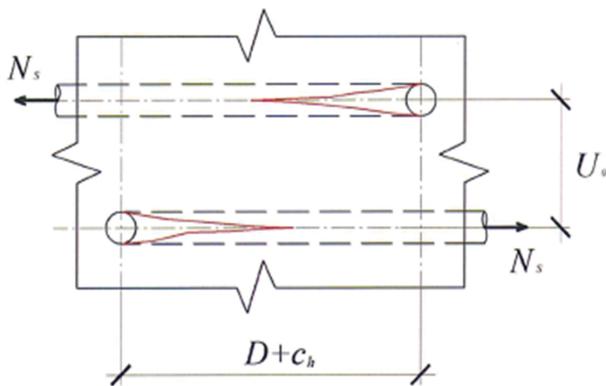


Рис. 1. Схема усилий и характер трещинообразования при раскалывании ядра

Fig. 1. The scheme of forces and the nature of cracking during core splitting

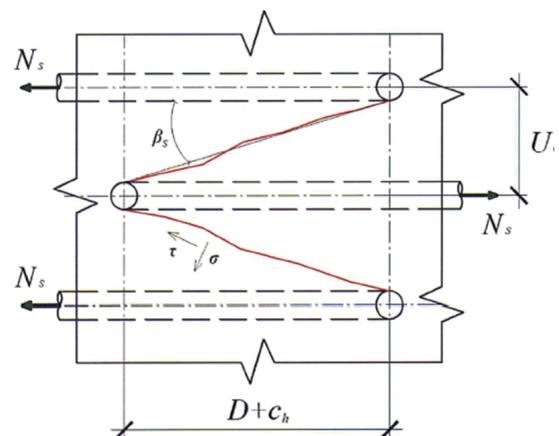


Рис. 2. Схема усилий и характер трещинообразования при срезе по наклонным сечениям

Fig. 2. The scheme of forces and the nature of cracking at shearing along inclined sections.

где  $D_{req}$  – требуемый диаметр петлевого стыка, определяемый по формуле:

$$D_{req} = \frac{0,5R_s \times d}{\pi \times R_{bond3}}, \tag{6}$$

где  $R_{bond3}$  – среднее сопротивление сцепления арматуры с бетоном по криволинейному анкеру, определяемое по формуле:

$$R_{bond3} = \eta_3 \times R_{bt}. \tag{7}$$

**Предлагаемая расчетная методика**

Для конструкций с петлевыми стыками предлагается выделить три возможных типа разрушения:

- местное повреждение бетона от смятия;
- разрушение бетона ядра на участке между петлями;
- нарушение сцепления арматуры с бетоном.

Рассмотрим предлагаемые аналитические зависимости для каждого механизма разрушения.

Механизм разрушения в результате местного повреждения бетона от смятия предполагает, что напряжения в арматуре изменяются от растяжения в точке В к сжатию в точке А, как показано на рис. 3а. Данная предпосылка подтверждается рядом эксперименталь-

ных исследований [2, 5–15]. Таким образом, в случае соединения, передающего в основном изгибающие моменты, радиальное давление на бетон изменяется, как показано на рис. 3б.

Для определения зависимости радиального давления на бетон от усилия в арматуре представим зону передачи давления в виде отдельных участков, настолько коротких, чтобы в их пределах усилие в арматуре  $F_s$  можно принять постоянным. Рассмотрим равновесие такого участка, ограниченного углом  $\varphi$  (рис. 4).

Запишем уравнение равновесия на вертикальную ось:

$$2 \times F_s \times \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = P \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} \cos(\varphi) \times r \times d\varphi = 2 \times P \times \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \times r, \tag{8}$$

где  $F_s = \sigma_s \times A_s$  – усилие в арматурном стержне.

Тогда для каждого стремящегося к точке отрезка петли получим:

$$P = \frac{F_s}{r}. \tag{9}$$

Согласно результатам численных и экспериментальных исследований [5, 16], максимальное ожидаемое напряжение в арматуре в точке В составляет 50 % от напряжения арматуры вне стыка в зоне чистого изгиба.

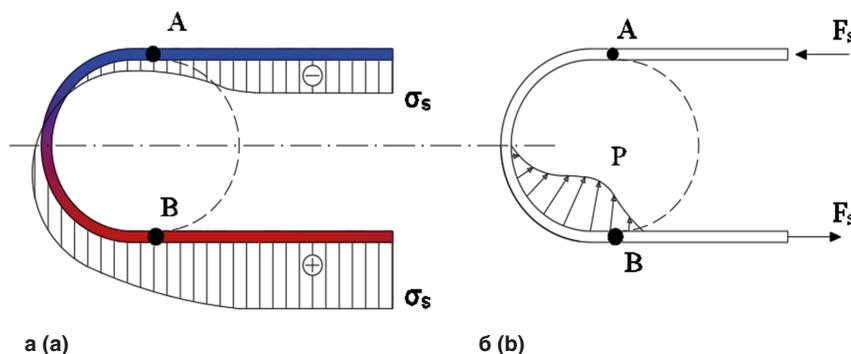
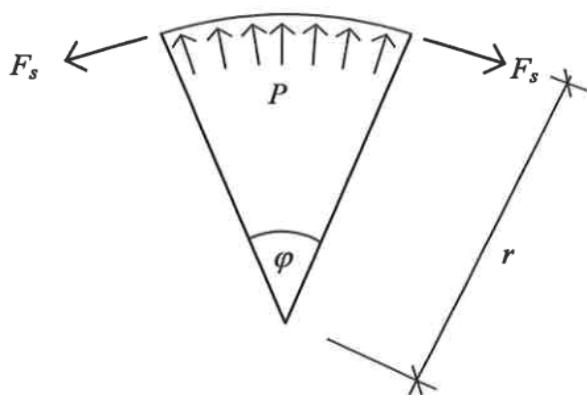


Рис. 3. Схема распределения напряжений в арматуре и давления на бетон вдоль петли  
 Fig. 3. Diagram of stress distribution in reinforcement and pressure on concrete along the loop



$P$  – давление на бетон вдоль петли  
 $F_s$  – растягивающее усилие в арматуре  
 $r$  – радиус петли стыка

Рис. 4. Статическая схема участка петлевого стыка  
 Fig. 4. Static diagram of the loop joint section

Таким образом, уравнение (9) для предельной стадии работы бетона на контакте с рабочей арматурой петлевого стыка будет:

$$P = 0,5 \times \frac{R_s \times A_s}{r}. \quad (10)$$

Прочность на местное смятие считается обеспеченной при условии:

$$P < \psi \times R_{b,loc}, \quad (11)$$

где  $R_{b,loc}$  – расчетное сопротивление бетона сжатию при местном действии нагрузки;

$\psi$  – коэффициент неравномерности, принимаемый для петлевого стыка 0,75.

$$R_{b,loc} = \varphi_b \times R_b, \quad (12)$$

$\varphi_b$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\varphi_b = 0,8 \times \sqrt{\frac{A_c}{A'_c}}, \quad (13)$$

где  $A_c$  – площадь зоны передачи давления;

$A'_c$  – расчетная площадь;

$$A_c = \frac{\pi \times D \times d_s}{2}, \quad (14)$$

$$A'_c = \frac{u \times \pi \times D}{2}, \quad (15)$$

где  $D = 2r$  – диаметр петли арматуры.

Для аналитического описания механизма разрушения бетонного ядра примем за основу каркасно-стержневую модель, рекомендованную для расчетов петлевых стыков с армированием бетонного ядра в Model Code 2010 [17] и использованную в исследованиях [11, 13].

Каркасно-стержневая модель удобна для описания взаимодействия петель встречного направления, поскольку предусматривает приведение поля напряжений в бетоне ядра к усилию в дискретном стержне, которое можно описать уравнениями равновесия.

Предлагаемая модель описывает механизм передачи усилия  $N_s$  с одного арматурного стержня через бетон ядра стыка на другой стержень, как показано на рис. 5.

Растяжение в арматурном стержне приводит к образованию сжатого участка бетона, условно заменяемого наклонным стержнем, через который и передается усилие на арматурный стержень встречного направления. Как видно из рис. 5, этот участок расположен под неким углом  $\theta$ , который теоретически может изменяться от близких к 0 до близких к 90 градусам значений, и любое ненулевое значение угла будет приводить к возникновению растягивающих усилий, которые стремятся к  $N_s$  при  $\theta \rightarrow 90^\circ$  и к нулю при  $\theta \rightarrow 0^\circ$ . Таким образом, формулы определения сжимающих усилий  $F_c$  и растягивающих  $F_t$  имеют вид:

$$F_t = N_s \times \text{ctg} \theta, \quad (16)$$

$$F_c = N_s \times \cos \theta. \quad (17)$$

Данные аналитические зависимости имеют хорошую корреляцию с результатами экспериментальных исследований, в которых с увеличением расстояния между петлями несущая способность соединения уменьшалась.

Для сжатой полосы предлагается применять коэффициенты редуцирования прочности на сжатие в зависимости от напряженного состояния [18]. Таким образом, предельное сопротивление бетона стойки сжатию предлагается определять как:

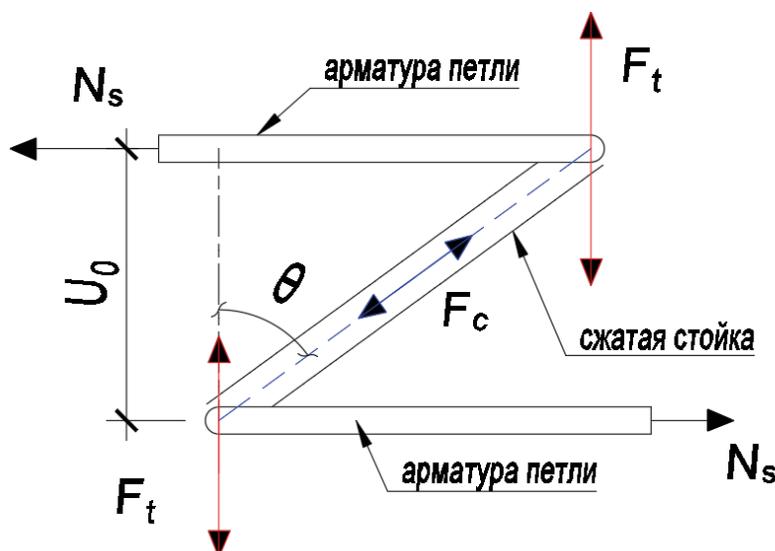


Рис. 5. Каркасно-стержневая модель петлевого стыка  
Fig. 5. The frame-rod model of the loop joint

$$R_{st} = k_c \times R_{cube}, \quad (18)$$

где  $R_{cube}$  – кубиковая прочность бетона на сжатие;  
 $k_c$  – редуцирующий коэффициент, зависящий от напряженного состояния.

Для случая петлевого стыка, ввиду особенностей его напряженно-деформированного состояния и имеющихся экспериментальных данных [5], предлагается определять редуцирующий коэффициент через функцию логарифмической регрессии:

$$k_c = 0,3608 \times \ln(\theta) - 0,6168. \quad (19)$$

Следовательно, предельное усилие в наклонном стержне  $F_{st}$ :

$$F_{st} = k_c \times A_{st} \times R_{st}, \quad (20)$$

где  $A_{st}$  – площадь поперечного сечения наклонного стержня, определяемая как произведение эффективной ширины  $w_{st}$  (в плоскости чертежа на рис. 5) на эффективную высоту  $h_{st}$  (в перпендикулярной чертежу плоскости).

Для петлевого стыка предлагается упрощено принимать  $w_{st}$  равной  $d_s$ , а  $h_{st}$  – равной  $S = (D+c_n) \times \cos\theta$ , где  $c_n$  – длина горизонтальной прямой вставки (при наличии). Эффективная площадь поперечного сечения наклонного стержня:

$$A_{st} = k_s \times S \times d_s, \quad (21)$$

где  $k_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерность напряжений по ядру стыка и принимаемый 0,75 при изгибе и 1,4 при растяжении.

Таким образом, предлагаемый коэффициент равнопрочности петлевого стыка определяется как:

$$k_r = \frac{F_{st}}{F_c}. \quad (22)$$

При значении  $k_r$  больше или равным единице ( $k_r \geq 1$ ) стык считается равнопрочным рабочей арматуре, а несущую способность элемента предлагается

определять по общепринятым формулам для железобетонных элементов.

При значении  $k_r$  меньше единицы ( $k_r < 1$ ) стык считается не равнопрочным, а несущую способность, определенную по общепринятым формулам для железобетонных элементов, следует умножать на коэффициент  $k_r$ .

Предлагаемое условие прочности можно записать в виде:

$$M_{act} < M_{ult} \times k_r, \quad (23)$$

где  $M_{act}$  – действующий на элемент изгибающий момент;

$M_{ult}$  – предельный воспринимаемый элементом момент, определенный согласно [18] для сплошной арматуры в предположении отсутствия петлевого стыка.

*Разрушение связи сцепления между арматурой и окружающим бетоном* – третий рассматриваемый возможный механизм потери несущей способности петлевого стыка. Разрушение связи может произойти, если растягивающее усилие в арматуре превышает сумму максимальных напряжений сцепления вдоль предусмотренной длины петли и напряжений трения, вызванных радиальным давлением вдоль изогнутой части. Возникающие в бетоне на границе с арматурной петлей касательные напряжения показаны на рис. 6.

Напряжение сцепления возникает в результате сопротивления бетона проскальзыванию арматурного стержня. Формула сцепления для полукруглого участка петлевого стыка выводится путем рассмотрения элементарного участка длиной  $dx$ , на котором действует касательное напряжение сцепления (рис. 7). Записав уравнение равновесия для единичного элемента, получаем дифференциальное соотношение, которое затем интегрируем по всей длине изогнутой части петли.

Уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\sigma_s \times A_s + \tau \times p_s \times dx = (\sigma_s + d\sigma_s) \times A_s, \quad (24)$$

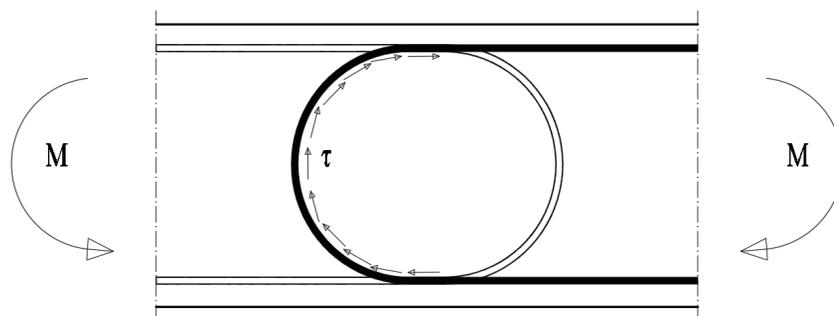


Рис. 6. Схема действия касательных напряжений по контуру ядра  
 Fig. 6. The scheme of action of tangential stresses along the core contour

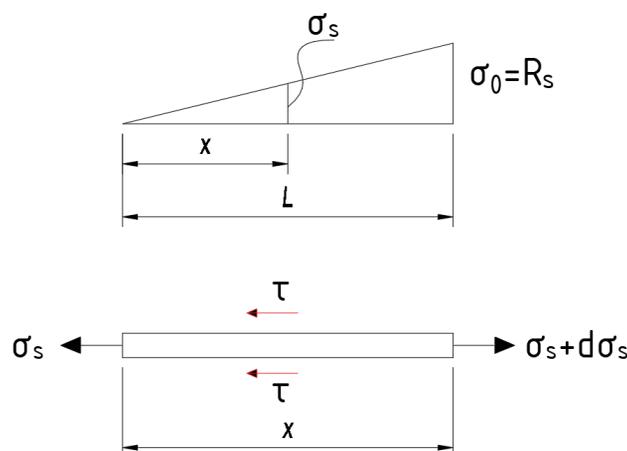


Рис. 7. Равновесие сил на единичном участке  
Fig. 7. The balance of forces in a single area

где  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматурного стержня;

$p_s$  – периметр сечения арматурного стержня;

$\tau$  – касательные напряжения сцепления;

$\sigma_s$  – напряжения в сечении арматурного стержня.

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{\tau \times p_s}{A_s} \quad (25)$$

Интегрируем по длине  $L$ :

$$\int_{\sigma_{s0}}^{\sigma_s} d\sigma_s = \int_0^L \frac{\tau \times p_s}{A_s} dx, \quad (26)$$

где  $\sigma_{s0}$  – это начальное напряжение в арматуре в начале рассматриваемого участка (при  $x = 0$ ).

Определим среднее касательное напряжение на границе контакта «сталь – бетон»:

$$\tau = \frac{A_s \times (\sigma_s - \sigma_{s0})}{L \times p_s}, \quad (27)$$

где  $L = 0,5\pi D + c_h$ .

Как уже отмечалось, максимальное напряжение в арматуре рассматриваемой зоны составляет 50 % от расчетного сопротивления арматуры. Тем самым получаем итоговую формулу:

$$\tau = 0,5 \times \frac{A_s \times R_s}{x \times p_s} \leq \tau_{bond}, \quad (28)$$

$$\tau_{bond} = \eta_1 \times \eta_2 \times R_{bt}, \quad (29)$$

где  $\tau_{bond}$  определяется аналогично  $R_{bond}$  по формуле 10.2 [18].

В случае петлевого стыка практически невозможно добиться разрушения в виде вырывания арматуры, так как длина анкеровки стержня не ограничена. Однако частичное разрушение связи может привести к повышенным деформациям.

### Сравнение методик расчета

В результате всех натурных испытаний элементов с петлевыми стыками без арматуры бетонного ядра окончательное разрушение образцов происходило от текучести арматуры вне стыка. Отметим, что в ряде испытаний, особенно растянутых образцов, наблюдались косвенные признаки нарушения целостности бетона ядра. При этом нет данных замеров характеристик напряженно-деформированного состояния бетона внутри ядра.

Для сравнительного анализа результатов расчета по описанным методикам была рассчитана балка с петлевым стыком высотой 160 мм, шириной 460 мм, расстоянием между петлями 50 мм при действии центрального растяжения, в которой наиболее ярко были выражены косвенные признаки нарушения целостности ядра (образец № 11 по [5]). Призмная прочность бетона равна 36,2 МПа, прочность арматуры – 580 МПа. По результатам натурального эксперимента [5] предельная растягивающая сила для балки равна 257 кН, что составляет 94 % от расчетной силы по [18].

В сравнительной таблице приведены показатели превышения несущей способности, которые характеризуют запасы прочности бетонного ядра и равные отношению рассчитанных по рассмотренным методикам значений к значениям, полученным при расчетах по [18] несущей способности аналогичных сечений, но со сплошной арматурой.

Видно, что в рассмотренном частном случае расчетная несущая способность бетонного ядра на контакте с арматурой при разрушении от раскалывания бетона ниже, чем от его смятия.

Расчетная несущая способность бетонного ядра на участках передачи усилий между арматурными петлями по предлагаемой методике заметно ниже, чем по методике НИИЭС Гидропроекта, и для растянутых элементов ближе к экспериментально полученным значениям.

Таблица  
Table

**Сравнение результатов расчетов  
Comparison of calculation results**

Механизм разрушения	Методика	
	НИИЭС Гидропроекта	предлагаемая
Раскалывание бетона на контакте с арматурой	1,11	–
Смятие бетона на контакте с арматурой	–	1,15
Разрушение бетона ядра на участке между петлями	1,21	0,9
Потеря анкеровки арматуры	1,59	1,91

Рассчитанная по предлагаемой методике несущая способность стыка из условия обеспечения анкеровки арматуры выше, чем эмпирическая зависимость по [1, 19].

**Выводы**

1. Отличительная особенность современных петлевых сопряжений рабочей арматуры – наличие в них неармированного бетонного ядра, которое может оказаться самым уязвимым участком стыка при передаче усилий между арматурными петлями. Возможно разрушение бетона ядра как на контакте с арматурой от раскалывания или местного смятия, так и на участке между петлями, где бетон находится в сложном напряженно-деформированном состоянии.

2. Принятая сегодня при практическом проектировании и в нормативной документации методика расчетов основана на экспериментально-теоретических исследованиях НИИЭС Гидропроекта и для статических нагрузок учитывает три возможных механизма разрушения: раскалывание ядра под петлями, срез ядра по наклонным площадкам от вторичных поперечных сил и потерю анкерующей способности петлевых выпусков с образованием шарнира.

3. На основании анализа данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к методике НИИЭС Гидропроекта. Дополнительно рассмотрен механизм возможного местного повреждения бетона от смятия, анализ участка ядра между петлями выполнен с использованием каркасно-стержневой модели и на основе экспериментальных данных предложен альтернативный вариант учета разрушения анкеровки.

4. В результате всех натурных испытаний элементов с петлевыми стыками без арматуры бетонного ядра окончательное разрушение образцов происходило от текучести арматуры вне стыка. В части испытаний наблюдались косвенные признаки нарушения целостности бетона ядра. При испытаниях не замерялись харак-

теристики напряженно-деформированного состояния бетона, поэтому нет данных для прямого сравнения рассмотренных расчетных методик физическими экспериментами.

5. Проведенный сравнительный анализ результатов расчетов испытанной центрально растянутой балки показал, что:

– в рассмотренном частном случае расчетная несущая способность бетонного ядра на контакте с арматурой при разрушении от раскалывания бетона ниже, чем от его смятия. Тем не менее представляется целесообразным в практических расчетах проведение проверки и на возможное нарушение петлевого стыка от местного смятия бетона;

– расчетная несущая способность бетонного ядра на участках между арматурными петлями по предлагаемой методике заметно ниже, чем по методике НИИЭС Гидропроекта, и для растянутых элементов ближе к экспериментальным данным. До проведения новых физических и численных экспериментов в расчетах целесообразно использовать также предлагаемую методику;

– рассчитанная по предлагаемой методике несущая способность стыка из условия обеспечения анкеровки арматуры выше, чем эмпирическая зависимость по [1, 19]. Учитывая, что практически нереально разрушение петлевого стыка от вырывания отдельных стержней арматуры, но частичное нарушение анкеровки может привести к снижению жесткости и трещиностойкости сопряжения, представляется логичным отнести расчеты по потере анкеровки ко второй группе предельных состояний.

6. Для дальнейшего развития и уточнения аналитических методик расчета бетонного ядра петлевых стыков с целью повышения их надежности и экономичности следует продолжить проведение физических и численных экспериментальных исследований.

## Список литературы

1. Климов Е.А., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета индустриальных бесшварных петлевых стыков арматуры железобетонных конструкций ГЭС и АЭС по предельным состояниям // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 5. С. 3–10.
2. Николаев В.Б., Горбов В.А., Белов А.А., Климов Е.А., Лисичкин С.Е. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций АЭС с модифицированными петлевыми стыками на крупномасштабных железобетонных моделях балочного типа // *Безопасность энергетических сооружений*. 2016. № 1. С. 66–81.
3. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Мартыанов К.В., Пряхин С.Н. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 4–11. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11>
4. Николаев В.Б., Рубин О.Д., Селезнев С.В. Расчет прочности и конструирование петлевых стыков сборных элементов // *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 38–40.
5. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Квасников А.А., Мартыанов К.В., Пугачев Б.А. Испытания элементов железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 6. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
6. Малахов В.В. Испытания балок с петлевыми стыками многократно повторяющимися нагрузками // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 60. С. 195–201.
7. Дорофеев В.С., Шеховцов И.В., Петраш С.В., Малахов В.В. Прочность и деформативность балок со стыком «Передерия». (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса) Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне, 2011. Вип. 22. С. 328–333.
8. Дорофеев В.С., Малахов В.В., Нестеренко С.С. Анализ работы петлевых стыков различных конфигураций // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2012. № 47. С. 96–102.
9. Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Петраш С.В., Шеховцов И.В. К вопросу численного исследования работы петлевого стыка // *Сборник трудов 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії*. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 252–253.
10. Дорофеев В.С., Малахов В.В. К вопросу о напряженно-деформируемом состоянии петлевых стыков изгибаемых элементов // *Вісник ОДАБА: наук.-техн. зб. – Серія: Технічні науки*. Одеса: ОДАБА, 2014. Вип. 54. С. 104–109.
11. De Lima Araújo D., Curado M.C., Rodrigues P.F. Loop connection with fibre-reinforced precast concrete components in tension. *Engineering Structures*. 2014, vol. 72, pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.032>
12. Dragosavié M., et al. Loop connections between precast concrete components loaded in bending. *HERON*. 1975, no. 20, pp. 3–36.
13. Ong K., C.G., Hao J.B., Paramasivam P. A strut-and-tie model for ultimate loads of precast concrete joints with loop connections in tension. *Construction and Building Materials*. 2006, vol. 20, no. 3, pp. 169–176.
14. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension. *Engineering Structures*. 2013, vol. 52, pp. 558–569.
15. Sørensen J.H. et al. Tensile capacity of U-bar loop connections with precast fiber reinforced dowels. *fib Symposium 2016: Performance-based approaches for concrete structures*, pp. 102–114.
16. Мамин А.Н., Бамматов А.А., Гордеев Н.С. Численное моделирование конструкций с петлевыми стыками арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 2 (106). С. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-70-79>
17. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Ernst&Sohn, 2013, 434 p.
18. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Минстрой России, 2019.
19. ГОСТ Р 70447-2022. Железобетонные конструкции с петлевыми стыками арматуры для объектов использования атомной энергии. Требования к конструированию и расчету. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
20. Киреева Э.И. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 47–51.

## References

1. Klimov E.A., Nikolaev V.B. Improvement of the method of calculation of industrial loop connections of fittings of reinforced concrete constructions of hydroelectric power station and the NPP at the limit state. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016, no. 5, pp. 3–10. (In Russian).
2. Nikolaev V.B., Gorbov V.A., Belov A.A., Klimov E.A., Lisichkin S.E. Experimental studies of reinforced concrete structures of nuclear power plants with modified loop joints on large-scale reinforced concrete models of beam type. *Safety of power structures*. 2016, no. 1, pp. 66–81. (In Russian).
3. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammатов A.A., Martyanov K.V., Pryakhin S.N. The

- loop joints of rebars. Development history, problems and relevance. *Building and Reconstruction*. 2022, no. 6 (104), pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11>
4. Nikolaev V.B., Rubin O.D., Seleznev S.V. Strength calculation and construction of loop joints of prefabricated elements. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1987, no. 1, pp. 38–40. (In Russian).
  5. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammatov A.A., Kvasnikov A.A., Martyanov K.V., Pugachev B.A. Testing of elements of reinforced concrete structures with looped joints of reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023, no. 6, pp. 24–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
  6. Malakhov V.V. Tests of beams with loop joints with repeatedly repeated loads. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015, no. 60, pp. 195–201. (In Russian).
  7. Dorofeev V.S., Shekhovtsov I.V., Petrash S.V., Malakhov V.V. Prochnost' i deformativnost' balok so stykom "Perederiya". (Odesskaya gosudarstvennaya akademiya stroitel'stva i arkhitektury, g. Odessa) *Rusursoekonomni materiali, konstruksii, budivli ta sprudi: zb. nauk. prats'*. Rivne, 2011, vol. 22, pp. 328–333. (In Russian).
  8. Dorofeev V.S., Malakhov V.V., Nesterenko S.S. Analysis of the operation of loop joints of various configurations. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2012, no. 47, pp. 96–102. (In Russian).
  9. Dorofeev V.S., Mishutin A.V., Petrash S.V., Shekhovtsov I.V. on the issue of numerous studies of the work of the loop joint. *Collection of proceedings of the 74th scientific and Technical Conference of the Academy's teaching staff*. Odessa: ODABA, 2018, pp. 252–253. (In Russian).
  10. Dorofeev V.S., Malakhov V.V. To the question of the stress-strain state of the loop joints of bent elements. *ODABA Bulletin: Scientific and Technical collection – Series: Technical sciences*. Odessa: ODABA, 2014, vol. 54, pp. 104–109. (In Russian).
  11. De Lima Araújo D., Curado M.C., Rodrigues P.F. Loop connection with fiber-reinforced precast concrete components in tension. *Engineering Structures*. 2014, vol. 72, pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.032>
  12. Dragosavić M., et al. Loop connections between precast concrete components loaded in bending. *HERON*. 1975, no. 20, pp. 3–36.
  13. Ong K.C.G., Hao J.B., Paramasivam P. A strut-and-tie model for ultimate loads of precast concrete joints with loop connections in tension. *Construction and Building Materials*. 2006, vol. 20, no. 3, pp. 169–176.
  14. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension. *Engineering Structures*. 2013, vol. 52, pp. 558–569.
  15. Sørensen J.H. et al. Tensile capacity of U-bar loop connections with precast fiber reinforced dowels. *fib Symposium 2016: Performance-based approaches for concrete structures*, pp. 102–114.
  16. Mamin A.N., Bammatov A.A., Gordeev N.S. Numerical simulation of structures with loop joints of rebar. *Building and Reconstruction*. 2023, no. 2 (106), pp. 70–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-70-79>
  17. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Ernst&Sohn, 2013, 434 p.
  18. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow: The Ministry of Construction of Russia, 2019. (In Russian).
  19. State Standard R 70447-2022. Reinforced concrete structures with loop joints of reinforcement for nuclear power facilities. Requirements for design and calculation. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
  20. Kireeva E.I. Large-panel buildings with loop joints of structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction*. 2013, no. 9, pp. 47–51. (In Russian).

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

**Александр Николаевич Мамин**✉, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела ОЗС № 1, АО «ЦНИИ-Промзданий»; профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: otozs@yandex.ru  
тел.: +7 (903) 794-64-39

**Aleksandr N. Mamin**✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of OZS No. 1 Department, JSC "TsNIIPromzdaniy"; Professor at the Department of "Reinforced Concrete and Masonry Structures", Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow  
e-mail: otozs@yandex.ru  
tel.: +7 (903) 794-64-39

**Кирилл Владимирович Авдеев**, заместитель генерального директора, главный инженер, АО «ЦНИИ-Промзданий», Москва  
e-mail: 6136133@mail.ru

**Kirill V. Avdeev**, Deputy Director General, Chief Engineer, JSC "TsNIIPromzdaniy", Moscow  
e-mail: 6136133@mail.ru

**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

**Арслан Асельдерович Бамматов**, ведущий эксперт, АО «Северсталь менеджмент», Москва  
e-mail: a.bammatof@yandex.ru

**Arslan A. Bammatov**, Leading Expert, JSC "Severstal Management", Moscow  
e-mail: a.bammatof@yandex.ru

✉ 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.В. СНИМЩИКОВ<sup>1</sup>, И.П. САВРАСОВ<sup>1,✉</sup>, Е.В. СУМАРОКОВ<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> 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

# ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АЛГОРИТМА ПРИМЕНЕНИЯ МАШИНОПОНИМАЕМЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## Аннотация

*Введение.* В современных условиях проектирование железобетонных конструкций требует оперативной обработки большого объема нормативных данных, представленных в текстовом формате. Актуальной становится задача автоматизации извлечения и анализа информации из нормативных документов, что позволяет повысить точность и эффективность проектных работ.

*Цель.* Разработка информационной модели, интегрирующей алгоритмы обработки нормативных документов (на примере СП 63.13330.2018) с системами проектирования.

*Материалы и методы.* Для обработки текстовых данных применена языковая модель Mistral, развернутая локально через Ollama. Ключевые сущности (параметры материалов, нагрузки, требования) извлекались автоматически, а их взаимосвязи визуализированы в графовой базе данных. Интеграция расчетных и проектных систем выполнена с использованием форматов IFC и XML. Реализация формул (например, расчет длины анкеровки арматуры) проведена на Python, а автоматизация подбора армирования – в среде Revit.

*Результаты.* Применение предложенного алгоритма позволило автоматизировать извлечение параметров материалов, расчетных характеристик и конструктивных требований, что существенно сокращает трудоемкость рутинных операций. Интеграция расчетной

модели с проектной средой (Revit) обеспечила автоматический подбор арматуры и сварных сеток, способствуя повышению точности проектирования и уменьшению вероятности ошибок.

*Обсуждение.* Разработанная система демонстрирует высокую эффективность в автоматизации обработки машиночитаемых нормативных документов, что приводит к сокращению времени проектирования и повышению качества строительных работ. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение алгоритма для работы с другими типами документов и адаптацию модели под специфические задачи инженерного анализа.

*Выводы.* Машинопонимаемые форматы документации и LLM-модели повышают точность и скорость обработки нормативных данных. Интеграция расчетных и проектных систем через IFC/XML сокращает трудозатраты и ошибки. Автоматизация подбора армирования демонстрирует потенциал для масштабирования на другие этапы проектирования.

**Ключевые слова:** языковая модель, машинопонимаемые документы, автоматизация проектирования, графовая база данных, интеграция моделей, нормативные документы, железобетонные конструкции, армирование, цифровая информационная модель

**Для цитирования:** Снимщиков С.В., Саврасов И.П., Сумароков Е.В. Информационная модель алгоритма применения машинопонимаемых нормативных

документов при проектировании строительных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С.16–26. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-16-26](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-16-26). EDN: ZHVRBU

#### Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

#### Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.02.2025

Поступила после рецензирования 15.03.2025

Принята к публикации 20.03.2025

**S.V. SNIMSHCHIKOV<sup>1</sup>, I.P. SAVRASOV<sup>1,✉</sup>, E.V. SUMAROKOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation" (MSTU CA), Kronshtadtsky Boulevard, 20, Moscow, 125993, Russian Federation

<sup>2</sup> 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

# INFORMATION MODEL OF THE ALGORITHM FOR THE APPLICATION OF MACHINE—READABLE NORMATIVE DOCUMENTS IN THE DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

## Abstract

*Introduction.* In modern conditions, the design of reinforced concrete structures requires prompt processing of a large amount of regulatory data presented in text format. The task of automatization of the extraction and analysis of information from regulatory documents is becoming urgent, as it makes it possible to increase the accuracy and efficiency of design work.

*Aim.* Development of the information model integrating algorithms for processing regulatory documents (using the example of SP 63.13330.2018) with design systems.

*Materials and methods.* The Mistral language model, deployed locally through Ollama, is used to process text data. Key entities (material parameters, loads, requirements) were extracted automatically, and their relationships were visualized in a graph database. The integration of the calculation and design systems is carried out using the IFC and XML formats. The formulae are implemented (for example, the calculation of the length of the reinforcement anchoring) in Python, and the automation of reinforcement selection is carried out in the Revit environment.

*Results.* The application of the proposed algorithm has made it possible to automate the extraction of material parameters, design characteristics and design

requirements, which significantly reduces the complexity of routine operations. The integration of the calculation model with the design environment (Revit) has provided automatic selection of reinforcement and welded meshes, contributing to increased design accuracy and reducing the likelihood of errors.

*Discussion.* The developed system demonstrates high efficiency in automating the processing of machine-readable regulatory documents, which leads to a reduction in design time and an improvement in the quality of construction work. Further research will be aimed at expanding the algorithm to work with other types of documents and adapting the model to specific engineering analysis tasks.

*Conclusions.* Machine-readable documentation formats and LLM models increase the accuracy and speed of processing of the regulatory data. Integration of the calculation and design systems via IFC/XML reduces labor costs and errors. Automation of reinforcement selection demonstrates the potential for scaling to other design stages.

**Keywords:** language model, machine-readable documents, design automation, graph database, model integration, regulatory documents, reinforced concrete structures, reinforcement, digital information model

**For citation:** Snimshchikov S.V., Savrasov I.P., Sumarokov E.V. Information model of the algorithm for the application of machine-readable normative documents in the design of building structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 16–26. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-16-26](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-16-26). EDN: ZHVRBU

**Authors contribution statement**

All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

**Funding**

No funding support was obtained for the research.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 06.02.2025*

*Revised 15.03.2025*

*Accepted 20.03.2025*

### Введение

Проектирование строительных конструкций требует использования значительного количества нормативных данных, представленных в текстовой форме. Для повышения эффективности применения проектных данных необходим переход к машинопонимаемому представлению нормативных документов.

**Основная цель исследования** – разработка информационной модели, которая позволяет автоматизировать процесс извлечения и визуализации сущностей из нормативно-технической документации.

### Объекты/материалы и методы исследования

Для обработки текстов нормативных документов была применена открытая языковая модель Mistral [1], обеспечивающая поиск и вычленение сущностей. Для локального развертывания модели использовался инструмент Ollama [2], который предоставляет интерфейс для работы с языковой моделью через Python. В качестве основного нормативного документа выбран СП 63.13330.2018 [3], регламентирующий проектирование железобетонных конструкций.

### Основная часть

Процесс проектирования железобетонных конструкций уже на сегодняшний день может избавить проектировщика от большинства стандартных и рутинных операций. Применение машиночитаемой и машинопонимаемой документации (цифровых стандартов) позволяет автоматизировать процесс проектирования от составления задачи до получения необходимых чертежей конструкций, в том числе в машиночитаемом виде. Рассмотрим описанное на примере.

На первом этапе, прежде чем загрузить документ в языковую модель, его необходимо разбить на цепочки текста, поскольку языковые модели имеют ограничения на объем обрабатываемой информации за одну сессию. Такой подход позволяет эффективно подготавливать данные для анализа.

Использование Mistral обеспечило автоматическое выделение ключевых сущностей, таких как параметры материалов, нагрузки, коэффициенты безопасности и конструктивные требования. Несмотря на эффективность языковой модели, этап предварительной подготовки данных остается трудоемким.

Для визуализации взаимосвязей между сущностями документа использовалась графовая база данных. Это

позволило создать наглядную модель, отображающую принципы взаимодействия между элементами нормативного документа. Такой подход помогает инженерам быстро находить связи между различными параметрами и требованиями.

Использование локально развернутой языковой модели Mistral доказало свою эффективность для задач обработки крупных текстовых массивов, обеспечивая конфиденциальность данных.

Использование машинопонимаемых нормативных документов позволяет реализовать автоматическое извлечение формул, коэффициентов и допустимых значений из нормативных документов, минимизирует трудоемкость процесса. Так, после создания графы «знания» возможно вычленишь формулы и постоянные значения, которые могут быть использованы как строго определяемые расчетные характеристики. Их можно реализовать на языке Python [4]. Например, формула расчета базовой длины анкеровки, необходимой для передачи усилия в арматуре с полным расчетным значением сопротивления  $R_s$  на бетон, определяется по формуле согласно [3, п. 10.3.24]:

$$l_{0,an} = \frac{R_s \times A_s}{R_{bond} \times u_s}, \quad (1)$$

где  $A_s$  и  $u_s$  – соответственно площадь поперечного сечения анкеруемого стержня арматуры и периметр его сечения, определяемые по номинальному диаметру стержня;

$R_{bond}$  – расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном, принимаемое равномерно распределенным по длине анкеровки [3].

Пример кода формулы (1), реализованного в Python, представлен на рис. 1.

После реализации всех формул в программном виде возможно объединить выдачу значения, запрашиваемого человеком, обработанного машиной и представленного точного ответа на базе определенного СП.

Пример программной настройки для вызова формулы анкеровки [5]:

```
tools = [
    {
        "type": "function",
        "function": {
            "name": "L0ank",
            "description": "Скажи длину анкеровки для арматуры диаметром 12 мм",
```

```
def L0ank(Rs, As, Rbond, us):
    l = (Rs * As) / (Rbond * us)
    return l
```

Рис. 1. Пример кода формулы, реализованного в Python  
Fig. 1. Sample formula code implemented in Python

```

"parameters": {
  "type": "object",
  "properties": {
    "**kwrags": {
      "type": "integer",
      "description": "Длина анкерки для арматуры
диаметром",
    },
    "unit": {
      "type": "Длина",
      "enum": ["метры"]},
    },
    "required": ["Расчетное сопротивление стали, Рас-
четное сопротивление сцепления арматуры с бето-
ном, Площадь поперечного сечения стержня, Пе-
риметр стержня"],
    },
    },
  }
}

```

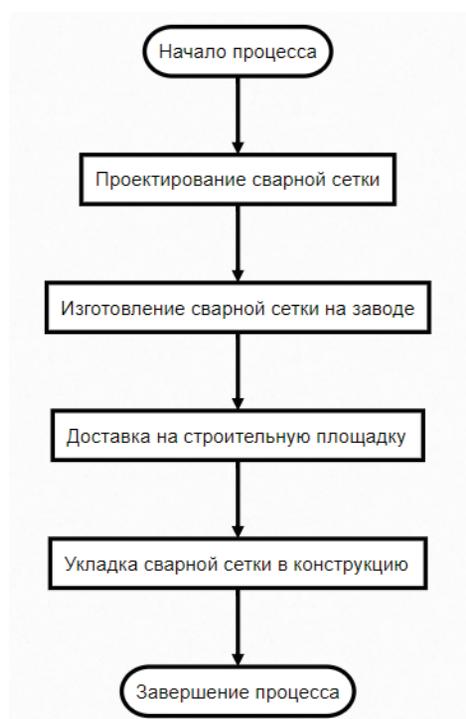
Применение разработанного алгоритма позволило:

- автоматизировать процесс извлечения ключе-  
вых данных из СП 63.13330.2018 [3];
- упростить анализ взаимосвязей между сущно-  
стями нормативного документа;
- повысить точность применения требований  
документа при проектировании.

В статье при проектировании сделан акцент на ар-  
мирование конструкции. На рис. 2 показан полный пе-  
речень арматурных работ для проектируемой железобетонной конструкции.

Процесс армирования конструкций включает в себя:

- Начало проектирования. Процесс начинается с определения конструктивных требований и поста-  
новки задач проектирования.
- Определение нагрузок. На данном этапе собира-  
ются все виды нагрузок, действующих на элемент,  
включая постоянные, временные и климатические.
- Выбор типа элемента. На основании конструктив-  
ной схемы определяется тип железобетонного элемен-  
та (например, балка, колонна или плита) [6].
- Предварительный расчет размеров. Выполняет-  
ся приблизительный расчет габаритов элемента для  
дальнейших расчетов.
- Определение усилий. Рассчитываются основные  
усилия в элементе, такие как изгибающие моменты,  
продольные силы и другие.
- Проверка прочностных требований. Размеры  
элемента проверяются на соответствие требованиям  
прочности. Если они не удовлетворяют требованиям,  
то производится корректировка размеров.
- В результате определения расчетных усилий  
подбирается арматура с необходимыми характери-  
стиками.
- Рассматривается необходимость в дополнитель-  
ном армировании для обеспечения всех расчетных  
параметров конструкции.
- Выполняется распределение стержней арматур-  
ного проката с учетом геометрии элемента и норма-  
тивных требований [7].
- Выполняется проверка по предельным состояни-



**Рис. 2.** Процесс арматурных работ  
**Fig. 2.** The process of reinforcement work

ям согласно критериям по прочности, трещиностойкости и деформативности.

– Процесс проектирования завершается при соответствии проектируемого элемента всем нормативным требованиям. При несоответствии – корректируются параметры армирования.

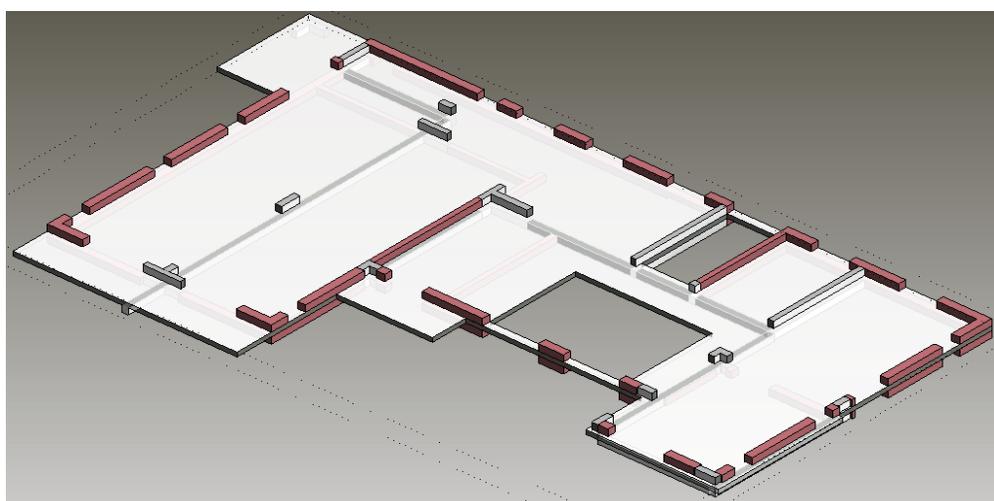
Для реализации применения машинопонимаемого стандарта в процессе проектирования зданий и сооружений необходимо создание цифровой информационной модели объекта [8]. Цифровая модель состоит из двух составляющих: расчетной и физической моделей (рис. 3 и 4).

Расчетная модель представляет собой абстракцию, в которой описаны математические зависимости и алгоритмы поведения системы для оценки харак-

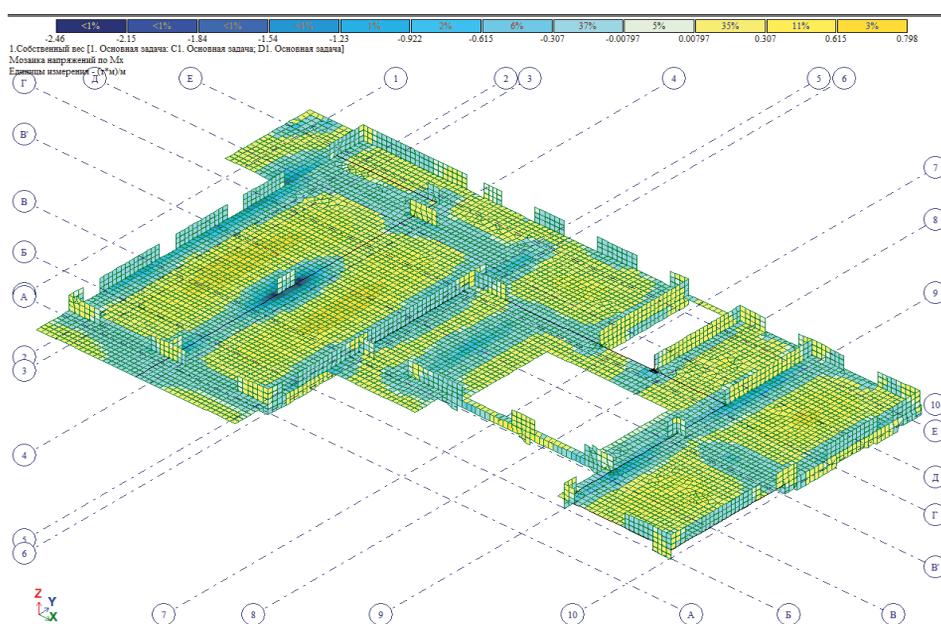
теристик объекта в различных условиях эксплуатации [9]. Для создания расчетной модели применяются методы численного моделирования, в основном метод конечных элементов (МКЭ).

Физическая модель более ориентирована на физические свойства объекта и включает данные о материалах, геометрии, механических свойствах и других характеристиках. Физическая модель используется для верификации результатов расчета.

Для успешного применения машинопонимаемых стандартов расчетная и физическая модели должны быть интегрированы, то есть должна быть обеспечена их совместимость и возможность обмена данными [10]. Одной из проблем интеграции моделей является отсутствие стандартизированных



**Рис. 3. Пример физической модели перекрытия**  
**Fig. 3. An example of a physical model of the floor**



**Рис. 4. Пример расчетной модели перекрытия**  
**Fig. 4. An example of a computational overlap model**

интерфейсов для обмена данными между расчетными и проектными системами, так как каждая система использует свой формат данных [11]. Расчетные системы могут быть ориентированы на математические модели, а системы проектирования часто работают с геометрическими данными и физическими свойствами материалов. Необходима разработка системы, которая будет обеспечивать перевод данных из расчетной системы в систему проектирования, гарантируя при этом точность и целостность информации, которая должна обеспечивать синхронизацию координат, геометрии и физических свойств объектов, а также корректную привязку расчетных результатов к проектируемым элементам.

В настоящей работе для обмена данными между расчетной и проектной системами был использован формат IFC [12]. Формат является международным стандартом для представления строительной информации и обмена данными между различными программными средствами. В этом формате хранятся данные о геометрии конструкции, расчетных характеристиках, а также результатах расчета.

В работе выполнена загрузка расчетной схемы в проектную среду ПО Revit [13], которая позволяет автоматически произвести подбор армирования в соответствии с результатами расчета. Такой подход способствует значительному сокращению времени на проектирование и повышению точности в определении необходимого количества арматуры.

Результатом интеграции расчетной схемы с проектной средой является автоматический подбор армирования, что позволяет проектировщику получить фактическую требуемую арматуру для каждого элемента конструкции.

Разработан алгоритм применения машиночитаемых нормативных документов на примере сварных сеток заводского изготовления при проектировании изгибаемых конструкций, результатом которого было выполнено объединение систем расчета и проектирования. Алгоритм позволил объединить результаты

подбора арматуры и получить фактическую требуемую арматуру в элементе [14].

Также были апробированы методы автоматизации подбора сварных сеток в сборных перемычках на базе машиночитаемого формата XML (рис. 5).

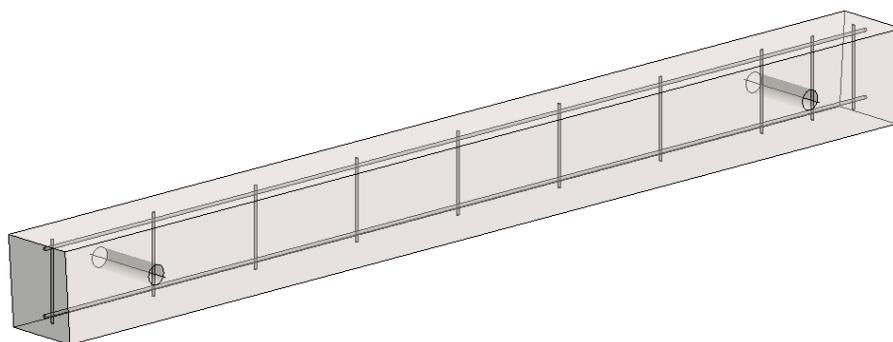
Пример чертежа конструкций для автоматического перевода в машинопонимаемый документ приведен на рис. 6.

Пример автоматического перевода спроектированного элемента для подбора перемычек проектировщиком и передачи данных поставщику или изготовителю представлен на рис. 7. Таким образом, реализована интеграция двух систем – расчетной и проектной, что позволяет проектировщику точно определить необходимое количество арматуры, соответствующее нормативным требованиям. В частности, алгоритм учитывает все характеристики сварных сеток и автоматизирует процесс их выбора, исключая необходимость вручную проводить подбор.

### Заключение

Разработанная система интеграции расчетных и проектных данных через машиночитаемые форматы IFC и XML значительно повышает эффективность и точность проектирования. Автоматизация подбора арматуры и сварных сеток, а также возможность перевода проектных данных в машиночитаемый формат для передачи поставщикам и изготовителям позволяет сократить время на проектирование, снизить вероятность ошибок и повысить точность выполнения строительных работ. Использование LLM в сочетании с графовыми базами данных открывает новые перспективы для цифровизации нормативных документов.

Внедрение таких систем в процессы проектирования и производства способствует улучшению координации между различными участниками проектного процесса и повышению качества конечного продукта. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение алгоритма для работы с другими видами документов и адаптацию модели под специфические задачи инженерного анализа.



**Рис. 5.** Перемычка 2PB16-2, выполненная в ПО Revit  
**Fig. 5.** 2PB16-2 lintel, developed in Revit software



```

▼<document>
  ▼<seria>
    <name>ПЕРЕМЫЧКИ БРУСКОВЫЕ ДЛЯ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ</name>
    <company>---</company>
    <url>---</url>
    <version>--</version>
    <email>---</email>
    ▼<categories>
      <category id="1">Общественные здания</category>
      <category id="10" parentId="1">Сборные изделия</category>
      <category id="101" parentId="10">Перемычки брусковые</category>
    </categories>
    ▼<maindoc>
      <xml>"/xxx.xml"</xml>
      <pdf>"/xxx.pdf"</pdf>
      <xlsx>"/xxx.xlsx"</xlsx>
    </maindoc>
    ▼<catalog>
      ▼<element name="2ПБ16-2">
        <categoryId>"10"</categoryId>
        <barcode>"2162"</barcode>
        <param material="Бетон">"B15"</param>
        <Q>"1000"</Q>
        <weight>65</weight>
        <dimensions>1650/120/140</dimensions>
        ▼<files>
          <ifc>"/2ПБ16-2.ifc"</ifc>
          <pdf>"/2ПБ16-2.pdf"</pdf>
          <dwg>"/2ПБ16-2.dwg"</dwg>
        </files>
      </element>
      ▼<element name="3ПБ21-8">
        <categoryId>"10"</categoryId>
        <barcode>"3218"</barcode>
        <param material="Бетон">"B15"</param>
        <Q>"1000"</Q>
        <weight>65</weight>
        <dimensions>1650/120/140</dimensions>
        ▼<files>
          <ifc>"/3ПБ21-8.ifc"</ifc>
          <pdf>"/3ПБ21-8.pdf"</pdf>
          <dwg>"/3ПБ21-8.dwg"</dwg>
        </files>
      </element>
      ▼<element name="5ПБ25-27">
        <categoryId>"10"</categoryId>
        <barcode>"4601546021298"</barcode>
        <param material="Бетон">"B15"</param>
        <Q>"1000"</Q>
        <weight>65</weight>
        <dimensions>1650/120/140</dimensions>
        ▼<files>
          <ifc>"/5ПБ25-27.ifc"</ifc>
          <pdf>"/5ПБ25-27.pdf"</pdf>
          <dwg>"/5ПБ25-27.dwg"</dwg>
        </files>
      </element>
    </catalog>
  </seria>
</document>

```

**Рис. 7.** Пример автоматического перевода спроектированного элемента для подбора перемычек проектировщиком и передачи данных поставщику или изготовителю

**Fig. 7.** An example of automatic translation of a designed element for selecting of the lintels by the designer and transmitting data to the supplier or manufacturer

## Список литературы

1. Документация по инструменту Ollama. URL: <https://ollama.ai> (дата обращения: 24.12.2024).
2. Информация о языковой модели Mistral. URL: <https://mistral.ai> (дата обращения: 24.12.2024).
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Стройиздат, 2018.
4. Mahamud I., Asif A.A., Rahman Md.M., Sarker S., Shome A.R. Python eats python: A Burmese Python (Python bivittatus) preying on a Reticulated Python (Malayopython reticulatus) in Bangladesh. *Reptiles & Amphibians*. 2024, vol. 31, no. 1, pp. e21418. DOI: <https://doi.org/10.17161/randa.v31i1.21418>
5. Лянник В.А. Сравнительный анализ методов расчета величины анкеровки арматуры для изгибаемых элементов // *Инновационная наука*. 2019. № 4. С. 215–217.
6. Баженов Ю.М. Железобетонные конструкции: Учебник для вузов. Москва: Издательство АСВ, 2017. 512 с.
7. Сетков В.И. Проектирование железобетонных конструкций. Москва: Инфра-Инженерия, 2020. 368 с.
8. ГОСТ Р 57361-2016/ISO 29481-1:2010. Информационное моделирование зданий. Часть 1: Методология и формат. Москва: Стандартинформ, 2017.
9. Тимошенко С.П. Метод конечных элементов в строительной механике. Москва: Либроком, 2015. 280 с.
10. Eastman C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Wiley, 2018, 688 p.
11. Khemlani L. Interoperability in BIM: Challenges and Opportunities. AECbytes, 2021. URL: <https://www.aecbytes.com> (дата обращения: 10.10.2023).
12. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Geneva: ISO, 2018, 54 p.
13. Autodesk Revit 2022: Официальное руководство. Москва: ДМК Пресс, 2021. 480 с.
14. Smith J. XML-Based Data Exchange in Civil Engineering. Springer, 2020, 198 p.
15. *Amphibians*. 2024, vol. 31, no. 1, pp. e21418. DOI: <https://doi.org/10.17161/randa.v31i1.21418>
16. Lyannik V.A. Comparative analysis of methods for calculating the value of reinforcement anchorage for bending elements. *Innovatsionnaya nauka*. 2019, no. 4, pp. 215–217. (In Russian).
17. Bazhenov Yu.M. Reinforced concrete structures: Textbook for universities. Moscow: ASV Publ., 2017, 512 p. (In Russian).
18. Setkov V.I. Design of reinforced concrete structures. Moscow: Infra-Engineering, 2020, 368 p. (In Russian).
19. State Standard R 57361-2016/ISO 29481-1:2010. Building information modelling. Part 1: Methodology and format. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
20. Timoshenko S.P. Method of finite elements in building mechanics. Moscow: Librocom, 2015, 280 p. (In Russian).
21. Eastman C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Wiley, 2018, 688 p.
22. Khemlani L. Interoperability in BIM: Challenges and Opportunities. AECbytes, 2021. URL: <https://www.aecbytes.com> (accessed: 10.10.2023).
23. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Geneva: ISO, 2018, 54 p.
24. Autodesk Revit 2022: The official guide. Moscow: DMK Press, 2021, 480 p. (In Russian).
25. Smith J. XML-Based Data Exchange in Civil Engineering. Springer, 2020, 198 p.

Информация об авторах /  
Information about the authors

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

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)  
тел.: +7 (499) 459-04-90

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

e-mail: [s.snimshikov@mstuca.ru](mailto:s.snimshikov@mstuca.ru)  
tel.: +7 (499) 459-04-90

**Иван Петрович Саврасов**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, помощник проректора, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

e-mail: [i.savrasov@mstuca.ru](mailto:i.savrasov@mstuca.ru)  
тел.: +7 (499) 452-47-60

**Ivan P. Savrasov**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Assistant to the Vice-rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

e-mail: [i.savrasov@mstuca.ru](mailto:i.savrasov@mstuca.ru)  
tel.: +7 (499) 452-47-60

## References

1. Documentation on the Ollama tool. URL: <https://ollama.ai> (accessed: 24.12.2024). (In Russian).
2. Information about the Mistral language model. URL: <https://mistral.ai> (accessed: 24.12.2024). (In Russian).
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow: Stroyizdat Publ., 2018. (In Russian).
4. Mahamud I., Asif A.A., Rahman Md.M., Sarker S., Shome A.R. Python eats python: A Burmese Python (Python bivittatus) preying on a Reticulated Python (Malayopython reticulatus) in Bangladesh. *Reptiles &*

**Евгений Владимирович Сумароков**, руководитель отдела информационных технологий, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: evgeni.sumarokov@yandex.ru  
тел.: +7 (495) 602-00-70

**Evgeny V. Sumarokov**, Head of Information Technology Department, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: evgeni.sumarokov@yandex.ru  
tel.: +7 (495) 602-00-70

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

## В АО «ЦНИИПромзданий» разработаны книги:



*Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин, Н.Г. Келасьев, И.А. Терехов*

**Введение в проектирование технически сложных зданий и сооружений**

Рецензенты: *В.И. Колчунов, В.И. Травуш*

**Рекомендовано РААСН** в качестве учебника для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) 08.04.01 «Строительство» (уровень магистратуры) и 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» (уровень специалитета).

В учебнике рассмотрены вопросы проектирования технически сложных зданий и сооружений преимущественно из железобетона и содержатся главы: высотные здания, большепролетные здания и сооружения, крупнопанельные здания, подземные сооружения, некоторые примеры современных конструктивных решений.

Слово «Введение..» в названии учебника подчеркивает задачу, поставленную авторами в соответствии с учебной программой, – помочь выбрать для углубленного изучения одно из приведенных направлений проектирования.



*Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин, В.С. Федоров, И.А. Терехов*

**Железобетонные конструкции (2-е издание, дополненное и переработанное)**

Рецензенты: *В.И. Колчунов, В.И. Травуш*

**Рекомендовано РААСН** в качестве учебника для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата) и 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» (уровень специалитета).

Учебник состоит из двух частей и базируется на требованиях СП 63.13330.

### **1 часть. Расчет конструкций**

В первой части приведены с пояснениями физико-механические характеристики бетона, арматуры и железобетона, общие положения по расчету железобетонных конструкций, расчет по предельным состояниям первой и второй групп, а также по группе особых предельных состояний, проектирование предварительно напряженных конструкций и основы расчета на динамические воздействия. Методы расчета проиллюстрированы примерами.

### **2 часть. Проектирование зданий и сооружений**

Вторая часть содержит исходные данные и общие положения по проектированию железобетонных конструкций зданий, основы проектирования сборных одноэтажных промышленных и универсальных многоэтажных зданий из сборного и монолитного железобетона, инженерных сооружений и тонкостенных пространственных покрытий, расчет защиты от прогрессирующего обрушения, а также учет при проектировании доэксплуатационной стадии работы конструкций и основные положения технологии информационного моделирования (ТИМ).

Приобрести книги можно в ООО «Издательство АСВ».

УДК 391.327.32

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42)

**С.С. КАПРИЕЛОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД<sup>1,2,✉</sup>, Н.И. КАРПЕНКО<sup>3</sup>,  
Н.М. СЕЛЮТИН<sup>1,4</sup>, Г.А. МОИСЕЕНКО<sup>3</sup>, И.М. БЕЗГОДОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> 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

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

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

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

# ВЛИЯНИЕ ВИДА ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ФИЗИКО— ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

## Аннотация

*Введение.* Представлены результаты исследований высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем с различным видом заполнителя, которые показывают, что пониженная средняя плотность и возможность изменения модуля упругости в широком диапазоне делают высокопрочные легкие бетоны предпочтительным конструкционным материалом, позволяющим снизить массу и сократить расход арматуры железобетонных конструкций высотных зданий, мостов и путепроводов, а также сооружений, возводимых в сейсмоопасных регионах.

*Цель.* Сравнительная оценка влияния вида заполнителя из плотных горных пород и легких пористых материалов на среднюю плотность, прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем – цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов.

*Материалы и методы.* Все цементные системы изготавливали с использованием модифицированного высокопрочного цементного камня одинакового качества на основе портландцемента и органоминерального модификатора типа МБ в количестве 24 % массы цемента с истинным водовяжущим отношением 0,25. При производстве бетонов применяли заполнители из плотных горных пород (кварцевый песок, гранитный

и базальтовый щебень) и легких пористых материалов искусственного (керамзитового гравия) и природного (туфовый щебень) происхождения.

*Результаты.* Определены прочностные (кубиковая и призмная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики шести высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем классов по прочности на сжатие В64–В88 с широким диапазоном средней плотности (от 1842 до 2497 кг/м<sup>3</sup>) с использованием стандартизированных и специальных методик. Сопротивление бетонов осевому сжатию находится в диапазоне 55,2–78,4 МПа и значительно превосходит нормативные значения по СП 63.13330.2018. Предельные относительные деформации высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие. Введение в цементную систему легких пористых заполнителей вместо заполнителей из плотных горных пород позволило получить высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В64–В72 с пониженной на 17–26 % средней плотностью и модулем упругости 29,5–33,9 МПа.

*Выводы.* Варьирование видом и объемом используемых заполнителей позволяет получать высокопрочные

самоуплотняющиеся легкие, мелкозернистые и тяжелые бетоны классов В60–В100 марок по средней плотности D1800–D2500 с регулируемыми деформационными характеристиками.

**Ключевые слова:** высокопрочная цементная система, модифицированный цементный камень, мелкозернистый бетон, тяжелый бетон, легкий бетон, самоуплотняющийся бетон, прочность на сжатие, модуль упругости, диаграмма деформирования, предельные относительные деформации сжатия

**Для цитирования:** Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодков И.М. Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 27–42. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO

#### Вклад авторов

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

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

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

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

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

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

#### Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 20.02.2025*

*Поступила после рецензирования 28.03.2025*

*Принята к публикации 03.04.2025*

**S.S. KAPRIELOV<sup>1,2</sup>, A.V. SHEYNFELD<sup>1,2,✉</sup>, N.I. KARPENKO<sup>3</sup>,  
N.M. SELYUTIN<sup>1,4</sup>, G.A. MOISEENKO<sup>3</sup>, I.M. BEZGODOV<sup>2</sup>**

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

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

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

<sup>4</sup> LLC "Master Concrete Enterprise", Saratovskaya str., 31, Moscow, 109518, Russian Federation

# THE INFLUENCE OF THE TYPE OF AGGREGATES ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING CEMENT SYSTEMS

#### Abstract

*Introduction.* The results of studies of high-strength self-compacting cement systems with various types of aggregate are presented, that show that the reduced

average density and the possibility of changing the modulus of elasticity in a wide range make high-strength lightweight concretes the preferred structural material, allowing to reduce the weight and the consumption

of reinforcement of reinforced concrete structures of high-rise buildings, bridges and overpasses, as well as buildings being built in earthquake-prone regions.

**Aim.** Comparative assessment of the effect of the type of aggregate of dense rocks and light porous materials on the average density, strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting cement systems – cement stone, fine-grained, heavy and light concrete.

**Materials and methods.** All cement systems were manufactured using modified high-strength cement stone of the same quality based on Portland cement and an organomineral modifier of the MB type in an amount of 24 % by weight of cement with a true water-binding ratio of 0.25. Aggregates of dense rocks (quartz sand, granite and basalt crushed stone) and light porous materials of artificial (expanded clay gravel) and natural (tuff crushed stone) origin were used in the production of concrete.

**Results.** The strength (cubic and prismatic compressive strength) and deformation (initial modulus of elasticity, Poisson ratio and maximum relative compression deformations) characteristics of six high-strength self-compacting cement systems of compressive strength classes B64–B88 with a wide range of average density (from 1842 to 2497 kg/m<sup>3</sup>) were determined using standardized and special techniques. The resistance of concrete to axial compression is in the range of 55.2–78.4 MPa and significantly exceeds the regulatory values for SP 63.13330.2018. The maximum relative deformations of high-strength concretes depend more on the volume content of cement stone than on the type of aggregate and compressive strength. The introduction of light porous aggregates into the cement system instead of aggregates from dense rocks made it possible to obtain high-strength self-compacting lightweight concretes of classes B64–B72 with an average density reduced by 17–26 % and an elastic modulus of 29.5–33.9 MPa.

**Conclusions.** Varying the type and volume of aggregates used makes it possible to obtain high-strength self-compacting light, fine-grained and heavy concretes of classes B60–B100 grades of average density D1800–D2500 with adjustable deformation characteristics.

**Keywords:** high-strength cement system, modified cement stone, fine-grained concrete, heavy concrete, light concrete, self-compacting concrete, compressive strength, modulus of elasticity, deformation diagram, marginal relative compression deformations

**For citation:** Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. The influence of the type of aggregates on the physical and technical characteristics of high-strength self-compacting cement systems. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 27–42. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO

#### Authors contribution statement

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

Sheynfeld A.V. – supervised the experiment and analyzed the obtained results.

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

Selyutin N.M. – carried out experimental work and analyzed the obtained results.

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

Bezgodov I.M. – carried out experimental work and analyzed diagrams of deformation of cement systems.

#### Funding

No funding support was obtained for the research.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.02.2025

Revised 28.03.2025

Accepted 03.04.2025

### Введение

Увеличение объемов строительства уникальных сооружений, к которым, в частности, относятся высотные здания, мосты и путепроводы, так же, как проблема обеспечения сейсмостойкости современных зданий, возводимых в сейсмоопасных регионах, требует применения высокопрочных технологичных бетонов пониженной плотности с управляемыми деформационными характеристиками [1–4].

Высокий модуль упругости (40–56 ГПа) тяжелых бетонов классов В60–В100 позволяет повысить жесткость вертикальных конструкций, сократить расход арматуры и снизить перемещения высотных зданий от ветрового воздействия [5]. Однако высокая средняя плотность тяжелых бетонов (2360–2500 кг/м<sup>3</sup>) повышает долю собственного веса в нагрузках, воспринимаемых конструкциями, и ограничивает строительство большепролетных строений и массивных сооружений на слабых грунтах.

Пониженная средняя плотность (1800–2000 кг/м<sup>3</sup>) и высокая прочность, соответствующая классам В50–В70, делают самоуплотняющиеся легкие бетоны предпочтительным конструкционным материалом, позволяющим снизить массу сооружений, сократить расход арматуры и др. [2, 3, 6–10]. Несмотря на то, что появились технологические возможности получения таких бетонов, основанные на последних достижениях в области модифицирования цементных систем – получения высокопрочного цементного камня [2, 11–13], остаются вопросы, связанные с выбором заполнителей, а также с определением нормативных характеристик, необходимых для расчета и проектирования конструкций.

С учетом вышесказанного **целью** работы являлась сравнительная оценка влияния вида заполнителя из плотных горных пород и легких пористых материалов искусственного и природного происхождения, доступных для стройиндустрии РФ, на среднюю плотность, прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем – цементного камня, мелкозернистого, тяжелого и легкого бетонов.

### Материалы и методы

Для изготовления высокопрочных цементных систем в лабораторных условиях использовали материалы (портландцемент, органоминеральный модификатор, песок, щебень или гравий), которые массово производятся в РФ и применяются при производстве бетонных смесей для различных объектов строительства. В качестве мелкого заполнителя во всех составах использовался кварцевый песок. В качестве крупного заполнителя использованы разновидности крупного заполнителя как из плотных горных пород (гранитный и базальтовый щебень), так и легкие пористые заполнители (искусственный – керамзитовый гравий, природный – туфовый

щебень). Основанием для выбора мелкого и четырех разных видов крупного заполнителя являлись различия в их происхождении, в средней плотности, модуле упругости и в параметре, характеризующем прочность – «потеря массы при сжатии в цилиндре» [14–17], которые позволяют получить высокопрочные цементные системы (цементный камень, мелкозернистый, тяжелый и легкий бетоны) из самоуплотняющихся смесей [5, 6].

Характеристики используемых материалов:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5 ЖИ с нормальной густотой 24,8 %, истинной плотностью 3100 кг/м<sup>3</sup>, производства завода «Пролетарий» АО «Новоросцемент», соответствующий требованиям ГОСТ Р 55224-2020 [18];

– органоминеральные модификаторы бетона МБ6-50С А-II-3 и МБ10-50С А-II-2 истинной плотностью 2200 кг/м<sup>3</sup>, включающие в себя микрокремнезем (47 и 45 %), золу-уноса (47 и 45 %) и суперпластификатор (в пересчете на сухое вещество 6 и 10 %) [19], производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующие требованиям ГОСТ Р 56178-2014 [20];

– песок кварцевый I класса с модулем крупности  $M_{кр} = 2,42$ , истинной плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости 55\* ГПа, производства ГОК «Орешки», соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [21];

– щебень гранитный фракции 5–10 мм, марки по дробимости 1200, истинной плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости 60\* ГПа, производства карьера «Микашевичи», соответствующий требованиям ГОСТ 8267-93 [14];

– щебень базальтовый фракции 4–8 мм, производства карьера «Булатовский базальт», марки по дробимости 1400, истинной плотностью 3000 кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости 80\* ГПа, соответствующий требованиям ГОСТ 32703-2014 [15];

– гравий керамзитовый фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, средней плотностью 1460 кг/м<sup>3</sup>, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия», соответствующий требованиям ГОСТ 32496-2013 [16];

– щебень туфовый фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, средней плотностью 1720 кг/м<sup>3</sup>, месторождения «Святогорское» Хабаровского края, соответствующий требованиям ГОСТ 22263-76 [17];

– вода для затворения бетонных смесей, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 [22].

\* Модули упругости заполнителей из плотных горных пород приняты по усредненным данным [23–25].

**Составы и свойства смесей**

В лабораторных условиях из вышеуказанных материалов были приготовлены шесть составов высокопрочных цементных систем (цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов) из самоуплотняющихся смесей с добавкой модификатора МБ в количестве 24 % от массы цемента при истинном (с учетом водопотребности легкого пористого заполнителя) водовязущем отношении  $V/(Ц+МБ) = 0,25$ .

Использование при производстве смесей цементного камня одного качества позволяет оценить влияние различных видов заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем.

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей цементных систем представлены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1  
Table 1**

**Составы самоуплотняющихся смесей  
Compositions of self-compacting mixtures**

№ состава	Составы самоуплотняющихся смесей цементных систем, кг/м <sup>3</sup> / м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>							
	Ц	МБ	П	Щ <sub>гр</sub>	Щ <sub>баз</sub>	Г <sub>кер</sub>	Щ <sub>туф</sub>	В
1	1336	321 <sup>1</sup>	–	–	–	–	–	414
	0,431	0,146	–	–	–	–	–	0,414
2	795	193 <sup>2</sup>	988	–	–	–	–	247
	0,256	0,088	0,373	–	–	–	–	0,247
3	497	120 <sup>2</sup>	787	787	–	–	–	157
	0,160	0,055	0,297	0,291	–	–	–	0,157
4	510	123 <sup>2</sup>	900	–	807	–	–	161
	0,165	0,056	0,340	–	0,269	–	–	0,161
5	487	119 <sup>2</sup>	569	–	–	569	–	169
	0,157	0,054	0,215	–	–	0,390	–	0,169
6	538	130 <sup>2</sup>	631	–	–	–	584	176
	0,157	0,054	0,215	–	–	–	0,340	0,176

Примечания:

Ц – портландцемент; МБ – органоминеральный модификатор: <sup>1</sup>)МБ6-50С А-II-3 и <sup>2</sup>)МБ10-50С А-II-2; П – песок; Щ<sub>гр</sub> – гранитный щебень; Щ<sub>баз</sub> – базальтовый щебень; Г<sub>кер</sub> – гравий керамзитовый; Щ<sub>туф</sub> – туфовый щебень; В – вода.

**Таблица 2  
Table 2**

**Свойства самоуплотняющихся смесей  
Properties of self-compacting mixtures**

№ состава	Свойства смесей цементных систем				
	РК, см	ρ, кг/м <sup>3</sup>	V <sub>ист</sub> , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	V <sub>цк</sub> , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	В/(Ц+МБ)
1	76	2071	0,991	0,991	0,25
2	72	2223	0,964	0,591	0,25
3	62	2348	0,960	0,372	0,25
4	68	2501	0,990	0,381	0,25
5	65	1913	0,985	0,380	0,28
6	57	2059	0,986	0,409	0,26

Примечания:

РК – расплив нормального конуса; ρ – средняя плотность смеси; V<sub>ист</sub> – объем цементной системы без технологических пор ( $V_{ист} = V_{цк} + V_{заполн}$ ); V<sub>цк</sub> – объем цементного камня в составе смеси ( $V_{цк} = V_{Ц} + V_{МБ} + V_{воды}$ ); В/(Ц+МБ) – водовязущее отношение.

Смеси изготавливались в смесителе принудительного действия объемом 0,025 м<sup>3</sup> с перемешиванием в течение 5 мин. Результаты испытаний смесей показали (табл. 2), что их средняя плотность ( $\rho$ ) зависит от объема и плотности заполнителя и изменяется в широком диапазоне – от 1914 до 2500 кг/м<sup>3</sup>, в том числе:

- цементный камень (без заполнителя) – 2071 кг/м<sup>3</sup>;
- мелкозернистый бетон на кварцевом песке – 2223 кг/м<sup>3</sup>;
- тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном или базальтовом щебне – 2348 и 2501 кг/м<sup>3</sup>;
- легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии или туфовом щебне – 1913 и 2059 кг/м<sup>3</sup>.

Подвижность всех смесей, определенная по расплыву нормального конуса по ГОСТ Р 59715-2022 [26], находится в диапазоне от 57 до 76 см. Это позволяет, учитывая также отсутствие признаков водоотделения и расслоения смесей, согласно ГОСТ Р 59714-2021 [27], отнести их к категории самоуплотняющихся.

#### Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных смесей формовались образцы: кубы размером 100 × 100 × 100 мм в количестве 6 шт. для определения кубиковой прочности на сжатие по ГОСТ 10180-2012 [28] и ГОСТ 31914-2012 [29]; призмы размером 100 × 100 × 400 мм в количестве 3 шт. для определения призмной прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона по ГОСТ 24452-2023 [30]; призмы размером 70,7 × 70,7 × 280 мм в количестве 3 шт. для установления полных диаграмм деформирования цементных систем по методике [31, 32].

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

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

С учетом того, что цементные системы содержат различный объем вовлеченного воздуха, для оценки влияния вида заполнителя на модуль упругости бетона определялись истинные значения модуля упругости затвердевшей системы без технологической пористости по формуле:

$$E_{ист} = E_b \times V_b / V_{ист}, \quad (1)$$

где E<sub>ист</sub> – модуль упругости цементной системы без технологической пористости, ГПа;

E<sub>b</sub> – модуль упругости цементной системы с технологической пористостью, определенный по ГОСТ 24452-2023 [30], ГПа;

V<sub>b</sub> – объем цементной системы с технологической пористостью, равный 1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

V<sub>ист</sub> – объем цементной системы без технологической пористости, определяемый как сумма объемов всех компонентов смеси, входящих в систему, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Фактический класс цементных систем по прочности на сжатие (B<sub>ф</sub>) и сопротивление осевому сжатию (R<sub>bn</sub>) определялись в соответствии с ГОСТ 18105-2018 [33] с учетом требований ГОСТ 31914-2012 [29] к минимальному значению коэффициентов вариации и требуемой прочности по формулам:

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

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

где B<sub>ф</sub> – фактический класс цементной системы по прочности на сжатие, МПа;

R – кубиковая прочность цементной системы на сжатие, МПа;

R<sub>bn</sub> – сопротивление цементной системы осевому сжатию, МПа;

R<sub>b</sub> – призмная прочность цементной системы на сжатие, МПа;

K<sub>T</sub> – коэффициент требуемой прочности, принимаемый равным 1,14 в случае определения прочности по контрольным образцам в соответствии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [29];

V – коэффициент вариации прочности цементной системы, принимаемый равным 10 % в случае определения прочности по контрольным образцам в соответствии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [29].

#### Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний цементных систем по показателям: средняя плотность ( $\rho$ ) и марка по средней плотности (D), кубиковая прочность (R) и фактический класс по прочности на сжатие (B<sub>ф</sub>), призмная прочность (R<sub>b</sub>) и сопротивление осевому сжатию (R<sub>bn</sub>), модуль упругости (E<sub>b</sub>), коэффициент Пуассона ( $\nu_b$ ), предельная относительная деформация сжатия ( $\epsilon_{b0}$ ), представлены в табл. 3, а полные диаграммы деформирования цементных систем на рис. 1.

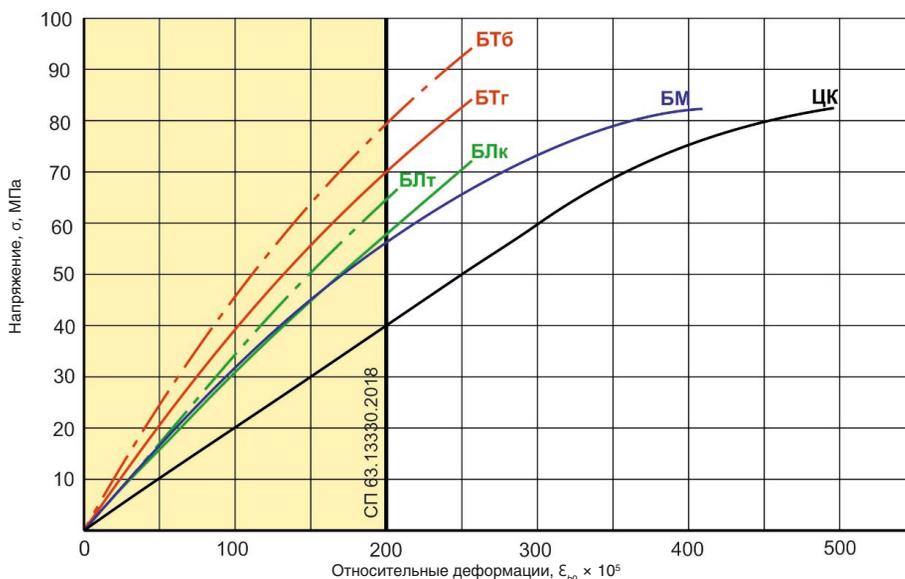
Таблица 3  
Table 3

Прочностные и деформационные характеристики цементных систем  
Strength and deformation characteristics of cement systems

№ состава	Прочностные и деформационные характеристики цементных систем					
	$\rho/D$ , кг/м <sup>3</sup>	$R/B_{\phi}$ , МПа	$R_b/R_{bn}$ , МПа	$E_b/E_{ист}$ , ГПа	$\nu_b$	$\epsilon_{b0} \times 10^5$
1	2063	96,7	82,9	21,0	0,27	493
	D2100	$B_{\phi}85$	69,3	21,2		
2	2219	90,2	81,3	30,7	0,18	407
	D2300	$B_{\phi}79$	68,0	31,9		
3	2360	93,7	83,8	40,0	0,20	252
	D2400	$B_{\phi}82$	70,1	41,7		
4	2497	100,5	93,8	47,0	0,25	258
	D2500	$B_{\phi}88$	78,4	47,5		
5	1842*	83,0	73,9	29,5	0,23	263
	D1900	$B_{\phi}72$	61,8	29,8		
6	1948*	73,7	66,0	33,9	0,23	210
	D2000	$B_{\phi}64$	55,2	34,4		

Примечания:

$\rho$  – средняя плотность (\*средняя плотность в сухом состоянии);  $D$  – марка по средней плотности;  $R$  – кубиковая прочность на сжатие;  $B_{\phi}$  – фактический класс по прочности на сжатие;  $R_b$  – призмная прочность на сжатие;  $R_{bn}$  – сопротивление осевому сжатию;  $E_b$  – начальный модуль упругости;  $E_{ист}$  – начальный модуль упругости без технологических пор;  $\nu_b$  – коэффициент Пуассона;  $\epsilon_{b0}$  – предельная относительная деформация сжатия.



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
- БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
- БТ<sub>Г</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
- БТ<sub>6</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
- БЛ<sub>к</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
- БЛ<sub>т</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 1. Диаграммы деформирования высокопрочных цементных систем  
Fig. 1. Deformation diagrams of high-strength cement systems

**Средняя плотность**

Введение в цементные системы различных видов заполнителя приводит к значительным изменениям их средней плотности от 1842 кг/м<sup>3</sup> (легкий бетон на керамзитовом гравии) до 2497 кг/м<sup>3</sup> (тяжелый бетон на базальтовом щебне), что соответствует их маркам по средней плотности от D1900 до D2500 (табл. 3).

Введение в цементную систему легких пористых заполнителей (туфового щебня и керамзитового гравия) вместо заполнителей из плотных горных пород (гранитного и базальтового щебня) позволяет понизить среднюю плотность высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на 17–26 % (рис. 2).

**Прочность на сжатие**

Кубиковая прочность на сжатие (*R*) всех цементных систем в возрасте 100–110 суток находится в диапазоне от 73,7 до 100,5 МПа, соответствует фактическим классам бетона по прочности на сжатие от В<sub>ф</sub>64 до В<sub>ф</sub>88 (табл. 3, рис. 3), что позволяет отнести их к высокопрочным бетонам, в том числе:

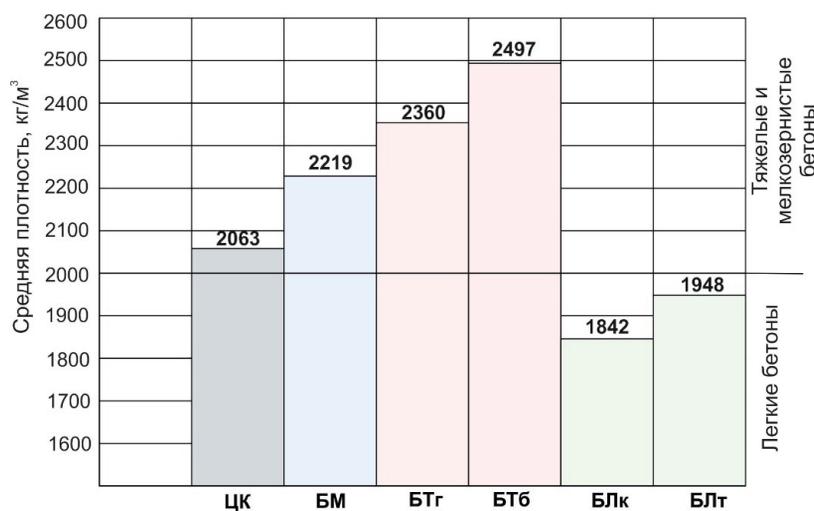
- цементный камень марки по средней плотности D2100 имеет прочность на сжатие 96,7 МПа, что соответствует классу В<sub>ф</sub>85;
- мелкозернистый бетон (на кварцевом песке) марки по средней плотности D2300 имеет прочность на сжатие 90,2 МПа, что соответствует классу В<sub>ф</sub>79;
- тяжелые бетоны (на гранитном и базальтовом щебне) марок по средней плотности D2400 и D2500 имеют прочность на сжатие 93,7 и 100,5 МПа, что соответствует классам В<sub>ф</sub>82 и В<sub>ф</sub>88;

– легкие бетоны (на керамзитовом гравии и туфовом щебне) марок по средней плотности D1900 и D2000 имеют прочность на сжатие 83,0 и 73,7 МПа, что соответствует классам В<sub>ф</sub>72 и В<sub>ф</sub>64 и на 65–80 % превышает максимальное значение класса (В40) для легкого бетона с маркой по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [34].

Призменная прочность (*R<sub>b</sub>*) цементных систем на сжатие в возрасте 100–110 суток находится в диапазоне от 66,0 до 93,8 МПа. Оценка вышеприведенных результатов по критерию коэффициента призменной прочности, определяемого отношением призменной прочности бетона на сжатие к кубиковой ( $K_{пр} = R_b/R$ ), показывает, что его фактические значения находятся в диапазоне от 0,86 до 0,93 и превосходят значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 [34] (от 0,71 до 0,73).

**Предельные относительные деформации сжатия**

Полные диаграммы деформирования при сжатии показывают (рис. 1), что нисходящая ветвь у всех высокопрочных цементных систем отсутствует. Это соответствует результатам, полученным для высокопрочных тяжелых бетонов в [5, 35]. Предельные относительные деформации сжатия высокопрочных цементных систем классов В<sub>ф</sub>64–В<sub>ф</sub>88 находятся в широком диапазоне от  $210 \times 10^{-5}$  до  $493 \times 10^{-5}$  и превышают нормативное значение  $200 \times 10^{-5}$ , приведенное в СП 63.13330.2018 [34].



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
- БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
- БТ<sub>г</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
- БТ<sub>б</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
- БЛ<sub>к</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
- БЛ<sub>т</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

**Рис. 2.** Влияние вида заполнителя на среднюю плотность цементных систем  
**Fig. 2.** Influence of the type of aggregate on the average density of cement systems

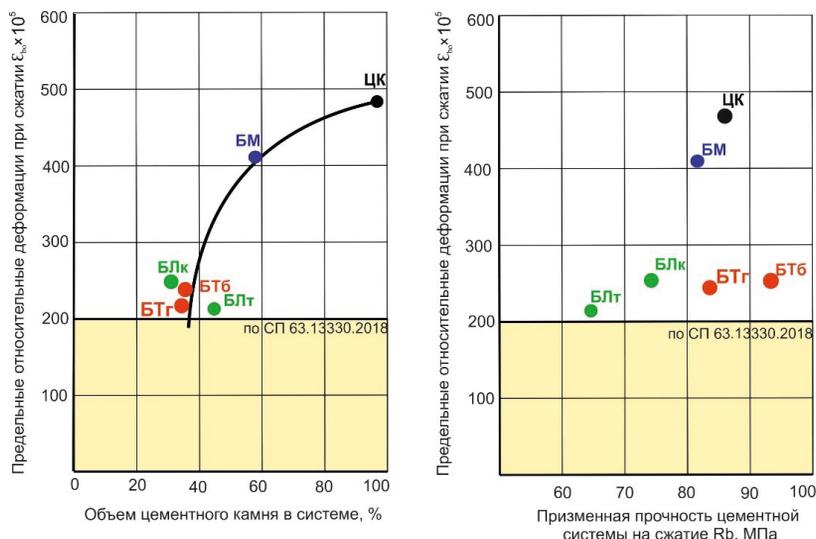
Следует отметить, что наибольшей деформативностью («податливостью») обладает цементный камень, предельные относительные деформации которого ( $493 \times 10^{-5}$ ) в 2,5 раза превышают нормативное значение. Таким образом, предельные относитель-

ные деформации высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания в них цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие (рис. 4).



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
- БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
- БТ<sub>г</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
- БТ<sub>б</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
- БЛ<sub>к</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
- БЛ<sub>т</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 3. Влияние вида заполнителя на прочность цементных систем на сжатие  
 Fig. 3. Influence of the type of aggregate on the compressive strength of cement systems



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
- БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
- БТ<sub>г</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
- БТ<sub>б</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
- БЛ<sub>к</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
- БЛ<sub>т</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 4. Влияние объема цементного камня на предельные относительные деформации высокопрочных цементных систем  
 Fig. 4. The effect of the volume of cement stone on the ultimate relative deformations of high-strength cement systems

Предельные относительные деформации при сжатии мелкозернистого бетона с призменной прочностью 81,3 МПа принимают повышенные значения  $407 \times 10^{-5}$ , что связано с высоким ( $0,591 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) объемным содержанием цементного камня в его составе. У тяжелых и легких бетонов с призменной прочностью 83,8–93,8 МПа и 66,0–73,9 МПа с примерно одинаковым объемом цементного камня ( $0,372\text{--}0,409 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) предельные относительные деформации при сжатии находятся в узком диапазоне – от  $210 \times 10^{-5}$  до  $263 \times 10^{-5}$ .

### Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона высокопрочных цементных систем классов  $V_{\phi}64\text{--}V_{\phi}88$  находится в диапазоне от 0,18 (мелкозернистый бетон) до 0,27 (цементный камень). В целом, коэффициент Пуассона для тяжелых и легких высокопрочных бетонов находится в диапазоне 0,2–0,25, соответствует ранее полученным результатам [5] и нормативному значению коэффициента поперечных деформаций  $\nu_{b,p} = 0,2$  по СП 63.13330.2018 [34].

### Модуль упругости

Начальный модуль упругости высокопрочных цементных систем классов  $V_{\phi}64\text{--}V_{\phi}88$  находится в широком диапазоне – от 21 до 47 ГПа (табл. 3, рис. 5), в значительной степени зависит от объема цементного камня в составе бетона и вида используемого заполнителя.

Полученные результаты (рис. 5) показывают, что:

- цементный камень класса  $V_{\phi}85$  и марки по средней плотности D2100 имеет наименьший модуль упругости – 21 ГПа;
- мелкозернистый бетон (на кварцевом песке)

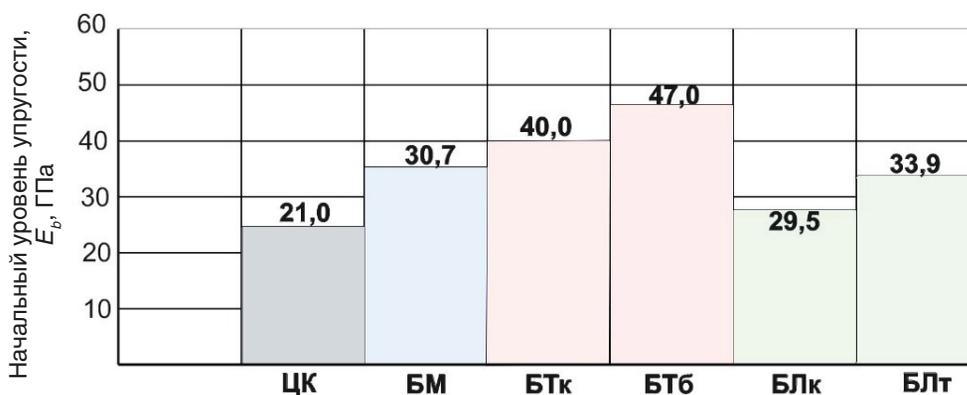
класса  $V_{\phi}79$  и марки по средней плотности D2300 с объемом цементного камня  $0,591 \text{ м}^3/\text{м}^3$  имеет более высокий модуль упругости – 30,7 ГПа;

- тяжелые бетоны (на гранитном и базальтовом щебне) классов  $V_{\phi}82$  и  $V_{\phi}88$  соответственно, марок по средней плотности D2400 и D2500 с объемом цементного камня 0,372 и  $0,381 \text{ м}^3/\text{м}^3$  имеют наибольший модуль упругости – 40 и 47 ГПа, что в два раза выше, чем модуль упругости цементного камня;

- легкие бетоны (на керамзитовом гравии и туфовом щебне) классов  $V_{\phi}72$  и  $V_{\phi}64$  соответственно, марок по средней плотности D1900 и D2000 с объемом цементного камня 0,380 и  $0,409 \text{ м}^3/\text{м}^3$  имеют модуль упругости 29,5 и 33,9 ГПа, что на 37–58 % превышает максимальное значение модуля упругости (21,5 ГПа) для легкого бетона класса B40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [34].

Таким образом, с учетом данных [6], показано, что с использованием легких пористых заполнителей искусственного (керамзитовый гравий) и природного (туфовый щебень) происхождения возможно получение высокопрочных самоуплотняющихся конструктивных легких бетонов классов B50–B70 с маркой по средней плотности D1800–D2000 и с широким диапазоном начального модуля упругости 25–35 ГПа.

С использованием полученных результатов (табл. 2 и 3) проведена оценка достоверности расчета начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него цементного камня и заполнителей из плотных горных пород (кварцевого песка, гранитного и базальтового щебня) по формуле [5]:



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
- БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
- БТ<sub>г</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
- БТ<sub>б</sub> – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
- БЛ<sub>к</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
- БЛ<sub>т</sub> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

**Рис. 5.** Влияние вида заполнителя на начальный модуль упругости цементных систем  
**Fig. 5.** Influence of the type of aggregate on the initial modulus of elasticity of cement systems

$$E_{bp} = E_{цк} \times V_{цк} + E_n \times V_n + E_{щ} \times V_{щ}, \quad (4)$$

где  $E_{bp}$  – расчетное значение модуля упругости бетона, ГПа;

$E_{цк}$ ,  $E_n$  и  $E_{щ}$  – модули упругости цементного камня, песка и щебня соответственно, ГПа;

$V_{цк}$ ,  $V_n$  и  $V_{щ}$  – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне соответственно, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Результаты оценки (табл. 4) показывают, что представленную формулу можно использовать для определения начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него цементного камня и заполнителей, так как погрешность вычислений не превышает 4 %.

С учетом положительной оценки формулы (4) произведен расчет значений модуля упругости легких пористых заполнителей керамзитового гравия и туфового щебня в высокопрочном легком бетоне по формуле:

$$E_{лз} = (E_{ист} - V_{цк} \times E_{цк} - V_n \times E_n) / V_{лз}, \quad (5)$$

где  $E_{лз}$  – расчетное значение модуля упругости легкого заполнителя (керамзитового гравия или туфового щебня) в бетоне, ГПа;

$E_{ист}$ ,  $E_{цк}$  и  $E_n$  – модули упругости легкого бетона без технологических пор, цементного камня и песка соответственно, ГПа;

$V_{цк}$ ,  $V_n$  и  $V_{лз}$  – удельные объемы цементного камня, песка и легкого заполнителя (керамзитового гравия

или туфового щебня) в бетоне соответственно, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Результаты расчетов (табл. 5) показывают, что значения модуля упругости легких пористых заполнителей в высокопрочном легком бетоне составляют:

– 26,0 ГПа – для керамзитового гравия фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» и превышает диапазон значений 2–18,5 ГПа, полученных в [36, 37];

– 37,0 ГПа – для туфового щебня фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, месторождения «Святогорское» Хабаровского края и находится в диапазоне значений 19–88 ГПа, полученных в [38, 39].

Повышенное значение модуля упругости легких пористых заполнителей (керамзитового гравия и туфового щебня) может быть обусловлено их высокой плотностью (М800 и М1000), а также тем, что в процессе испытаний легкого бетона зерна заполнителя находятся в «обойме» из высокопрочного мелкозернистого бетона, который ограничивает их поперечные и продольные деформации.

Таким образом, варьирование видом и объемом используемых заполнителей из плотных горных пород и легких пористых материалов, обладающих различной средней плотностью, прочностью и модулем упругости, позволяет управлять в широком диапазоне средней плотностью и модулем упругости конструктивных высокопрочных самоуплотняющихся бетонов.

Таблица 4  
Table 4

**Расчет начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него компонентов**  
**Calculation of the initial modulus of elasticity of concrete by volume and modulus of elasticity of its components**

Удельные объемы и модули упругости компонентов бетона						$E_{bp}$ , ГПа	$E_{ист}$ , ГПа
ЦК		П		Щ			
$V_{цк}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_{цк}$ , ГПа	$V_n$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_n$ , ГПа	$V_{щ}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_{щ}$ , ГПа		
<b>Состав 2 – мелкозернистый бетон на кварцевом песке</b>							
0,591	21,2	0,373	55,0	–	–	<b>33,0</b>	<b>31,9</b>
<b>Состав 3 – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне</b>							
0,372	21,2	0,297	55,0	0,291	60,0	<b>41,7</b>	<b>41,7</b>
<b>Состав 4 – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне</b>							
0,381	21,2	0,340	55,0	0,269	80,0	<b>48,3</b>	<b>47,5</b>

Примечания:

ЦК – цементный камень; П – песок; Щ – щебень;  $V_{цк}$ ,  $V_n$  и  $V_{щ}$  – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне;  $E_{цк}$ ,  $E_n$  и  $E_{щ}$  – модули упругости цементного камня, песка и щебня;  $E_{bp}$  – расчетное значение модуля упругости бетона;  $E_{ист}$  – модуль упругости бетона без технологических пор.

Таблица 5  
Table 5

**Расчет начального модуля упругости легких заполнителей в бетоне**  
**Calculation of the initial modulus of elasticity of light aggregates in concrete**

Удельные объемы и модули упругости компонентов бетона						$E_{бр}$ , ГПа	$E_{ист}$ , ГПа
ЦК		П		ЛЗ			
$V_{цк}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_{цк}$ , ГПа	$V_n$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_n$ , ГПа	$V_{лз}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$E_{лз}$ , ГПа		
<b>Состав 4</b> – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии							
0,380	21,2	0,215	55,0	0,390	<b>26,0</b>	30,0	29,8
<b>Состав 5</b> – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне							
0,409	21,2	0,238	55,0	0,340	<b>37,0</b>	34,3	34,4

Примечания:

ЦК – цементный камень; П – песок; Щ – щебень; ЛЗ – легкий пористый заполнитель;  $V_{цк}$ ,  $V_n$  и  $V_{щ}$  – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне соответственно;  $E_{цк}$ ,  $E_n$  и  $E_{щ}$  – модули упругости цементного камня, песка и щебня соответственно;  $E_{бр}$  – расчетное значение модуля упругости бетона;  $E_{ист}$  – модуль упругости бетона без технологических пор.

**Выводы**

1. Определены в возрасте 100–110 суток прочностные (кубиковая и призмная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики шести высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем (цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов) классов по прочности на сжатие В64–В88 с широким диапазоном средней плотности от 1842 до 2497 кг/м<sup>3</sup> с использованием стандартных и специальных методик.

2. Высокопрочный цементный камень, используемый во всех цементных системах, на основе обычного портландцемента ЦЕМ I 42,5 и органоминерального модификатора типа МБ, класса В85 с кубиковой и призмной прочностью на сжатие 96,7 и 82,9 МПа соответственно имел минимальное значение модуля упругости 21 ГПа, максимальные коэффициент Пуассона 0,27 и предельные относительные деформации сжатия  $493 \times 10^{-5}$ . Совокупность вышеперечисленных характеристик показывает, что наиболее деформативным («податливым») компонентом высокопрочных бетонов является цементный камень.

3. Кубиковая прочность на сжатие мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов находится в диапазоне 73,7–100,5 МПа, а сопротивление бетонов осевому сжатию составляет от 55,2 до 78,4 МПа и значительно превосходит нормативные значения, приведенные в СП 63.13330.2018 [34].

4. Полученные полные диаграммы деформирования показывают, что нисходящая ветвь у всех высокопрочных цементных систем классов В64–В88 отсутствует. Предельные относительные деформации сжатия мелкозернистого

( $407 \times 10^{-5}$ ), тяжелых ( $252 \times 10^{-5} - 258 \times 10^{-5}$ ) и легких ( $210 \times 10^{-5} - 263 \times 10^{-5}$ ) высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие.

5. Коэффициент Пуассона мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов классов В64–В88 находится в узком диапазоне (от 0,18 до 0,25) и в целом соответствует нормативному значению 0,2, приведенному в СП 63.13330.2018 [34].

6. Введение в цементную систему легких пористых заполнителей (туфового щебня и керамзитового гравия) вместо заполнителей из плотных горных пород (гранитного и базальтового щебня) позволяет понизить среднюю плотность на 17–26 % (с 2360–2497 до 1842–1948 кг/м<sup>3</sup>) и модуль упругости высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на 16–37 % (с 40–47 до 29,5–33,9 ГПа).

7. Использование различных видов заполнителей из плотных горных пород и легких пористых заполнителей искусственного и природного происхождения позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся мелкозернистые, тяжелые и легкие бетоны классов В60–В100 марок по средней плотности D1800–D2500 с регулируемыми деформационными характеристиками.

8. Пониженная средняя плотность (от 1800 до 2000 кг/м<sup>3</sup>) и возможность изменения модуля упругости в широком диапазоне (от 25 до 35 ГПа) делают высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В50–В70 предпочтительным материалом, позволяющим снизить массу и сократить расход арматуры железобетонных конструкций высотных зданий, мостов и путепроводов, а также сооружений, возводимых в сейсмоопасных регионах.

## Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Типография «Парадиз», 2010. 258 с.
- Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении // *Транспортное строительство*. 2007. № 9. С. 10–13.
- Бондарь В.В. Конструкционный керамзитобетон в строительстве. Опыт и перспективы применения // *Вестник Полоцкого Государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2018. № 8. С. 112–119.
- Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 24–39. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 – новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
- Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988, vol. 10, no. 2, pp. 79–90.
- Jian-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafiz Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022, vol. 216, no. 1, p. 110553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553>
- Karamloo Mohammad, Mazloom Moosa, Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 123, pp. 508–515.
- Jae-Il Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, vol. 38, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061>
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
- Шейнфельд А.В., Каприелов С.С., Чилин И.А. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1. С. 58–63.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // *Бетон и железобетон*. 2003. № 6. С. 8–12.
- ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
- ГОСТ 32703-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
- ГОСТ 22263-76. Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 1978.
- ГОСТ Р 55224-2020. Цементы для транспортного строительства. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2021.
- Kaprielov S., Sheinfeld A. Influence of silica fume / fly ash / superplasticizer combinations in powder-like complex modifiers on cement paste porosity and concrete properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. Nice, France, October 2000, pp. 383–400.
- ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
- ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
- Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. Москва: Стройиздат, 1971. 208 с.
- Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. Москва: Стройиздат, 1979. 344 с.
- Геология и плотины / Под общ. ред. проф. А.Н. Вознесенского. Т. 3. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1959, 1963. 175 с.
- ГОСТ Р 59715-2022. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
- ГОСТ Р 59714-2021. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
- ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.

29. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
30. ГОСТ 24452-2023. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ, 2024.
31. Безгодков И.М., Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10. С. 34–36.
32. Безгодков И.М. Методические особенности исследования полных диаграмм деформирования и релаксации напряжений в бетоне // *Технологии бетонов*. 2020. № 11–12. С. 39–44.
33. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
34. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2019.
35. Bezgodov I., Kaprielov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
36. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 51–53.
37. Zhou F.P., Lydon F.D., Barr B.I.G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, no. 1, pp. 177–186.
38. Цой П.А., Усольцева О.М. Об особенностях измерения деформаций образцов горных пород с помощью виртуальных экстензометров // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6. № 2. С. 287–289. DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060250>
39. Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н. О физико-механических свойствах метавулканитов горного Крыма // *Инженерная геология*. 2018. Т. 13. № 4–5. С. 36–51. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-36-51>
40. Пригоженко О.В., Ярмаковский В.Н., Андрианов Л.А. Высокопрочный керамзитобетон из высокоподвижных смесей // *Научные труды // Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону*. Москва. 2005. Т. 4. С. 128–134.

## References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of tall buildings. *Vysotnye Zdaniya = Tall Buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
2. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S. The new modified concrete. Moscow: Paradiz Publ., 2010, 258 p. (In Russian).
3. Kondrashchenko V.I., Yarmakovskiy V.N., Guzenko S.V. On the use of structural lightweight concretes in bridge construction. *Transport construction*. 2007, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).
4. Bondar V.V. Structural expanded clay concrete in a building industry. Practice and prospects of usage. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2018, no. 8, pp. 112–119. (In Russian).
5. Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 24–39. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
6. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Selyutin N.M. Self-compacting high-strength expanded clay concrete of B50–B65 classes – a new generation of expanded clay concretes for structures of high-rise building. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023, no. 4, pp. 42–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
7. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988, vol. 10, no. 2, pp. 79–90.
8. Jian-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafiz Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022, vol. 216, no. 1, p. 110553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553>
9. Karamloo Mohammad, Mazloom Moosa, Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 123, pp. 508–515.
10. Jae-Il Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, vol. 38, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061>
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2017, no. 11, pp. 4–10. (In Russian).

12. Sheynfeld A.V., Kapriellov S.S., Chilin I.A. Temperature effect on structure parameters and properties of cement systems with organo-mineral modifiers. *Urban Construction and Architecture*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 58–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/1017673/Vestnik.2017.01.10>
13. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N. On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high-strength concretes with the MB-50C modifier. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2003, no. 6, pp. 8–12. (In Russian).
14. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
15. State Standard 32703-2014. Automobile roads of general use. Crushed stone and gravel from rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
16. State Standard 32496-2013. Fillers porous for light concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
17. State Standard 22263-76. Crushed stone and sand of porous rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 1978. (In Russian).
18. State Standard R 55224-2020. Cements for transport construction. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. Kapriellov S., Sheinfeld A. Influence of silica fume / fly ash / superplasticizer combinations in powder-like complex modifiers on cement paste porosity and concrete properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. Nice, France, October 2000, pp. 383–400.
20. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
21. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
22. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
23. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-strength concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1971, 208 p. (In Russian).
24. Sheikin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brousser M.I. Structure and properties of cement concretes. Moscow: Stroyizdat Publ., 1979, 344 p. (In Russian).
25. Geology and dams / Under the general editorship of Professor A.N. Voznesensky. Vol. 3. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1959, 1963, 175 p.
26. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
27. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. (In Russian).
28. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
29. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situcasting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
30. State Standard 24452-2023. Concretes. Methods for determination of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio. Moscow: Standartinform Publ., 2024. (In Russian).
31. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Technologies of concrete*. 2013, no. 10, pp. 34–36. (In Russian).
32. Bezgodov I.M. Methodological features of the study of complete diagrams of deformation and stress relaxation in concrete. *Technologies of concrete*. 2020, no. 11–12, pp. 39–44. (In Russian).
33. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
34. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
35. Bezgodov I., Kapriellov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
36. Makridin N.I., Maksimova I.N. Mechanical behavior of structural expanded clay concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2009, no. 1, pp. 51–53. (In Russian).
37. Zhou F.P., Lydon F.D., Barr B.I.G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, no. 1, pp. 177–186.
38. Tsoi P.A., Usol'tseva O.M. Specifics of strain measurements in rocks using virtual (non-contacting) extensometers. *Journal of Fundamental and Applied Mining Science*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 287–289. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060250>
39. Frolova J.V., Ladygin V.V., Spiridonov E.M., Ovsyannikov G.N. Physical-mechanical properties of metavolcanic rocks of the Mountain Crimea. *Engineeringgeologyworld*. 2018, vol. 13, no. 4–5, pp. 36–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-36-51>

40. Prigozhenko O.V., Yarmakovskiy V.N., Andrianov L.A. High-strength expanded clay concrete from highly mobile mixtures. *Scientific works of the II All-Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow, 2005, vol. 4, pp. 128–134. (In Russian).

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

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

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

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

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

**Николай Иванович Карпенко**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, НИИСФ РААСН, Москва  
e-mail: niisf\_lab9n@mail.ru

**Nikolay I. Karpenko**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of the Problems of Strength and Quality in Construction, SRICP RAACS, Moscow  
e-mail: niisf\_lab9n@mail.ru

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

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

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

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

**Игорь Михайлович Безгодов**, инженер, заведующий лабораторией строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: niisf\_lab9n@mail.ru

**Igor M. Bezgodov**, Engineer, Head of Laboratory for Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow  
e-mail: niisf\_lab9n@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32:620.193.01

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-43-53](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-43-53)**Г.В. ЧЕХНИЙ<sup>1,✉</sup>, А.В. БУЧКИН<sup>1</sup>, Н.К. РОЗЕНТАЛЬ<sup>2</sup>, С.А. ОРЕХОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> 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

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

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОТТАИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА ПО РЕЖИМУ УСКОРЕННОГО ТРЕТЬЕГО МЕТОДА ГОСТ 10060–2012 С ИЗМЕНЕНИЕМ № 1

## Аннотация

**Введение.** В связи с введением Изменения № 1 к ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» возросло количество обращений в НИИЖБ, связанных с вопросами применения различных климатических автоматических камер для выполнения испытаний по определению морозостойкости бетона. Анализ конструктивных решений и принципа работы представленных на российском рынке климатических камер показал, что в большинстве камер процесс оттаивания происходит либо с обдувом теплым воздухом, либо реализован неполным погружением емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия, т. е. является отклонением от нормативных требований. Необходимо отметить, что единица измерения морозостойкости (т. е. цикла замораживания – оттаивания) является условной величиной, применение такой единицы измерения требует проведения испытаний в строго нормируемых условиях. Различные подходы к изменению методики проведения испытаний бетона на морозостойкость, включая способ оттаивания образцов после замораживания, могут стать причиной недостоверной оценки качества бетона, что в реальных условиях приведет к снижению безопасности объектов строительства.

**Цель.** Оценка влияния различных способов оттаивания образцов в процессе выполнения цикла замораживания и оттаивания по режиму ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 на морозостойкость бетона.

**Материалы и методы.** Приведены результаты определения морозостойкости бетона по режиму ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 с различными способами оттаивания образцов – в условиях полного или неполного погружения емкостей с образцами в среду оттаивания (раствор 5%-ного хлорида натрия) и в условиях обдува емкостей с образцами теплым воздухом.

**Результаты.** На основании результатов экспериментальных исследований рассчитаны коэффициенты перехода ( $K$ ) от марки бетона по морозостойкости, определенной при оттаивании в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия и обдува емкостей с образцами теплым воздухом, к марке бетона, определенной стандартным методом с оттаиванием образцов в ванне с раствором 5%-ного хлорида натрия.

Для бетонов различных марок по морозостойкости получены следующие средние коэффициенты  $K$  соответственно для  $F_{1,200}$ – $F_{1,300}$ / $F_{1,400}$ – $F_{1,500}$ :  $K = 0,7/0,6$  при оттаивании образцов при неполном погружении емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия;  $K = 0,8/0,9$  при оттаивании образцов в условиях обдува образцов теплым воздухом.

**Выводы.** Определение морозостойкости бетона ускоренным третьим методом с оттаиванием после замораживания емкостей с образцами в ванне с раствором 5%-ного хлорида натрия является оптимальным с точки зрения наиболее негативного влияния на морозостойкость бетона. При этом наиболее «жестким» оказался способ оттаивания образцов при неполном погружении

в раствор 5%-ного хлорида натрия. Режим воздушного оттаивания образцов за счет обдува емкостей с образцами теплым воздухом показал значительный разброс определяемых показателей – прочности на сжатие и массы. Коэффициент вариации переходных коэффициентов для данного способа оттаивания значительно превышает нормативное значение, равное 9 %.

**Ключевые слова:** морозостойкость бетона, замораживание, способ оттаивания образцов, температурный режим испытания, переходный коэффициент, нормативные условия, критическое значение

**Для цитирования:** Чехний Г.В., Бучкин А.В., Розенталь Н.К., Орехов С.А. Оценка влияния способа оттаивания образцов на морозостойкость бетона по режиму ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 43–53. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-43-53](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-43-53). EDN: DEPBKV

#### **Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 10.02.2025*

*Поступила после рецензирования 24.03.2025*

*Принята к публикации 27.03.2025*

**G.V. CHEKHNI<sup>1</sup>, A.V. BUCHKIN<sup>1</sup>, N.K. ROZENTAL<sup>2</sup>, S.A. OREKHOV<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> 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

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

# **ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE SAMPLE THAWING METHOD ON THE FROST RESISTANCE OF CONCRETE ACCORDING TO THE ACCELERATED THIRD METHOD OF THE STATE STANDARD 10060–2012 WITH AMENDMENT No. 1**

#### **Abstract**

*Introduction.* In connection with the introduction of the Amendment No. 1 to State Standard 10060-2012 "Concretes. Methods for determining frost resistance" the Institute has received an increased number of requests related to the use of various climatic automatic chambers to perform tests to determine the frost resistance of concrete. An analysis of the design solutions and the principle of operation of climate chambers presented

on the Russian market has shown that in most chambers the thawing process occurs either with warm air blowing, or is implemented by incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride, i. e. it is a deviation from the regulatory requirements. It should be noted that the unit of measurement for frost resistance (i. e., the freeze-thaw cycle) is a conditional value and the use of such a unit of measurement requires testing under strictly regulated conditions. Various approaches

to changing the methods of concrete testing for frost resistance, including the method of samples thawing after freezing, can lead to an unreliable assessment of the quality of concrete, that in real conditions will lead to a decrease of the safety of construction sites.

**Aim.** Assessment of the effect of various methods of thawing samples during the cycle of freezing and thawing according to the accelerated third method of the State Standard 10060-2012 with Amendment No. 1 on the frost resistance of concrete.

**Materials and methods.** The results of determining of the frost resistance of concrete according to the accelerated cooling regime of State Standard 10060-2012 with Amendment No. 1 are presented with various methods of samples thawing – under conditions of complete or incomplete immersion of sample containers in a thawing medium – a solution of 5 % sodium chloride and under conditions of blowing sample containers with warm air.

**Results.** Based on the results of experimental studies, the coefficients of transition ( $K$ ) from the grade of concrete in terms of frost resistance, determined by thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride and blowing warm air into sample containers, to the grade of concrete, determined by the standard method of samples thawing in a bath with a solution of 5 % sodium chloride.

The following average  $K$  coefficients were obtained for concretes of various grades in terms of frost resistance, respectively, for  $F_{1,200}$ – $F_{1,300}$ / $F_{1,400}$ – $F_{1,500}$ :  $K = 0.7/0.6$  when samples are thawed when sample containers are not fully immersed in a solution of 5 % sodium chloride;  $K = 0.8/0.9$  with samples thawing under conditions of blowing samples with warm air.

**Conclusions.** The determination of the frost resistance of concrete by the accelerated third method with thawing after freezing sample containers in a bath with a solution of 5 % sodium chloride is optimal in terms of the most

negative effect on the frost resistance of concrete. At the same time, the method of samples thawing with incomplete immersion in a solution of 5 % sodium chloride turned out to be the most "harsh". The regime of thawing of samples by blowing warm air into sample containers showed a significant variation in the determined parameters – compressive strength and mass. The coefficient of variation of the transition coefficients for this method of thawing significantly exceeds the standard value of 9 %.

**Keywords:** frost resistance of concrete, freezing, samples thawing method, temperature regime of testing, transition coefficient, regulatory conditions, critical value

**For citation:** Chekhni G.V., Buchkin A.V., Rozental N.K., Orekhov S.A. Assessment of the effect of the sample thawing method on the frost resistance of concrete according to the accelerated third method of the State Standard 10060-2012 with Amendment No. 1. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 43–53. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-43-53](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-43-53). EDN: DEPBKB

#### **Authors contribution statement**

All authors have contributed equally to the work and this publication.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 10.02.2025*

*Revised 24.03.2025*

*Accepted 27.03.2025*

Оценка морозостойкости/морозосолеустойкости бетона базовыми методами (первым и вторым) требует проведения длительных испытаний, вплоть до года. Ускоренный третий метод по ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» [1] с насыщением образцов, замораживанием их в емкостях с раствором 5%-ного хлорида натрия в климатической камере тепла и холода (далее – камера), а затем оттаиванием в условиях полного погружения емкостей с образцами в ванне с раствором 5%-ного хлорида натрия (далее – раствор) является наиболее востребованным.

Ранее [2] был уточнен температурный режим замораживания по ускоренному третьему методу ГОСТ 10060-2012 [1]. Установлено, что время, необходимое для промерзания бетона в образцах размерами 100 × 100 × 100 мм до температуры минус 50 °С, примерно на 2 ч больше, чем показания температуры минус 50 °С по датчику воздуха в камере (рис. 1). Показания термометров сопротивления в растворе (вблизи образца бетона в емкости) и в бетонном образце примерно одинаковы и, учитывая простоту замера температуры в растворе, в дальнейшем принято ориентироваться на замеры температуры в растворе вблизи образца.

С сентября 2022 года введено в действие [3], в котором установлены новые правила контроля температурного режима при определении морозостойкости ускоренным третьим методом с контролем температуры раствора.

Трудоемкость выполнения испытания по ускоренному третьему методу ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 [3] с выемкой емкостей с бетонными образцами из камеры после замораживания для последующего оттаивания их в ванне, оборудованной

устройством, обеспечивающим поддержание температуры раствора (20 ± 2) °С, затруднило использование камер воздушного оттаивания (без погружения емкостей с образцами в раствор) или неполном погружении емкостей с образцами в раствор (без выемки из камеры), в непрерывном автоматическом режиме работы. При этом сравнительных испытаний, выполняемых по ГОСТ 10060-2012 [1], с оттаиванием образцов в емкостях в ваннах, на автоматических, полуавтоматических камерах, позволяющих выполнять в течение суток двух и более циклов замораживания и оттаивания, проведено не было.

Отсутствие данных по влиянию различных способов оттаивания образцов на морозостойкость бетона и запрос строительной отрасли по вопросу, касающегося потребителей автоматических камер по всей стране, показали необходимость выполнения работы в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева по оценке влияния различных способов оттаивания образцов после замораживания по режиму ускоренного третьего метода на определение марки бетона по морозостойкости с целью подготовки уточнений и дополнений Изменения № 1 ГОСТ 10060-2012 [3].

В качестве исторической справки необходимо отметить, что режим оттаивания испытываемых образцов в специальной ванне с водой при определении морозостойкости бетона введен в состав ГОСТ 10060-62 [4, 5]. В стандарт 1987 г. [6] введен ускоренный метод для бетонов дорожных и аэродромных покрытий, при выполнении которого образцы, предварительно насыщенные в ванне раствором, замораживают в емкостях с раствором, выдерживают при температуре (50 ± 2) °С и оттаивают вначале до температуры минус 10 °С в камере, а затем выгружаются в ванну для оттаивания в условиях полного погружения в раствор. Емкости с заморо-

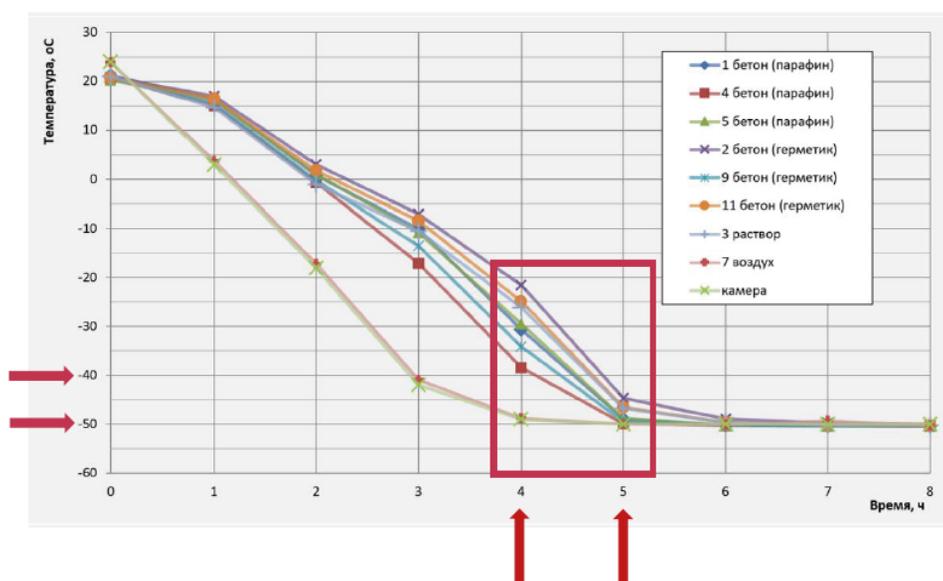


Рис. 1. Режим замораживания образцов размерами 100 × 100 × 100 мм, зафиксированный по датчикам в различных средах  
 Fig. 1. The freezing mode of samples measuring 100 × 100 × 100 mm, recorded by sensors in various environments

женными образцами устанавливаются так, чтобы каждая из них была окружена со всех сторон слоем раствора хлорида натрия толщиной не менее 50 мм.

Известно, что от скорости замораживания бетона зависит степень морозного повреждения бетона. При быстром замораживании затруднен отток воды через капилляры из зоны замерзания, что повышает гидравлическое давление и ускоряет разрушение бетона. В работе В. М. Москвина [7] показано, что в процессе оттаивания бетона при повышении температуры от минус 55 до 20 °С наблюдается дополнительный рост деформаций расширения цементного камня и бетона (пунктирные кривые, рис. 2), который вызван температурным расширением льда, накопившегося в крупных порах в процессе замораживания, что указывает на возможность дополнительного разрушения цементного камня и бетона в процессе оттаивания. Анализ деформаций образцов в процессе замораживания и оттаивания показал, что часть деформаций расширения бетона носит необратимый характер и проявляется в виде остаточных деформаций образцов после оттаивания [7]. То есть процесс оттаивания образцов играет определенную негативную роль в цикле замораживания и оттаивания бетона и требует выполнения процесса оттаивания в строго нормируемых условиях с учетом периода насыщения водой/раствором соли, времени выдержки, температуры и т. д.

В современных автоматических камерах температурный режим замораживания и оттаивания задается

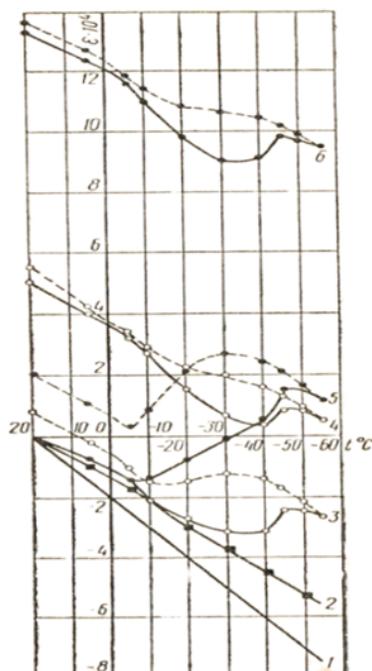
по температуре воздушной среды. Однако такая автоматическая система не позволяет сразу задать режим испытания по изменению температуры в бетонных образцах или растворе. Следует предварительно подобрать температурный режим в камере (по температуре воздушной среды), чтобы обеспечивался режим по изменению температуры раствора в емкости с образцом. При этом режим испытания будет зависеть от размеров испытываемых образцов и объема загрузки камеры.

В связи со сказанным, перед началом исследования были отработаны режимы цикла замораживания и оттаивания (ЦЗО) образцов в автоматических и полуполупри автоматических камерах.

Экспериментальные исследования выполнялись на двух марках бетона по морозостойкости:  $F_{1,200}$ – $F_{1,300}$  (1-я группа) и  $F_{1,400}$ – $F_{1,500}$  (2-я группа). Согласно [1, Приложение Б] для установления значений переходных коэффициентов при определении морозостойкости/морозосолеустойкости, в зависимости от способа оттаивания образцов, испытано в каждой группе по шесть серий образцов.

Составы бетона выбраны на основании анализа ранее выполненных лабораторных исследований морозостойкости/морозосолеустойкости бетонов (табл. 1).

Опытные образцы изготовлены из тяжелого бетона по ГОСТ 26633-2015 [8] класса по прочности на сжатие В25–В45 с использованием портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н АП производства «Цементный завод «Пролетарий» ОАО «Новоросцемент», песков



**Рис. 2.** Деформации пропаренного бетона ( $W/C = 0,5$ ) в зависимости от температуры: 1 – сталь марки Ст3; 2 – бетон с влажностью, установившейся после пропаривания ( $W = 3,65\%$ ); 3 – бетон, насыщенный водой в течение двух суток ( $W = 5,3\%$ ), 1-й цикл; 4 – то же, 10-й цикл; 5 – бетон, насыщенный водой под вакуумом ( $W = 6,1\%$ ), 1-й цикл; 6 – то же, 10-й цикл

**Fig. 2.** Deformations of steamed concrete ( $W/C = 0.5$ ) depending on temperature: 1 – St3 steel; 2 – concrete with humidity after steaming ( $W = 3.65\%$ ); 3 – concrete saturated with water for two days ( $W = 5.3\%$ ), 1st cycle; 4 – the same, 10th cycle; 5 – concrete saturated with water under vacuum ( $W = 6.1\%$ ), 1st cycle; 6 – the same, 10th cycle

Таблица 1  
Table 1

**Составы бетона для экспериментальных исследований**  
**Concrete compositions for experimental studies**

№ состава	Вид, кол-во добавки, % от Ц	Фактический расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг				Осадка конуса, см	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объем вовлеченного воздуха, %	В/Ц
		цемент	песок	щебень	вода				
Первая группа (марка бетона по морозостойкости F <sub>1,200</sub> –F <sub>1,300</sub> )									
1	С-3 – 0,4	332	798	1109	176	6,0	2418	4,0	0,53
2	С-3 – 0,5	351	796	1085	176	10,0	2410	4,6	0,50
3	С-3 – 0,6	365	785	1039	178	2,5	2370	3,0	0,49
4	С-3 – 0,5	337	764	1040	159	2,7	2302	4,8	0,47
5	–	357	743	1091	170	1,2	2362	2,8	0,48
6	–	361	751	1103	170	1,8	2386	4,0	0,47
Вторая группа (марка бетона по морозостойкости F <sub>1,400</sub> –F <sub>1,500</sub> )									
7	С-3 – 0,6	385	802	1063	146	2,5	2400	4,0	0,38
8	С-3 – 0,7 СНВ – 0,025	397	624	968	137	11,2	2129	8,0	0,34
9	С-3 – 0,7 СНВ – 0,025	442	697	1081	162	2,0	2386	4,5	0,37
10	С-3 – 0,7	365	758	1002	145	4,2	2272	4,5	0,40
11	С-3 – 0,7 СНВ – 0,025	435	695	1061	160	2,0	2356	5,2	0,37
12	СП-1 – 1,0 АЭРО – 0,8	437	700	1067	132	2,6	2340	6,9	0,30

с Мкр = 2,37 карьера «Подгорненский II» (Московская область), Мкр = 2,27 карьера «Воронцовское» (Ленинградская область), щебнях из гравия фракции 5–10 мм месторождения «Владимирское – 3» (Краснодарский край) и фракции 5–20 мм Республики Беларусь (Брестская область). Использовали добавки С-3, СП-1, «Полипласт АЭРО» производства «Полипласт Новомосковск», СНВ производства ООО «Тихвинский химзавод».

Для уточнения режимов испытания бетона на морозостойкость использовали измерительный многоканальный комплекс TDS-530, позволяющий производить измерения температуры с использованием первичных преобразователей – термометров сопротивления ТС-Б.

Термометры сопротивления устанавливали в емкости с раствором (вблизи образцов размерами 100 × 100 × 100 мм), в центре камеры (в воздушной среде), в растворе в ванне для оттаивания образцов. Температуру фиксировали каждые 30 минут.

Результаты подбора режимов испытания в камерах приведены на рис. 3–5.

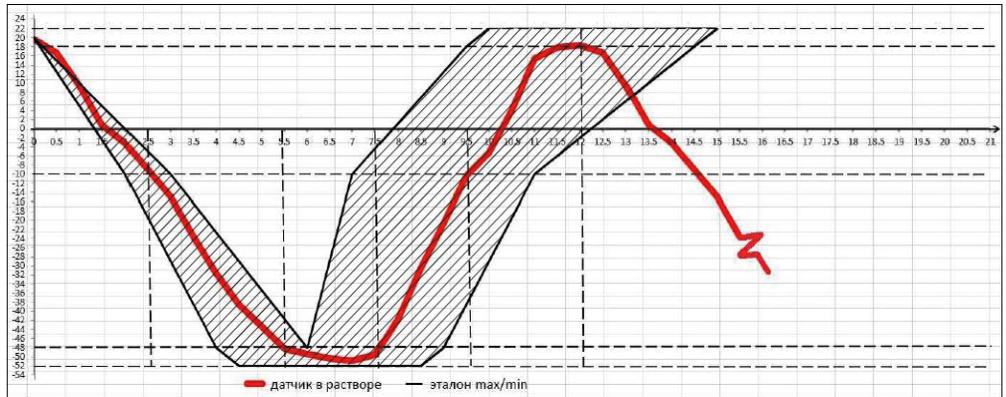
Заштрихованная область на графиках указывает допустимые границы ЦЗО по температуре датчика в растворе в соответствии [3].

Лабораторные исследования морозостойкости/морозосолеустойкости бетона по ускоренному третьему методу ГОСТ 10060-2012 [1] выполнены с контролем

изменений прочности при сжатии и массы бетона. Результаты определения морозостойкости бетона в полуавтоматической камере с оттаиванием образцов по режиму ускоренного третьего метода (при полном погружении емкостей с образцами в ванну для оттаивания с раствором) сравнивали с результатами определения морозостойкости бетона в условиях оттаивания образцов в автоматической камере при неполном погружении образцов в раствор или при оттаивании образцов в автоматической камере с обдувом теплым воздухом.

За критерий оценки степени повреждения бетона в результате ЦЗО принято снижение прочности бетона основных образцов, равное 5 %, по сравнению с прочностью контрольных образцов, не подвергавшихся замораживанию. При значении снижения прочности бетона, равного 5 %, в образцах, оттаивавших в условиях полного погружения в ванне с раствором, определяли прочность образцов, оттаивавших в условиях неполного погружения в раствор или в результате обдува теплым воздухом.

Наибольшее снижение прочности при сжатии бетона в процессе ЦЗО зафиксировано при оттаивании образцов в условиях неполного погружения в раствор. При этом наибольшее снижение отмечено как при испытании образцов 1-й группы с марками по морозостойкости F<sub>1,200</sub>–F<sub>1,300</sub> (рис. 6а), так и при испытании образцов 2-й группы с марками по моро-

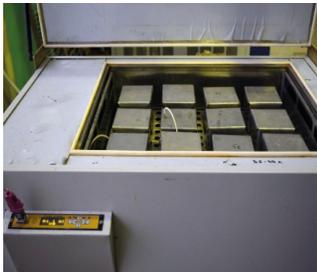
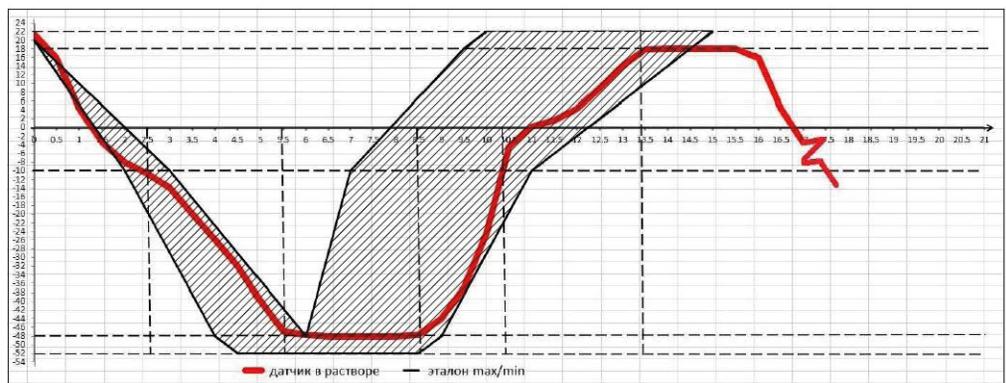


Режим по Изменению № 1к ГОСТ 10060-2012 [3]:  
 (2-3) От +20 до -10 °С + (2-3) От -10 до -50 °С + (2-3) Выдержка при -50 °С + (1-2) От -50 до -10 °С + (2,5-3,5) От -10 до +20 °С

Режим по датчику НИИЖБ:  
 (2,5) От +20 до -10 °С + (3,0) От -10 до -50 °С + (2,0) Выдержка при -50 °С + (2,0) От -50 до -10 °С + (2,5) От -10 до +20 °С

Рис. 3. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях полного погружения емкостей с образцами в ванну для оттаивания с раствором

Fig. 3. The temperature regime of the freezing-thawing cycles. Thawing under conditions of complete immersion of sample containers in a thawing bath with a solution

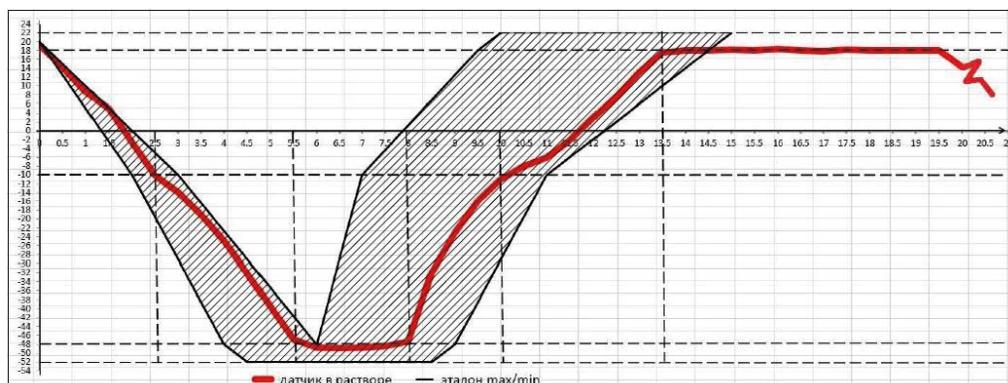


Режим по Изменению № 1к ГОСТ 10060-2012 [3]:  
 (2-3) От +20 до -10 °С + (2-3) От -10 до -50 °С + (2-3) Выдержка при -50 °С + (1-2) От -50 до -10 °С + (2,5-3,5) От -10 до +20 °С

Режим по датчику НИИЖБ:  
 (2,5) От +20 до -10 °С + (3,0) От -10 до -50 °С + (3,0) Выдержка при -50 °С + (1,3) От -50 до -10 °С + (3,0) От -10 до +20 °С

Рис. 4. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор в автоматической камере

Fig. 4. The temperature regime of the freezing-thawing cycles. Thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution in an automatic chamber

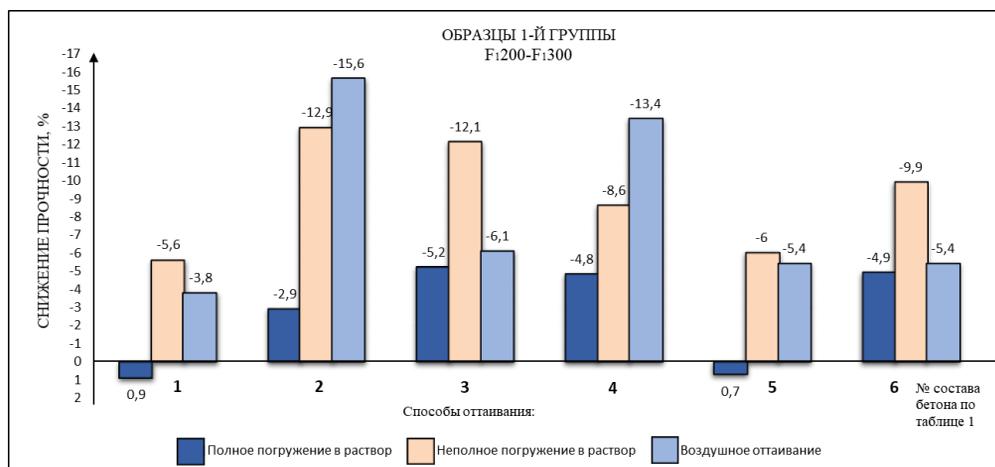


Режим по Изменению № 1к ГОСТ 10060-2012 [3]:  
 (2-3) От +20 до -10 °С + (2-3) От -10 до -50 °С + (2-3) Выдержка при -50 °С + (1-2) От -50 до -10 °С + (2,5-3,5) От -10 до +20 °С

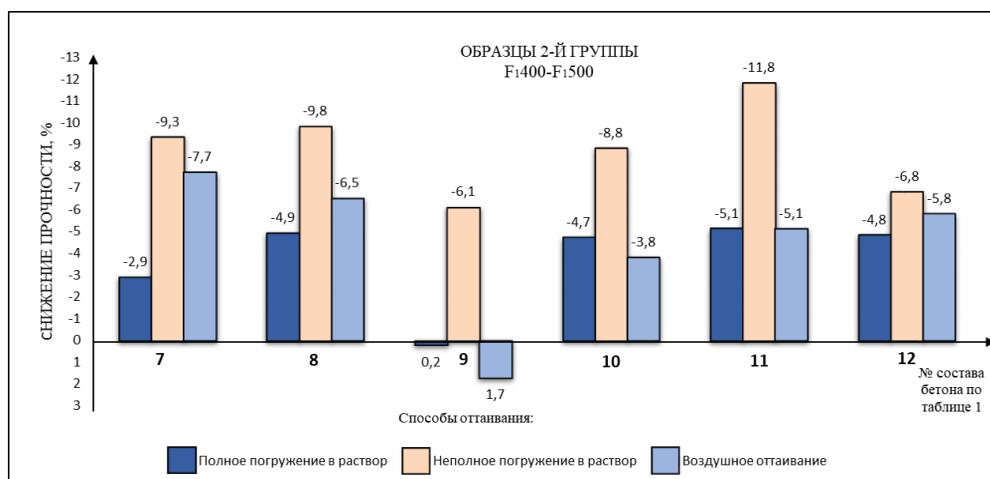
Режим по датчику НИИЖБ:  
 (2,5) От +20 до -10 °С + (3,0) От -10 до -50 °С + (2,0) Выдержка при -50 °С + (2,0) От -50 до -10 °С + (3,5) От -10 до +20 °С

Рис. 5. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание емкостей с образцами в условиях обдува теплым воздухом в автоматической камере

Fig. 5. The temperature regime of the freezing-thawing cycles. Thawing of sample containers under conditions of warm air blowing in an automatic chamber



а (a)



б (b)

Рис. 6. Показатели снижения прочности бетона, при которых рассчитывали переходные коэффициенты

Fig. 6. Indicators of reduction in concrete strength, at which the transition coefficients were calculated

зостойкости F<sub>1,400</sub>–F<sub>1,500</sub> (рис. 6б). При сравнении различных способов оттаивания образцов в процессе ЦЗО установлено, что «жесткость» процесса оттаивания увеличивается в ряду: полное погружение образцов в специальной ванне с раствором < воздушное оттаивание в автоматической камере в результате обдува образцов теплым воздухом < неполное погружение образцов в раствор в автоматической камере.

Образцы как 1-й, так и 2-й групп в процессе циклов замораживания и оттаивания не показали критического значения по потере массы испытуемых образцов, равного 2 %.

Для каждой серии образцов получено значение коэффициента перехода *Ki* от марки бетона по морозостойкости, определенной при оттаивании в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор и обдува теплым воздухом, к марке бетона, определенной стандартным методом с оттаиванием образцов в специальной ванне с раствором, по формуле:

$$Ki = n_{si}^0 / n_{si} \tag{1}$$

где *n<sub>si</sub><sup>0</sup>* – среднее число ЦЗО образцов, при котором достигается критерий оценки по изменению прочности бетона на сжатие при испытании предлагаемым методом;

*n<sub>si</sub>* – среднее число ЦЗО образцов, при котором достигается критерий оценки по изменению прочности бетона на сжатие при испытании стандартным методом.

Для бетонов различных марок по морозостойкости получены следующие средние коэффициенты *K* соответственно для F<sub>1,200</sub>–F<sub>1,300</sub>/F<sub>1,400</sub>–F<sub>1,500</sub>:

– *K* = 0,7/0,6 при оттаивании образцов в автоматической камере при неполном погружении емкостей с образцами в раствор;

– *K* = 0,8/0,9 при оттаивании образцов в автоматической камере в условиях обдува образцов теплым воздухом.

Результаты статистической обработки (табл. 2) показали, что коэффициент вариации экспериментально установленных переходных коэффициентов при неполном погружении емкостей с образцами в раствор равняется 8,4–9,4 %; при обдуве теплым воздухом он равняется 19,1–28,1 % при допуске нормативном значении не более 9 %.

**Заключение**

Определение морозостойкости бетона ускоренным третьим методом по ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 [3] с оттаиванием после замораживания емкостей с образцами в ванне с раствором является наиболее оптимальным с точки зрения негативного влияния на морозостойкость бетона. Наиболее «жестким» по сравнению со стандартным способом оттаивания в ванне оказался способ оттаивания образцов при неполном погружении в раствор в автоматической камере. Режим воздушного оттаивания образцов за счет обдува емкостей с образцами теплым воздухом в автоматической камере показал значительный разброс определяемых показателей – прочности, массы. Коэффициент вариации переходных коэффициентов для данного способа оттаивания значительно превышает нормативное значение, равное 9%. По нашему мнению, это связано с конструктивными особенностями автоматической камеры, в которой часть образцов располагается напротив вентилятора, а часть находится в отдалении. Переставлять местами емкости с образцами нецелесообразно, так как теряется смысл использования автоматического режима камеры.

Анализ экспериментальных данных показал различные переходные коэффициенты для каждого вида оттаивания и для каждой марки бетона по морозостойкости, что позволяет считать применение единого переходного коэффициента от марки, определенной при исследуемых режимах оттаивания – неполного погружения емкостей с образцами в раствор и воздушного оттаивания образцов в результате их обдува теплым воздухом – к марке бетона, определенной при

**Таблица 2**  
**Table 2**

**Результаты статистической обработки результатов исследования**  
**The results of statistical processing of the research**

Показатели обработки	1-я группа составов бетона (F <sub>1,200</sub> –F <sub>1,300</sub> )		2-я группа составов бетона (F <sub>1,400</sub> –F <sub>1,500</sub> )	
	Способ оттаивания в условиях			
	неполного погружения в раствор	обдува теплым воздухом	неполного погружения в раствор	обдува теплым воздухом
Среднеквадратическое отклонение, <i>б<sub>n</sub></i>	0,07	0,15	0,0536	0,25
Коэффициент вариации, <i>V<sub>к</sub></i> , %	9,4	19,1	8,4	28,1

стандартном методе оттаивания емкостей с образцами в ванне с раствором, **нецелесообразным**.

Для каждой марки бетона по морозостойкости и для исследованного метода оттаивания должен быть рассчитан свой переходный коэффициент. При испытании бетона определенных марок по морозостойкости может быть рассчитан свой переходный коэффициент, что и допускается согласно ГОСТ 10060-2012 [1, п. 4.1].

Учитывая, что в ГОСТ 10060-2012 [1, табл. 4] приведено соотношение между циклами испытаний по ускоренному третьему методу и 19 марками бетона по морозостойкости, разработка стольких переходных коэффициентов приведет к путанице и снижению качества оценки морозостойкости в целом.

На основании результатов выполненной работы подготовлены предложения по уточнению и дополнению ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 с Изменением № 1 [3] с целью исключения разночтения при выполнении испытаний.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева. В дальнейшем будут опубликованы результаты последующих этапов, включая результаты расчета термонапряженного состояния бетона при определении морозостойкости.

#### Список литературы

1. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2014.
2. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А., Джейранов С.Э. Исследование морозостойкости бетона с целью уточнения методов определения его морозостойкости/морозосолеустойкости // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020. № 1 (24). С. 108–117.
3. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2018.
4. ГОСТ 10060-62. Бетон тяжелый. Метод определения морозостойкости.
5. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Морозостойкость бетона. Обзор. Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2023. 156 с.
6. ГОСТ 10060-87. Бетоны. Методы контроля морозостойкости. Москва: Государственный строительный комитет СССР, 1988.
7. Москвин В.М., Капкин М.М., Мазур Б.М., Подвальный А.М. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре. Москва: Стройиздат, 1967. 132 с.
8. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.

#### References

1. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
2. Stepanova V., Rosental N., Chehniy G., Parshina I., Orehov S., Jeyranov S. Study of frost resistance of concrete in order to clarify the methods for determining its frost / frost resistance. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020, no. 1 (24), pp. 108–117. (In Russian).
3. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance (with Amendment No. 1). Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
4. State Standard 10060-62. Heavy concrete. A method for determining of frost-resistance. (In Russian).
5. Rozental N.K., Chekhniy G.V. Frost resistance of concrete. Review. Moscow: JSC Research Center of Construction Publ., 2023, 156 p. (In Russian).
6. State Standard 10060-87. Concretes. Methods of frost resistance control. Moscow: USSR State Construction Committee, 1988. (In Russian).
7. Moskvin V.M., Kapkin M.M., Mazur B.M., Podvalniy A.M. Resistance of concrete and reinforced concrete at subzero temperatures. Moscow: Stroyizdat Publ., 1967, 132 p. (In Russian).
8. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).

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

**Галина Васильевна Чехний**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: chehniy@mail.ru  
тел.: +7 (499) 174-76-97

**Galina V. Chekhniy**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: chehniy@mail.ru  
tel.: +7 (499) 174-76-97

**Андрей Викторович Бучкин**, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: andibuch@inbox.ru  
тел.: +7 (499) 174-76-81

**Andrey V. Buchkin**, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head 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  
e-mail: andibuch@inbox.ru  
tel.: +7 (499) 174-76-81

**Николай Константинович Розенталь**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: rosental08@mail.ru

**Nikolai K. Rozental**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: rosental08@mail.ru

**Сергей Александрович Орехов**, научный сотрудник сектора коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: sirius\_m16@mail.ru

**Sergey A. Orekhov**, Researcher of the Concrete Corrosion Section 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

e-mail: sirius\_m16@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 69.058.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62)**Е.В. ШЕЙКИН**

Центральные научно-реставрационные проектные мастерские, Школьная ул., д. 24, г. Москва, 109544, Российская Федерация

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

# ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

**Аннотация**

*Введение.* В статье приводятся результаты определения свойств слоистых пористых материалов, отобранных из глубины конструкций объектов культурного наследия, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги. Полученные данные сопоставляются со свойствами новых материалов, применяемых в аналогичных конструкциях и других объектах. Данные о новых материалах получены из литературных источников.

*Цель.* Выявление признаков изменения свойств слоистых пористых материалов, происходящих не только в поверхностном слое, но и по всей глубине конструкции.

*Материалы и методы.* Представленные исследования получены на основе результатов проведенных автором испытаний более 2500 образцов материалов из 24 памятников архитектуры разного времени и локаций, находящихся под долговременным влиянием неблагоприятных эксплуатационных факторов.

*Результаты.* Полученные результаты показывают, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, начиная с поверхности, а одновременно во всем объеме конструкции.

*Выводы.* Существенное изменение свойств материалов на всех исследованных участках показывает, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, а в объеме всей глубины конструкции.

**Ключевые слова:** кирпич, известковый раствор, свойства пористой системы, размер пор, удельная поверхность, сорбционные характеристики, слоистые материалы, исторические конструкции, объекты культурного наследия

**Для цитирования:** Шейкин Е.В. Характер разрушения слоистых пористых материалов в конструкциях объектов культурного наследия // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 54–62. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62). EDN: RPQXZP

**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 07.02.2025*

*Поступила после рецензирования 10.03.2025*

*Принята к публикации 13.03.2025*

**E.V. SHEIKIN**

Central Scientific and Restoration Design Workshops, Shkolnaya str., 24, Moscow, 109544, Russian Federation

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

# THE NATURE OF THE DESTRUCTION OF LAYERED POROUS MATERIALS IN THE STRUCTURES OF CULTURAL HERITAGE SITES

## Abstract

*Introduction.* The article presents the results of determining the properties of layered porous materials selected from the depths of the structures of cultural heritage sites, which are more or less susceptible to long-term exposure to moisture. The obtained data are compared with the properties of new materials used in similar structures and other objects according to literary sources.

*Aim.* Identification of signs of changes in the properties of layered porous materials occurring not only in the surface layer, but also throughout the entire depth of the structure.

*Materials and methods.* The presented studies are based on the results of the author's tests of more than 2,500 samples of materials from 24 architectural monuments of different times and locations that are under the long-term influence of adverse operational factors.

*Results.* The results show that, unlike homogeneous materials, the destruction of layered systems does not occur in layers, starting from the surface, but simultaneously throughout the entire volume of the structure.

*Conclusions.* A significant change in the properties of materials in all studied areas shows that, unlike homogeneous materials, the destruction of layered systems does not occur in layers, but in the volume of the entire depth of the structure.

**Keywords:** brick, lime mortar, properties of a porous system, pore size, specific surface area, sorption characteristics, layered materials, historical structures, cultural heritage objects

**For citation:** Sheikin E.V. The nature of destruction of layered porous materials in the structures of cultural heritage sites. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 54–62. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-54-62](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-54-62) EDN: RPQXZP

## 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 07.02.2025*

*Revised 10.03.2025*

*Accepted 13.03.2025*

### Введение

Свойства пористых материалов могут изменяться во времени в результате развития различных деструктивных процессов. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных данной проблематике, большинство из них проводилось на лабораторных образцах однородного материала, в связи с чем полученные результаты изменения слоистой структуры относились к поверхностным слоям [1–14]. В тех случаях, когда изучению подвергался массив естественной (горная порода) или искусственной (архитектура) конструкций, собственно исследуемым объектом также являлся поверхностный слой [15–17]. Поэтому использование полученных результатов для оценки характера разрушения слоистых систем, где понятие «поверхности» не ограничивается внешней границей материала с окружающей средой, а потенциально распространяется на все внутренние граничные участки соприкосновения различных материалов, невозможно.

В ряде проанализированных нами работ показано, что процесс разрушения определяется зоной испарения [18–20], соответственно, наличие внутренних поверхностей в слоистых системах может привести к деструкции материалов по всей толщине конструкции. Данная гипотеза подтверждается данными о повышенной уязвимости участков совмещения материалов с разными свойствами [21–23] или с внутренними трещинами [24].

В связи с этим была поставлена задача определить, наблюдаются ли признаки изменения свойств пористых слоистых систем по всей глубине на примере конструкций кладочного типа объектов культурного наследия.

### Материалы и методы

В работе использовались материалы конструкций 24 памятников архитектуры, разного времени и локаций, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги. Для достижения поставленных целей образцы для лабораторных испытаний брались не с поверхности, а из толщи стены, на глубине от 1 до 50–65 см.

Отбор проб проводился методом сверления трубчатыми сверлами диаметром 10 мм. Получаемые образцы представляют собой микрокерна диаметром около 7 мм; длина и формат образцов зависят от состояния отбираемого материала и могут колебаться от качественных цилиндрических кернов длиной 10–20 мм до бесформенных осколков. Каждая проба состояла из нескольких образцов в среднем 5–6 см по глубине, так, что из каждого отверстия получалось от 8 до 12 проб. В одну пробу отбирались только материалы одного вида, в связи с чем при резкой смене материалов размер пробы сокращался, вплоть до одного образца. Полученные пробы упаковывали в лабораторные бюксы с притертой крышкой и герметизировали лентой Parafilm M.

*Определение влажности.* Оценка естественной влажности образцов проводилась гравиметрическим методом. Для взвешивания образцов применялись весы Sartorius GC 803S-OCE с точностью до 4 знака. Бюксы с пробами освобождались от герметизирующей пленки, взвешивались и высушивались со снятой крышкой до постоянной массы при температуре 105 °С. После сушильного шкафа бюксы закрывались крышками и помещались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, после чего взвешивались. Влажность определялась по следующей формуле:

$$W = \frac{(m_{6в} - m_6) - (m_{6с} - m_6)}{(m_{6с} - m_6)} \times 100, \quad (1)$$

где  $W$  – естественная влажность;

$m_{6в}$  – масса бюкса с мокрой пробой;

$m_6$  – масса пустого бюкса;

$m_{6с}$  – масса бюкса с сухой пробой.

Для анализа полученные значения естественной влажности нормализовались относительно значений водопоглощения по следующей формуле:

$$\theta = \frac{W}{B} \times 100, \quad (2)$$

где  $\theta$  – относительная влажность материалов;

$B$  – водопоглощение, определяемое путем выдерживания образцов в кипящей дистиллированной воде в течение двух часов.

После кипячения образцы оставались в воде еще на два часа для остывания.

*Определение сорбционных характеристик.* Определение сорбционных характеристик проводилось по эксикаторному методу. Параметры воздуха в эксикаторе создавались при помощи насыщенных растворов солей. Для достижения 43 % использовался раствор карбоната калия ( $K_2CO_3$ ), 63 % – нитрита натрия ( $NaNO_2$ ), 74 % – нитрата натрия, 85 % – хлорида калия, 98 % – сульфата меди. Время выдержки образцов для достижения равновесия на каждом этапе было определено на основе опыта зарубежных исследователей, в работах которых оно составляет от нескольких часов до нескольких дней для кернов диаметром 2–5 см. Поскольку предварительные эксперименты показали, что 72 часов достаточно для достижения равновесия всех наших образцов, то именно этот период был выбран в качестве оптимального. После достижения равновесия образцы высушивались при 105 °С до постоянного веса, располагались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, взвешивались и вновь размещались в эксикаторах с более высокой степенью относительной влажности.

Сорбционные характеристики выражались в формате степени микропористости ( $P_{0,1}$ ), представляющей собой процент сорбционных пор в материале.  $P_{0,1}$  определяется по формуле:

$$P_{0,1} = \frac{a_{98}}{B} \times 100, \quad (3)$$

где  $a_{98}$  – количество сорбированной влаги при давлении водяного пара 0,98.

Определение сорбционных характеристик всех образцов проводилось дважды. «Первичная» сорбция выполнялась на образцах, прошедших только процедуру определения естественной влажности, т. е. не изменивших свое состояние. «Вторичная» сорбция проводилась на очищенных от примесей образцах после трех циклов увлажнения/высыхания, где каждый цикл состоял из выдержки в холодной воде в течение 8 часов, а затем в кипящей воде в течение 2 часов. Дистиллированная вода менялась после каждого этапа. Необходимость вторичной сорбции связана с тем, что в неблагоприятных влажностных условиях на отдельных участках скапливается множество примесей (частицы почвы, водорастворимые соли, микрообломки и т. д.), могущих существенно исказить физические свойства материалов, в частности уменьшать пористость, размер пор и гигроскопичность. Эти измененные «кажущиеся» свойства важны с той точки зрения, что именно в таком формате данные материалы проявляют себя внутри стены. Однако для определения истинных свойств необходимо очистить поровое пространство от примесей.

*Определение среднего размера пор.* Средний размер пор образцов ( $d_{cp}$ ) рассчитывался по формуле:

$$d_{cp} = \frac{V_p \times 4 \times 10^3}{S_{уд}}, \quad (4)$$

$$V_p = \frac{V \times m_0 \times P_0}{100}, \quad (5)$$

где  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>;

$V_p$  – объем пор, см<sup>3</sup>/г;

$S_{уд}$  – удельная площадь поверхности. Удельная площадь поверхности определялась сравнительным методом по следующей формуле:

$$S_{уд} = \frac{a_{62} - a_{45}}{\alpha_{62} - \alpha_{45}}, \quad (6)$$

где  $a_{62}$  – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/г;

$a_{45}$  – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/г;

$\alpha_{62}$  – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/м<sup>2</sup>;

$\alpha_{45}$  – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/м<sup>2</sup>.

Абсолютная величина адсорбции определялась по формуле:

$$\alpha_i = \frac{a_i - m_c}{m_c \times S_{уд} \times 0,000018}, \quad (7)$$

где  $a_i$  – адсорбция стандартного образца при относительной влажности  $i$ , г;

$m_c$  – сухой вес стандартного образца, г.

В качестве стандартных образцов использовались четыре образца исторического кирпича с разными характеристиками пористого пространства. Анализ образцов проводился на кафедре функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС методом низкотемпературной адсорбции азота при помощи анализатора удельной поверхности и пористости Quantochrome Nova 1200e.

### Характеристика свойств пористых материалов слоистых конструкций объектов культурного наследия

Данные, полученные по результатам лабораторных испытаний исторических материалов, приведены в формате усреднения по объектам в табл. 1–5.

*Пористость.* Пористость кирпича представлена в достаточно узком диапазоне 24–35 %. В большинстве случаев (15 объектов, 65 %) значения находятся в диапазоне 29–32 %, 6 объектов (26 %) – в диапазоне 24–27 % и только 2 объекта – в диапазоне 33–35 %. Пористость раствора демонстрирует несколько больший диапазон – от 22 до 44 %. Однако обе крайние точки представлены только одним случаем. Если не учитывать их, то более половины всех значений (52 %), как и в случае с кирпичом, находятся в диапазоне 29–33 %, 19 % (4 объекта) – в диапазоне 26–28 %, 29 % (6 объектов) – в диапазоне 35–37 % (табл. 1).

*Средний размер пор.* Средние показатели размера пор в большинстве случаев (71 %) находятся в диапазоне 0,1–0,5 мкм. Оставшиеся данные распределяются примерно поровну. Средние показатели размера пор трех объектов (13 %) находятся ниже 0,1 мкм, четырех (17 %) – выше. Средние показатели размера пор раствора для всех объектов расположены ниже 0,1 мкм (табл. 2).

*Количество микропор менее 0,1 мкм.* Для кирпича только на двух объектах количество пор меньше 0,1 мкм составляет менее 30 %. Более чем для половины объектов (52 %) количество участков со средним размером пор менее 0,1 мкм возрастает до 30–50 %. Для оставшихся девяти объектов (39 %) количество микропористых участков составляет более 50 %. Для раствора указанная тенденция проявляется еще более четко. На всех объектах количество микропористых участков превышает 80 %. При этом в восьми случаях (35 %) количество микропористых участков составляет 90–97 %, а более чем в половине всех случаев (57 %) они достигают 100 % (табл. 3).

*Удельная площадь поверхности.* Усредненные значения удельной площади поверхности кирпича по данным первичной сорбции (неочищенные от примесей образцы) достаточно равномерно распределились в широком диапазоне 2,4–17 м<sup>2</sup>/г. Для 35 % объектов

удельная поверхность не превышала 5 м<sup>2</sup>/г, для 35 % – находилась в диапазоне 5–10 м<sup>2</sup>/г, соответственно, для оставшихся 30 % удельная поверхность превышала 10 м<sup>2</sup>/г. По данным вторичной сорбции (очищенные от примесей образцы) средние показатели ожидаемо несколько снизились. Количество объектов с удельной площадью поверхности более 10 м<sup>2</sup>/г сократилось до 22 %, с удельной площадью поверхности в диапазоне 5–10 м<sup>2</sup>/г – до 30 %. Таким образом, процент объектов с удельной поверхностью менее 5 м<sup>2</sup>/г возрос до 48 % (табл. 4).

Для раствора значения удельной поверхности были существенно выше. По данным первичной сорбции для 87 % объектов средние значения удельной поверх-

ности превышали 10 м<sup>2</sup>/г. Оставшиеся 13 % объектов продемонстрировали значения удельной площади поверхности в диапазоне 5–10 м<sup>2</sup>/г. По данным вторичной сорбции значения снизились, но незначительно. Количество объектов с удельной площадью выше 10 м<sup>2</sup>/г сократилось до 70 %, с удельной площадью в диапазоне 5–10 м<sup>2</sup>/г выросло до 22 %. В оставшихся 9 % значения удельной поверхности располагались ниже отметки в 5 м<sup>2</sup>/г.

**Сорбционные характеристики.** Только в 13 % случаев по данным первичной сорбции (неочищенные от примесей образцы) и в 33 % случаев по данной вторичной сорбции (очищенные от примесей образцы) значения сорбционной влажности кирпича составили

Таблица 1  
Table 1

Открытая пористость ( $P_o$ ) исследуемых материалов.  $P_{o-cp}$  – среднее значение пористости; < 30 ... > 40 % – процент кирпича с пористостью соответствующего диапазона

The open porosity ( $P_o$ ) of the studied materials.  $P_{o-cp}$  – the average porosity value; < 30 ... > 40 % – percentage of bricks with a porosity of the appropriate range

	Кирпич	Раствор
$P_{o-cp}$	29,4	32
< 30 %	42	21
30–40 %	58	75
> 40 %	0	4

Таблица 3  
Table 3

Степень микропористости ( $P_{0,1}$ ) исследуемых материалов.  $P_{0,1-cp}$  – среднее значение степени микропористости; < 5 ... > 10 % – соответствующий процент микропор (пор менее 0,1 мкм)

The degree of microporosity ( $P_{0,1}$ ) of the studied materials.  $P_{0,1-cp}$  – the average value of the degree of microporosity; < 5 ... > 10 % – the corresponding percentage of micropores (pores less than 0.1 microns)

	Кирпич	Раствор
$P_{0,1-cp}$	48	96
< 5 %	0	0
5–10 %	0	0
> 10 %	100	100

Таблица 2  
Table 2

Средний размер пор ( $d_{cp}$ ) исследуемых материалов.  $d_{cp-cp}$  – среднее значение среднего размера пор; < 0,1 ... > 1 мкм – процент кирпича с размером пор соответствующего диапазона

The average pore size ( $d_{cp}$ ) of the studied materials.  $d_{cp-cp}$  – the average value of the average pore size; < 0.1 ... > 1 microns – the percentage of brick with the pore size of the corresponding range

	Кирпич	Раствор
$d_{cp-cp}$	0,3	0,02
< 0,1 мкм	13	100
0,1–0,5 мкм	71	0
0,5–1 мкм	17	0
> 1 мкм	0	0

Таблица 4  
Table 4

Удельная площадь поверхности ( $S_{уд}$ ) исследуемых материалов.  $S_{уд-cp}$  – среднее значение удельной площади;  $S_{уд-i}$  – удельная площадь образцов с примесями (1) и без примесей (2); < 5 ... > 10 м<sup>2</sup>/г – процент кирпича с удельной поверхностью соответствующего диапазона

Specific surface area (sound insulation) of the studied materials.  $S_{уд-cp}$  – the average value of the specific area;  $S_{уд-i}$  – the specific area of samples with impurities (1) and without impurities (2); < 5 ... > 10 m<sup>2</sup>/g – the percentage of bricks with a specific surface area of the corresponding range

	Кирпич		Раствор	
	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$
$S_{уд-cp}$ (м <sup>2</sup> /г)	7,4	6,2	24,8	16,2
< 5 м <sup>2</sup> /г	38	50	0	8
5–10 м <sup>2</sup> /г	33	29	13	21
> 10 м <sup>2</sup> /г	29	21	88	71

менее 1 %. В половине случаев по данным обеих сорбций значения максимальной сорбции находились в диапазоне 1–3 %. И, соответственно, в 38 % случаев по данным первичной сорбции и в 17 % по данным вторичной сорбции значения максимальной сорбции превысили 3 % (табл. 5).

**Изменение свойств пористых материалов слоистых конструкций объектов культурного наследия**

*Пористость.* На основании анализа литературных данных пористость новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, находится в диапазоне 20–40 %, с максимальной концентрацией в

районе 30 %, что хорошо коррелирует с полученными результатами по проведенным испытаниям (табл. 6). Отсюда можно сделать вывод, что изменений пористости исследуемых материалов не наблюдается.

*Размер пор.* Средний размер пор новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, стремится к микронному диапазону, что позволяет выявить явную тенденцию к снижению размера пор исследуемых материалов (табл. 7, 8). Следует отметить, что для раствора указанная тенденция проявляется значительно существеннее.

*Удельная поверхность.* Удельная поверхность новых материалов, как кирпичей, так и известковых растворов, в основном не превышает 2–3 м<sup>2</sup>/г, что

**Таблица 5  
Table 5**

**Сорбция при относительной влажности 98 % ( $A_{98}$ ) исследуемых кирпичей.  $A_{98-ср}$  – среднее значение сорбции;  $A_{98-1}$  – сорбция образцов с примесями (1) и без примесей (2); < 1 ... > 1 % – процент материалов с сорбцией соответствующего диапазона  
Sorption at a relative humidity of 98 % ( $A_{98}$ ) of the studied bricks.  $A_{98-ср}$  – the average sorption value;  $A_{98-1}$  – the sorption of samples with and without impurities (1) (2); < 1 ... > 1 % – percentage of materials with sorption of the corresponding range**

	$A_{98-1}$	$A_{98-2}$
$A_{98-ср}$	2,4	1,6
< 1 %	13	33
1–3 %	50	50
> 3 %	38	17

**Таблица 6  
Table 6**

**Сопоставление пористости исследуемых и новых материалов  
Comparison of porosity of investigated and new materials**

	Кирпич		Раствор	
	исследуемые	новые	исследуемые	новые
$P_{o-ср}$	29	29,6	32	31
< 30 %	42	46	21	39
30–40 %	58	46	75	55
> 40 %	0	8	4	6

**Таблица 7  
Table 7**

**Сопоставление среднего размера пор исследуемых и новых материалов  
Comparison of the average pore size of the investigated and new materials**

	Кирпич		Раствор	
	исследуемые	новые	исследуемые	новые
$d_{ср-ср}$ мкм	0,3	1,6	0,02	2,2
< 0,1 мкм (%)	13	0,3	100	0
0,1–0,5 мкм (%)	71	13	0	11
0,5–1 мкм (%)	17	29	0	0
> 1 мкм (%)	0	58	0	89

Таблица 8  
Table 8

Сопоставление процента микропор (менее 0,1 мкм) исследуемых и новых кирпичей  
Comparison of the percentage of micropores (less than 0.1 microns) of investigated and new bricks

	Исследуемые	Новые
$P_{0,1-ср}$	48	6,9
< 5 %	0	67
5–10 %	0	14
> 10 %	100	19

Таблица 9  
Table 9

Сопоставление удельной площади поверхности исследуемых и новых материалов  
Comparison of the specific surface area of the investigated and new materials

	Кирпич			Раствор		
	исследуемые		новые	исследуемые		новые
	$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$		$S_{уд-1}$	$S_{уд-2}$	
$S_{уд-ср}$ (M <sup>2</sup> /г)	7,4	6,2	1,25	24,8	16,2	1,7
< 5 M <sup>2</sup> /г	38	50	95	0	8	100
5–10 M <sup>2</sup> /г	33	29	4	13	21	0
> 10 M <sup>2</sup> /г	29	21	0,5	88	71	0

Таблица 10  
Table 10

Сопоставление максимальной сорбционной влажности исследуемых и новых кирпичей  
Comparison of the maximum sorption moisture of the studied and new bricks

	Кирпич		
	исследуемые		новые
	$A_{98-1}$	$A_{98-2}$	
$A_{98-ср}$	2,4	1,6	0,6
< 1 %	13	33	100
1–3 %	50	50	0
> 3 %	38	17	0

позволяет выявить явную тенденцию к возрастанию удельной поверхности исследуемых материалов (табл. 9). Следует отметить, что для раствора указанная тенденция проявляется значительно сильнее.

*Сорбционная влажность.* Данные по сорбционной влажности известковых растворов отсутствуют. Сорбционная влажность нового кирпича минимальна и в среднем не превышает 0,5 %, что позволяет выявить тенденцию к возрастанию гигроскопичности исследуемых кирпичей (табл. 10).

Сопоставление данных, полученных из литературных источников, с данными экспериментальных исследований показывает следующее:

– параметры объема пор исследуемых исторических материалов в целом не претерпели каких-либо явных изменений;

– параметры размеров пор и сорбционные характеристики слоистых материалов конструкций объектов культурного наследия демонстрируют явные и существенные изменения, выражающиеся в уменьшении среднего размера пор, возрастании количества микропор, удельной поверхности и сорбционных значений материалов;

– указанные тенденции проявляются как для кирпича, так и для раствора, однако интенсивность изменения тенденции для раствора выражена более явно.

### Выводы

Результаты представленной работы позволяют сделать следующие выводы относительно характера разрушения пористых слоистых материалов конструкций объектов культурного наследия, в той или иной степени подверженных долговременному воздействию влаги.

Существенное изменение свойств материалов на всех исследованных участках показывает, что, в отличие от однородных материалов, разрушение слоистых систем происходит не послойно, а в объеме всей глубины конструкции.

Уменьшение размера пор и увеличение удельной поверхности материалов указывает на повсеместное зарождение и развитие сетей микротрещин и появление пустотности. Данная тенденция зафиксирована на всех объектах исследования, вследствие чего ее можно считать характерным проявлением для всех слоистых материалов конструкций кладочного типа, находящихся в неблагоприятных влажностных условиях. Микропоры размером менее 0,1 мкм повышают вероятность возникновения внутренних напряжений в результате подверженности основным процессам физического разрушения, в связи с чем возрастание их количества увеличивает подверженность материалов деструкции. Фактически описываемые процессы можно считать самоускоряющимися, поскольку уязвимость материалов возрастает вместе с возрастанием степени микротрещиноватости и пустотности их структуры.

Поскольку микроструктура раствора подвержена более значительным изменениям, то можно предположить, что известковый раствор оказывается более уязвимым для деструктивных процессов, соответственно, именно он является ответственным за возникновение первичных сетей микротрещин.

#### Список литературы / References

- Ahmad A., Simon S., Middendorf B. Stone properties and damage induced by salt crystallisation in some Jordanian Stones. *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York, 2012.
- Cardell C., Benavente D., Rodríguez-Gordillo J. Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms. *Materials Characterization*. 2008, vol. 59, no. 10, pp. 1371–1385.
- Colas E. Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2011, 274 p.
- Cultrone G., Sebastián E. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials. *Environmental Earth Sciences*. 2008, vol. 56, no. 3, pp. 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1332-y>
- Franke W.A. The durability of rocks – Developing a test of rock resistance to chemical weathering. *American Journal of Science*. 2009, vol. 309, no. 8, pp. 711–730. DOI: <https://doi.org/10.2475/08.2009.04>
- Kamh G.M.E., Oguchi C., Watanabe K. Factors controlling salt susceptibility and alteration indices on salt weathering of oolitic limestone using single salt at five weathering regimes, a case study. *Restoration of Buildings and Monuments*. 2013, vol. 19, no. 6, pp. 393–416. DOI: <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6625>
- Kozłowski R., Magiera J., Weber J., Haber J. Decay and conservation of Pińczów porous limestone. I. Lithology and weathering. *Studies in Conservation*. 1990, vol. 35, no. 4, pp. 205–221.
- Labus M., Bochen J. Sandstone degradation: An experimental study of accelerated weathering. *Environmental Earth Sciences*. 2012, vol. 67, no. 7, pp. 2027–2042. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1642-y>
- Molina-Piernas E., Benavente D., Sebastián E., Cultrone G. The influence of rock fabric in the durability of two sandstones used in the Andalusian Architectural Heritage (Montoro and Ronda, Spain). *Engineering Geology*. 2015, vol. 197, pp. 67–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.009>
- Navarre-Sitchler A.K., Cole D.R., Rother G., Jin L., Heather L.B., Brantley S.L. Porosity and surface area evolution during weathering of two igneous rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013, vol. 109, pp. 400–413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.012>
- Nieminen P., Romu M. Porosity and frost resistance of clay bricks. *Brick and Block Masonry*. Elsevier / ed. De Courcy J.W. London, UK. 1988, vol. 1, pp.103–109.
- Stryszewska T., Kańka S. Microstructure of ceramic brick contaminated by magnesium sulphate. *Advances in Science and Technology*. 2014, vol. 92, pp. 203–208. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.92.203>
- Thomachot C. Modifications des propriétés pétrophysiques des grès soumis au gel ou recouverts "d'encroûtements noirs vernissés". Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
- Walbert C. Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti: étude du comportement hydromécanique. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2015, 188 p.
- Přikryl R., Melounová L., Varilova Z., Weishauptová Z. Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic). *Environmental Earth Sciences*. 2007, vol. 52, no. 2, pp. 409–420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0589-2>
- Tang Y., Shao Z., Xu T. Pore structure of ancient Chinese bricks under environmental vicissitudes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2016, vol. 20, no. 5, pp. 1895–1902. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0652-1>

17. Wetzel A., Einsele G. On the physical weathering of various mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 1991, vol. 44, no. 1, pp. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02602713>
18. Adamovič J., Mikuláš R., Schweigstillová J., Boehmova V. Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2011, vol. 8, no. 1. pp. 29–45.
19. Angeli M., Bigas J.-P., Menéndez B., Hébert R.L., David C. Influence of capillary properties and evaporation on salt weathering of sedimentary rocks. *Heritage Weathering and Conservation*, Madrid, Spain, 2006, pp. 253–259.
20. Jeannette D. Importance of the pore structures during the weathering process of stones in monuments. In: *Soils and Sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, pp. 177–190. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60525-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60525-3_9)
21. Beck K. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Université d'Orléans, 2006, 244 p.
22. Fookes P.G., Gourley C.S., Ohikere C. Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1988, vol. 21, no. 1, pp. 33–57. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1988.021.01.03>
23. Graue B., Siegesmund S., Middendorf B. Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements. *Environ Earth Sci*. 2011. vol. 63, pp. 1799–1822. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1077-x>
24. Garcia-Fernandez C.C. et al. Effect of environmental relative humidity in the tensile strength of layering in slate stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020, vol. 79, pp. 1399–1411. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01619-7>

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

**Евгений Валерьевич Шейкин**, начальник сектора диагностики влажностного и структурного состояния конструкций, Центральные научно-реставрационные проектные мастерские; соискатель, АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: [evg.sheykin@gmail.com](mailto:evg.sheykin@gmail.com)

**Evgeny V. Sheikin**, Head of the Sector for Diagnostics of Humidity and Structural condition of Structures, Central Scientific and Restoration Design Workshops; Applicant, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: [evg.sheykin@gmail.com](mailto:evg.sheykin@gmail.com)

Основоположники научных школ АО «НИЦ «Строительство»

УДК 929

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-63-75](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-63-75)

А.Л. КАЛИНИЧЕНКО

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

# НАХОДИЛ ПРИМЕНЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОНУ ТАМ, ГДЕ, КАЗАЛОСЬ БЫ, ЭТОМУ МАТЕРИАЛУ НЕТ МЕСТА

## Аннотация

*Введение.* Статья посвящена сотруднику НИИ железобетона доктору технических наук, профессору И.Г. Людковскому – специалисту в области строительных материалов и техники, одному из основателей научной школы в области железобетонных пространственных конструкций. Анализируется разносторонность взглядов Исаака Григорьевича Людковского, усовершенствовавшего и внедрившего множество технологических процессов применения железобетона на важных отечественных стройках. Он участвовал в реализации нового метода изготовления железобетонных напряженно-армированных труб больших диаметров, за что был удостоен Сталинской премии (1951). *Цель.* Исследование плодотворной научной деятельности профессора И.Г. Людковского в области теории железобетона, создания прогрессивных железобетонных пространственных конструкций, а также дополнение научной биографии ученого новыми фактами на основе изучения вновь открывшихся данных.

*Материалы и методы.* Автор, изучив архивные материалы по актуальной теме, с помощью ретроспективного, историко-типологического и сравнительного методов исследования показал отдельные стороны научной деятельности доктора технических наук, профессора И.Г. Людковского, определив степень его активного участия в развитии теории железобетона, конкретизировав наиболее значимые достижения исследователя в строительной науке.

*Результаты.* В статье проведено первое комплексное исследование научной деятельности профессора И.Г. Людковского в области применения бетона и железобетона в строительной индустрии, проанализированы вновь открывшиеся биографические данные ученого в период 1911–1990 гг.

*Выводы.* Расширена источниковая база исследования, введены в научный оборот новые архивные документы и материалы, подтверждающие своеобразие разносторонней личности профессора И.Г. Людковского,

его выдающиеся достижения в строительной науке в период 1935–1990 гг., заложившего основы научной школы в области железобетонных пространственных конструкций. А также определены роль и место в строительной науке профессора И.Г. Людковского как ученого-строителя. В статье отмечено огромное народно-хозяйственное значение исследовательской деятельности коллектива ученых НИИЖБ им. А.А. Гвоздева по созданию нового направления в строительной науке – напряженно-армированных железобетонных труб большого диаметра, железобетонных большепролетных пространственных конструкций, что позволило значительно удешевить и ускорить возведение промышленных конструкций, выразившееся в существенных экономических преимуществах в масштабах страны.

**Ключевые слова:** Исаак Григорьевич Людковский, НИИЖБ, теория железобетона, железобетонные напряженно-армированные трубы, Великая Отечественная война 1941–1945 гг.

**Для цитирования:** Калинин А.Л. Находит применение железобетону там, где, казалось бы, этому материалу нет места // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 63–75. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-63-75](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-63-75). EDN: QDEGCV

## 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 12.01.2025

Поступила после рецензирования 17.02.2025

Принята к публикации 20.02.2025

**A.L. KALINICHENKO**

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

# HE FOUND USE FOR REINFORCED CONCRETE WHERE, IT WOULD SEEM, THIS MATERIAL HAS NO PLACE

**Abstract**

*Introduction.* The article is devoted to an employee of the Research Institute of Reinforced Concrete, Doctor of Technical Sciences, Professor I.G. Ludkovsky, a specialist in the field of building materials and technology, one of the founders of the scientific school in the field of reinforced concrete spatial structures. The author analyzes the versatility of the views of Isaac Grigorievich Ludkovsky, who improved and implemented many technological processes for the use of reinforced concrete on important domestic construction sites. He participated in the implementation of a new method of manufacturing of the reinforced concrete stress-reinforced pipes of large diameters, for which he was awarded the Stalin Prize (1951).

*Aim.* The study of Professor I.G. Ludkovsky's fruitful scientific activity in the field of reinforced concrete theory, his creation of progressive reinforced concrete spatial structures, and the addition of new facts to the scientist's scientific biography based on the study of newly discovered data.

*Materials and methods.* The author, having studied archival materials on a relevant topic, using retrospective, historical, typological and comparative research methods, showed certain aspects of the scientific activity of Doctor of Technical Sciences, Professor I.G. Ludkovsky, determining the degree of his active participation in the development of the theory of reinforced concrete, specifying the most significant achievements of the researcher in construction science.

*Results.* The article provides the first comprehensive study of Professor I.G. Ludkovsky's scientific activities in the field of concrete and reinforced concrete applications in the construction industry, and analyzes the newly discovered biographical data of the scientist in the period of 1911–1990.

*Conclusions.* The source base of the research has been expanded, new archival documents and materials have been introduced into scientific circulation, confirming the uniqueness of the versatile personality of Professor I.G. Ludkovsky, his outstanding achievements in construction science in the period of 1935–1990, who laid the foundations of a scientific school in the field of reinforced concrete spatial structures. The role and

place of Professor I.G. Ludkovsky as a construction scientist in construction science are also determined. The article notes the great national and economic importance of the research activities of the team of scientists of the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev to create a new direction in construction science – stress-reinforced reinforced concrete pipes of large diameter, reinforced concrete large-span spatial structures, which significantly reduced the cost and accelerated the construction of industrial buildings, resulting in significant economic advantages nationwide.

**Keywords:** Isaac Grigorievich Ludkovsky, NIIZHB, theory of reinforced concrete, stress-reinforced concrete pipes, Great Patriotic War of 1941–1945

**For citation:** Kalinichenko A.L. He found use for reinforced concrete where, it would seem, this material has no place. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 63–75. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-63-75](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-63-75). EDN: QDEGCV

**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 12.01.2025*

*Revised 17.02.2025*

*Accepted 20.02.2025*

### Введение

Исаак Григорьевич Людковский (1911–1990) – доктор технических наук, профессор, лауреат Сталинской премии, посвятил свою научную, инженерную и педагогическую деятельность созданию методов расчета строительной механики и проектирования железобетонных конструкций, исследованию, разработке и практическому применению железобетонных конструкций в строительстве (рис. 1).

В течение тридцати лет (1960–1990-е гг.) талантливый инженер Людковский возглавлял лабораторию специальных железобетонных конструкций и труб НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, участвовал в разработке новых конструкций оболочек и складок для массовых уникальных отечественных сооружений и зданий. Результаты исследований сотрудники института активно внедряли на стройплощадках страны. Среди разработок: типовые и железобетонные оболочки покрытий размерами 19 × 24 м и 18 × 30 м, сборные силосы диаметром 12 м из панелей оболочек, панели-оболочки КЖС на пролеты 18 и 24 м и другие.

Кроме того, в ведущей лаборатории института под руководством профессора И.Г. Людковского активно проводились исследовательские и проектные работы по применению железобетона в машиностроении. Специалисты в короткие сроки разработали и успешно испытали серию принципиально новых железобетонных конструкций, подготовили методики их расчета, изыскав возможности существенного повышения прочности материалов, упругой работы и жесткости.

Применение железобетона в области машиностроения оказалось прогрессивным благодаря большому народнохозяйственному эффекту и послужило стимулом к совершенствованию качества строительного

материала, углубленным теоретическим, экспериментальным и конструкторским поискам исследователей.

Круг научных проблем, в разработку которых Исаак Григорьевич внес огромный вклад, весьма разнообразен. Так, исследования, выполненные ученым в 1943–1960 гг., явились крупным шагом в развитии практического использования железобетона. В этот период он активно занимался вопросами проектирования и изготовления напорных предварительно-напряженных железобетонных труб большого диаметра, был ответственным исполнителем «Технических условий на напорные железобетонные трубы». Инженер Людковский – автор первых станков для навивки напряженной арматуры на трубы (авторское свидетельство № 78574), впервые примененных в стране на строительстве объектов водопровода на участке объединения «Закавказметаллургстрой».

Кроме того, профессором И.Г. Людковским многое сделано в области совершенствования различных видов железобетонных конструкций. Он возглавил экспериментально-теоретические исследования, которые весьма успешно решались коллективом лаборатории специальных железобетонных конструкций НИИЖБ.

Ученый И.Г. Людковский подготовил несколько научных сборников, монографий, а также более 20 статей, посвященных различным направлениям своей исследовательской деятельности.

### Вдохновлялся жизненным примером Нансена

Автобиография, написанная рукой Исаака Григорьевича Людковского, бережно хранится в его личных делах на полках отечественных архивов. Краткий по содержанию рукописный текст, выведенный калли-



Рис. 1. Профессор И.Г. Людковский  
Fig. 1. Professor I.G. Ludkovsky

графическим почерком Исаака Григорьевича, лаконичен, скромно отражает последовательность жизненных событий глубокого и разностороннего человека, оставившего заметный след в отечественной строительной науке. Выделим, на наш взгляд, наиболее значимые вехи интересной судьбы ученого с мировым именем.

**Из автобиографии И.Г. Людковского:** [1]

«Я родился 16 марта 1911 г. на станции Олсуфьево, Бежицкого района, Брянской области. По сословию – из мещан. Мой отец, Людковский Григорий Борисович (1880 г.р.), работал в различных лесных конторах, длительное время исполнял обязанности старшего инженера Наркомлеса в Москве. Мать Людковская Екатерина Соломоновна (1882 г.р.) – домохозяйка. Родители проживают на станции Ухтомская.

Братья: Леонид Григорьевич – работает в НКПС старшим инженером в тресте «Трансгражданстрой»; Михаил Григорьевич – после окончания МИСИ работает в системе «Минавиапрома». Сестры: Роза Григорьевна – училась в МГУ, кандидат биологических наук, работает в Академии наук СССР; Белла Григорьевна – работала в институте экспериментальной медицины им. М. Горького.

В 1938 г. женился. Жена – Беглецова Мария Андреевна, инженер-строитель.

Трудовую деятельность начал в шестнадцать лет на временных работах в системе «Мосстроя» и «Тверьстроя» на должности конструктора-десятника (1927–1929).

Профессиональную и жизненную грамотность Исаак Григорьевич начал формировать еще будучи учащимся (1921–1927) Московской единой трудовой опытно-показательной школы № 10 имени Фрильофа Нансена. Можно сказать, мальчику из трудовой семьи сильно повезло, когда родители определили его на учебу в семилетку бывшей прославленной гимназии А.Е. Флерова, располагавшейся по адресу: Мерзляковский переулок, дом 11. В ее стенах учились известные в стране люди: актеры Игорь Ильинский и Николай Рыжов, ученый-генетик Николай Тимофеев-Ресовский, историк и философ Василий Зубов, лингвист профессор Александр Реформатский и другие. Школа воспитала юношу, развил в нем важные жизненные качества – выдержку и терпение, ответственность за свои поступки. Учителя помогали ему хорошо учиться, тем самым заложив своему старательному ученику первичные знания, сформировали экзистенциальное мировоззрение, способность думать и анализировать.

Многое запомнилось будущему видному исследователю Людковскому из школьной поры, но особенно его впечатлило посещение родной школы в 1925 году самим Нансеном, известным ученым, писателем, дипломатом и великим гуманистом, названным в свое время французским писателем Роменом Ролланом «Лучшим иностранцем России».

Современники, как и юный Людковский, восхищались личностью Фрильофа Нансена (1861–1930) – зна-

менитым путешественником и исследователем Арктики. Нансен, как известно, был не только героем-полярником, но и человеком огромной души и сердца. Как верховный комиссар Лиги Наций он содействовал возвращению в Россию около полумиллиона наших военнопленных после Первой мировой войны. Сотни тысяч жителей Поволжья, разоренные Гражданской войной, неурожаем и засухой 1921 года, были спасены благодаря Нансену: на средства, собранные по всему миру под свое имя, ему удалось направить в голодающую Россию 4 тысячи (!) поездов с продовольствием.

За помощь и любовь к России его избрали почетным членом Моссовета, назвали в честь него одну из школ столицы. В этом же 1922 году Нансен был удостоен Нобелевской премии мира. Премию, а также гонорар за свои сочинения он вложил в покупку сельскохозяйственных машин и организацию машинно-тракторных станций в СССР.

В то время взрослые и дети «страны Советов» подражали своему кумиру во всем, прежде всего в стремлении быть пионером в делах, помогать людям, приносить пользу своему государству. Не был исключением в этих жизнеутверждающих помыслах и школьник Исаак Людковский. Трудолюбие, поиск нового и неизведанного, стремление быть лидером в делах и начинаниях стали для него в жизни и творчестве определяющими чертами характера.

**Рук не покладая, созидал, создавал и строил**  
**Из автобиографии И.Г. Людковского:**

«С 1929 г. я работаю в системе НКТП («Металлострой», «Гипрострой», «Заводстрой», «Промстройпроект»). В 1932 г. окончил Архитектурно-конструкторский институт (МИСИ им. В.В. Куйбышева) в Москве. Со студенческих лет несколько моих проектов отмечены на всесоюзных конкурсах по строительству. Мною предложены изобретения и технические усовершенствования, давшие государству многомиллионную экономию».

Исаак Григорьевич, окончив после школы чертежно-конструкторские курсы, с 1929 г. непрерывно работал в Наркомстрое в системе «Главстройпроекта» в качестве проектировщика, инженера, руководителя группы. В должности начальника отдела ему поручали проектирование основных сооружений крупнейших строек страны: Кузнецкстроя, Ярославского резино-асбестового комбината, Нижне-Тагильского вагоностроительного завода, Днепровского алюминиевого комбината, автозавода им. И.В. Сталина и многое другое.

Еще студентом Исаак Григорьевич показал разносторонность и глубину своих знаний, участвуя во всесоюзных конкурсах, тем самым проявляя свои способности изобретателя, получал полезный опыт и отработывал знания на практике. На четырех из них его проекты получили высшие премии: в 1932 г. – по сборным многоэтажным зданиям (проект приобретен);

в 1931–1932 гг. – проект, организованный «Заводстроем» (проект осуществлен, дав свыше 400 000 руб. экономии); в 1933 г. – НКТП по сборным железобетонным конструкциям (за сборные метровые перекрытия), организованный «Главстройпромом»; в 1934 г. – отмечен «Дирижаблестроем» за проект эллинга для дирижаблей.

Исаак Григорьевич смело брался за разработку новых технических решений, направленных на совершенствование деятельности предприятий строительной отрасли. К примеру, инженера Людковского премировали за рационализаторское предложение по использованию лесов для изготовления арочных конструкций, что дало экономию около 1 млн руб., кроме того, это отмечено членами технического совета предприятий «Заводстрой» и «Госпроектстрой» как достижение советского строительства. Молодой инженер-новатор Людковский получил авторские свидетельства на сборные шатровые перекрытия и большепролетные перекрытия из сборных железобетонных элементов, набивную сваю и другие инженерные достижения.

Людковский помимо практической инженерной работы начиная с 1936 г. занимался научной и педагогической деятельностью. К примеру, увлеченно читал лекции, вел курс студентов-дипломников Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева.

Кроме того, он с большим желанием откликнулся на приглашения других НИИ поучаствовать в исследованиях научных тем в области строительства, где требовались его инженерные знания и опыт. В период 1934–1945 гг. Исаак Григорьевич опубликовал в технической печати около двух десятков научных статей. В 1940 г. И. Г. Людковский успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Управляющий предприятием «Промстройпроект» И.К. Иванов подписал 22 марта 1938 г. характеристику на инженера Людковского, в которой отмечал: «Квалифицированный, инициативный инженер, теоретически хорошо подготовлен. Имеет ряд рацпредложений и изобретений. Опубликовал ряд статей в журналах, премирован на конкурсах.

Проектировал конструкции ряда крупных промышленных и инженерных сооружений. В настоящее время – старший инженер площадки, проектирующей автозавод имени И.В. Сталина.

По политическим вопросам на собраниях неоднократно выступал. Политическое лицо достаточно выявлено в положительном смысле» [2].

В июле 1941 г. инженер Людковский руководил участком работ по строительству оборонных рубежей под Ельней.

За ратный труд офицер И.Г. Людковский награжден медалями «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

### **Железобетонные трубы большого диаметра**

В послевоенный период железобетон получил широкое распространение при строительстве самых разнообразных конструкций и сооружений (железобетонные мосты, градирни, водопроводные трубы, заводские трубы, перекрытия и т. д.). В результате плодотворной работы исследователей в области строительной механики и теории расчета железобетонных конструкций в стране впервые в мире разработали и приняли в качестве обязательной в общегосударственном масштабе теорию расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения.

Инженер К. Зубарев, управляющий Всесоюзной конторы типового проектирования и технических исследований (КТИС): «Начальник сектора специальных конструкций кандидат технических наук тов. Людковский И.Г. с 1943 г. непрерывно занимается вопросами проектирования и изготовления напорных предварительно-напряженных железобетонных труб.

За проявленную высокую творческую инициативу по освоению производства труб тов. Людковский И.Г. в 1950 г. получил значок «Отличник социалистического соревнования» Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии» [3] (рис. 2, 3).

Последовали и другие важные научные достижения отечественных ученых, которые, к примеру, отмечали большой эффект при изготовлении железобетонных конструкций с предварительным напряжением. Они пришли к выводу, что если арматуру железобетонного элемента до бетонирования сильно натянуть, а после отвердения бетона отпустить, то стержни арматуры, стремясь вернуться к своей первоначальной длине, создают обжатие бетона. При этом растягивающие напряжения в бетоне под действием нагрузки уменьшаются, устраняется и возможность образования трещин.

Одним из наиболее широко распространенных видов предварительно напряженных изделий заводского изготовления стали железобетонные водопроводные трубы, применение которых высвобождало большое количество металла, что помимо экономического эффекта было технически целесообразно, так как металлические трубы довольно быстро подвергаются коррозии как изнутри, так и снаружи. Срок их службы в среднем не превышает 30 лет.

Между тем ежегодный расход металла на чугунные и стальные трубы еще до войны составлял не менее 800 000–1 000 000 тонн. В послевоенный период восстановления народного хозяйства страны выпуск металлических труб значительно возрос. Если учесть, что количество металла, расходуемого на производство труб, значительно превышало их вес, то суммарный расход металла на трубы возрос до 2 000 000 тонн в год.

Однако, несмотря на столь большой расход металла на трубы, потребность страны в трубах не удовлетворялась.

Проведенная коллективом ученых и инженеров работа доказала реальную возможность быстрой орга-

низации массового выпуска полноценных заменителей металлических труб. Целесообразность выпуска напорных предварительно напряженных железобетонных труб не вызвала никаких сомнений.

По сравнению с металлическими трубами они давали до 90 % экономии металла. Стоимость их была примерно в 2–2,5 раза меньше стоимости чугунных труб и в 1,5 раза меньше стоимости стальных труб. Кроме того, они долговечнее металлических труб и требуют значительно меньших эксплуатационных расходов на электроэнергию и очистку водоводов.

Для того чтобы обычную трубу из железобетона превратить в напорную, необходимо предотвратить возможность появления в ней трещин при внутреннем давлении, чего нельзя достигнуть без предварительно напряжения арматуры. Обе эти важнейшие задачи были решены.

Высокого качества выпускаемых напорных железобетонных труб достигли благодаря новой совершенной технологии и оборудованию.

Практика показала, что первая партия труб может быть выпущена всего через три месяца после начала строительства завода, в то время как на строительство завода по производству металлических труб требовалось несколько лет, причем капитальные затраты на такое производство в сотни раз превышали капитальные затраты на строительство завода железобетонных труб.

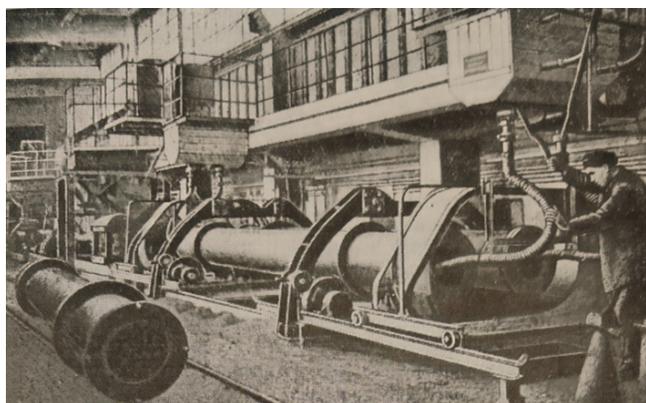


Рис. 2. Центробежный станок для изготовления железобетонных водопроводных труб

Fig. 2. Centrifugal machine for the reinforced concrete water pipes manufacture

Новый способ производства железобетонных напорных труб в основном заключается в следующем.

В простейших камерах для паропрогрева, которые могут быть сооружены в помещении цеха или на открытой площадке, изготавливаются железобетонные сердечники в металлических вертикальных формах и с помощью специального бетоноукладчика конструкции, предложенной инженером В.И. Овсянкиным (авторское свидетельство № 76461 и № 393380-УШ-2).

Навивка спирали на трубы малых и средних диаметров производится на станках конструкции кандидата технических наук И.Г. Людковского (авторское свидетельство № 78674), впервые в Союзе предложившего и освоившего такие станки, а навивка на трубы диаметром до 900 мм и более производится на мощном станке, изготовленном в тресте «Закавказметаллургстрой» по предложению инженеров В.И. Овсянкина и В.И. Шевченко (авторское свидетельство № 461463-УШ-1).

Навивая под напряжением спиральную арматуру на предварительно изготовленную железобетонную трубу (сердечник), вызывают появление в стенках трубы сжимающих напряжений, что облегчает работу стенок на растяжение от внутреннего давления в процессе эксплуатации.

Специалисты отмечали, что советские станки значительно совершеннее аналогичных иностранных и строились на ином принципе. Так, после навивки труб высокопрочной проволокой производилось торкретиро-

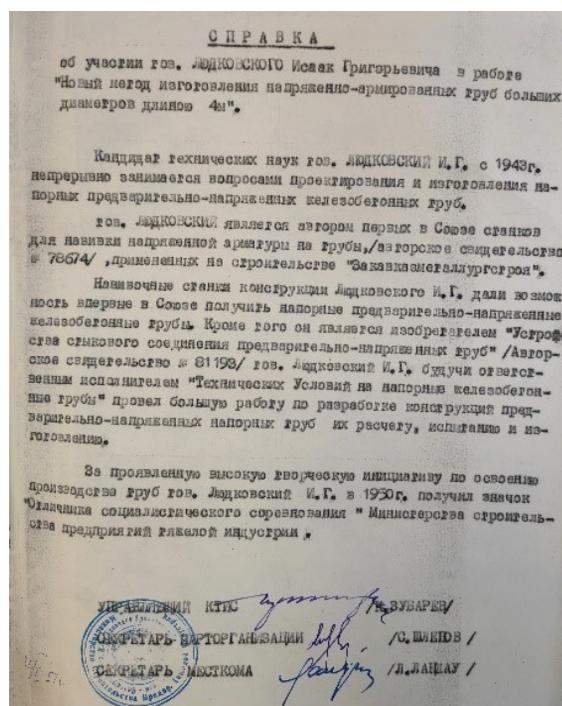


Рис. 3. Справка об участии И.Г. Людковского в разработке железобетонных труб большого диаметра

Fig. 3. Information about I.G. Ludkovsky's participation in the large diameter reinforced concrete pipes development

вание наружной поверхности обычным или расширяющимся цементом. А для стыковки труб изготавливались железобетонные предварительно напряженные муфты.

Впервые в стране применены напорные предварительно напряженные железобетонные трубы, изготовленные новым отечественным способом трестом «Закавказметаллургстрой» Главгостроя, при строительстве грандиозного 110-километрового Булачаурского водопровода.

Эксплуатация установки в г. Рустави подтвердила целесообразность предложенного метода изготовления железобетонных труб, его простоту и дешевизну. Опыт трехлетней работы станков для навивки напряженной арматуры на трубы показал, что станки полностью обеспечивают возможность получения напорных предварительно напряженных железобетонных труб необходимой длины и диаметра, удобны в эксплуатации и безотказны в работе.

Весьма сложное оборудование заводской установки, простота сооружений и небольшие затраты, требующиеся для организации производства, обеспечивали широкое распространение изготовления труб указанным способом.

В представлении на Сталинскую премию министр строительства предприятий тяжелой индустрии Д. Райзер отмечал (рис. 4): «Авторами настоящей работы в течение ряда лет проведена большая творческая

работа по разработке новой технологии изготовления железобетонных напряженно-армированных труб больших диаметров и по созданию новых типов оборудования для их изготовления (навивочные станки, формы, бетоноукладчик и др.).

Применение железобетонных преднапряженно армированных труб взамен чугунных позволяет сократить расход металла и снизить стоимость строительства трубопровода.

Предложенный авторами новый метод изготовления железобетонных напряженно армированных труб: изготовление их в вертикальных металлических формах простой конструкции с применением высококачественной вибрации с последующей завивкой напряженной спирали и торкретированием. Способ не требует изготовления сложного технологического оборудования и обеспечивает широкое применение железобетона в трубопроводах взамен остродефицитных металлических труб.

На установке, построенной в тресте «Закавказметаллургстрой», за 1949–1950 гг. изготовлено по указанному методу и уложено в трубопроводах железобетонных труб диаметром до 1250 мм – 7980 погонных метров.

Министерство в 1951 г. предусматривает строительство новых 5-ти таких установок для изготовления железобетонных преднапряженно армированных труб.

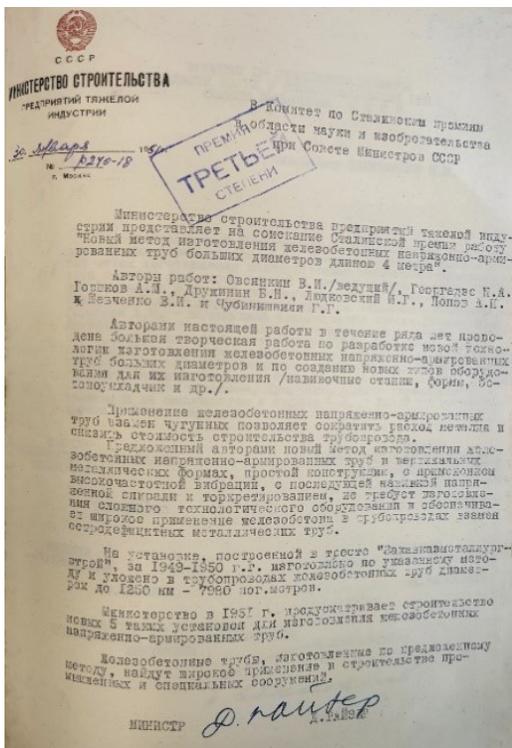


Рис. 4. Отзыв министра строительства предприятий тяжелой индустрии Д. Райзера  
 Fig. 4. Review of the Construction of Heavy Industry Enterprises Minister D. Raiser

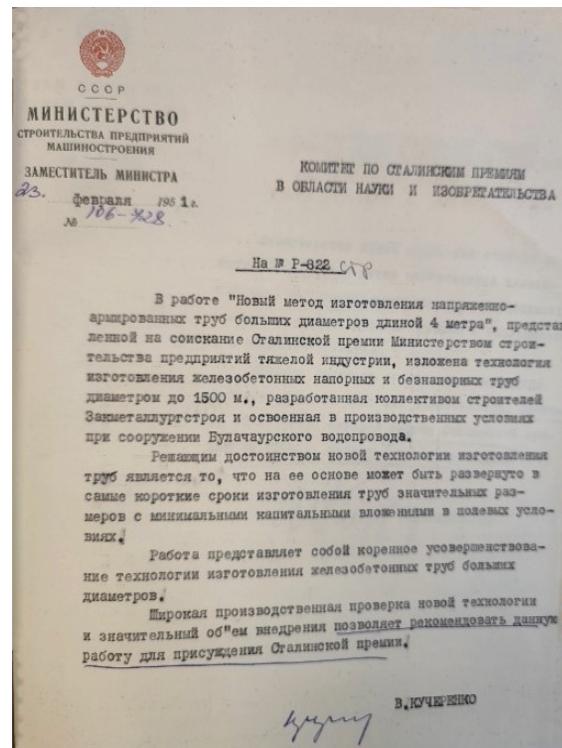


Рис. 5. Отзыв заместителя министра строительства предприятий машиностроения В.А. Кучеренко  
 Fig. 5. Review of the Construction of Machine-building Enterprises Deputy Minister V.A. Kucherenko

Железобетонные трубы, изготовленные по предложенному методу, найдут широкое применение в строительстве промышленных и специальных сооружений» [4].

Предложение всячески поддержал В.А. Кучеренко, заместитель министра строительства предприятий машиностроения, направив 23 февраля 1951 г. письмо в комитет по Сталинским премиям в области науки и изобретательства (рис. 5).

«Решающим достоинством новой технологии изготовления труб является то, что на ее основе может быть развернуто в самые короткие сроки изготовление труб значительных размеров с минимальными капитальными вложениями в полевых условиях. Работа представляет собой коренное усовершенствование технологии изготовления железобетонных труб больших диаметров.

Широкая производственная проверка новой технологии и значительный объем внедрения позволяют рекомендовать данную работу для присуждения Сталинской премии» [5].

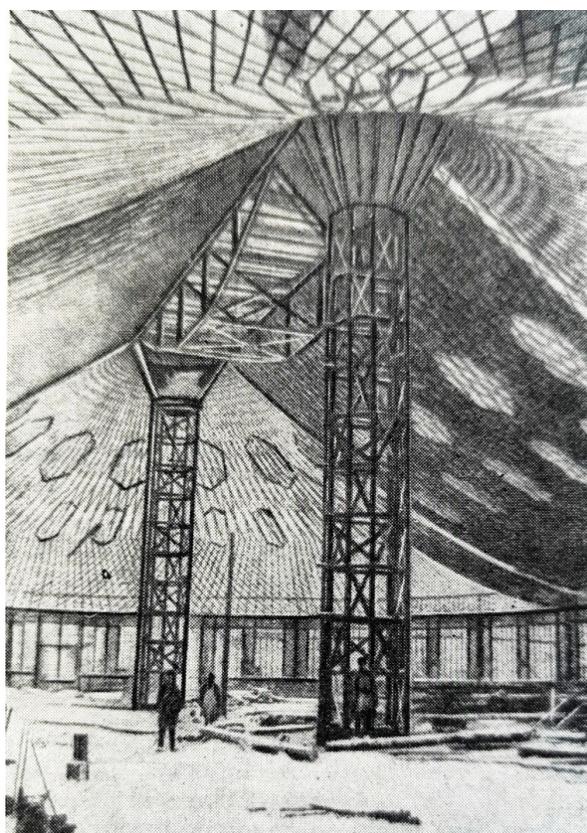
За разработку и внедрение нового метода изготовления железобетонных напряженно армированных труб больших диаметров группе специалистов, в том числе инженеру И.Г. Людковскому, присуждена Сталинская премия.

### Висячие покрытия

Специалисты строительной сферы, возводя современные сооружения, активно применяют висячие покрытия. Их преимущества, по сравнению с другими конструкциями, очевидны, прежде всего, наличием прочностных характеристик используемых материалов. Кроме того, для гибких растянутых вант возможно применение материалов высокой прочности. Важно, что висячие конструкции могут возводиться из сборных элементов без обустройства на стройплощадке лесов и подмостей, экономя материальные ресурсы и время. Кроме того, радиально-вантовые висячие покрытия позволяют получать здания такой пространственной формы, которая наиболее близко описывает габариты технологического оборудования.

Известно, что первопроходцем использования подобного метода в России является выдающийся инженер и изобретатель Владимир Григорьевич Шухов. Он в 1886 г. на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде перекрыл площади четырех павильонов различными висячими покрытиями. Его революционная инженерная идея, к сожалению, тогда не прижилась (рис. 6).

Лишь в 1950–1960-е гг. организатор и руководитель лаборатории специальных железобетонных конструкций НИИЖБ Исаак Григорьевич Людковский обратил внимание технической общественности на огромные



**Рис. 6.** Висячие сетчатые покрытия системы В.Г. Шухова  
**Fig. 6.** Hanging mesh roofs by the V.G. Shukhov system

архитектурные и технические возможности проектирования и строительства висячих покрытий.

Последователи профессора Людковского в научной деятельности кандидаты технических наук Б.М. Браславский и Е.П. Харитоновна отмечали: «Исаак Григорьевич, взявшись за дело с присущей ему энергией и настойчивостью, квалифицировал висячие конструкции, разработал критерии оценки их эффективности, поставил и возглавил проблему экспериментально-теоретических исследований в этой области, которые весьма успешно решались коллективом лаборатории специальных железобетонных конструкций НИИЖБ» [6].

Под руководством и при непосредственном участии И.Г. Людковского сотрудниками НИИЖБ В. Лесниковым, Ф.А. Гохбаумом, Э.Н. Кузнецовым, Т.А. Усачевым, Е.П. Харитоновой, М.А. Ивановым и другими успешно решали сложные задачи, связанные с изучением работы вантовой системы, оболочек и совместно с ними опорного контура, а также задач прикладного характера, относящихся к их проектированию и возведению.

Специалисты лаборатории разрешили множественные трудности теоретического свойства. К примеру, они доказали, что опорный контур не может потерять устойчивость в своей плоскости при практически имеющих место нагрузках на покрытие. При несимметричной нагрузке на покрытие в опорном контуре возникают сравнительно небольшие изгибающие моменты за счет перераспределения усилий через посредство центрального узла. Превращая вантовую систему в железобетонную оболочку, нагружаемую неравномерной нагрузкой, изгибающие моменты в опорном контуре становятся минимальными. Таким образом, сотруд-

ники НИИЖБ сделали вывод: при расчете опорного контура висячей оболочки несимметричное расположение снеговой нагрузки на покрытии может не учитываться. В вантах и во внутреннем кольце действуют в основном растягивающие усилия, внешнее опорное кольцо работает в основном на сжатие, что позволяет для их изготовления с наибольшей эффективностью использовать прочностные характеристики железобетона и арматуры.

Проведенные исследования под руководством И.Г. Людковского позволили рекомендовать висячие железобетонные оболочки для возведения различных большепролетных сооружений. Эти конструкции позволяли перекрывать без промежуточных опор очень большие пролеты и получать форму поверхности без дополнительных затрат.

Практика строительства зданий с использованием новой технологии перекрытий показала надежность и эффективность ее применения. Пример тому – проект перекрытия над трибунами Большой спортивной арены в Лужниках, аналогичный проект для стадиона «Динамо» (1970-е гг.). Модель крытого стадиона «Динамо» была построена на территории НИИЖБ, корпус № 15, а затем превращена в административное здание.

Прообразом висячих покрытий на основе радиально-вантовых систем отрицательной гауссовой кривизны может служить здание павильона с центральной опорой, построенное в г. Люберцы Московской области.

В 1968 г. отечественные строители возвели во Владивостоке двухзальный кинотеатр «Океан». Основным объемом этого здания, имеющего эллиптическое очертание в плане с осями 64 × 38 м, перекрыли сборно-монолитной преднапряженной висячей оболочкой

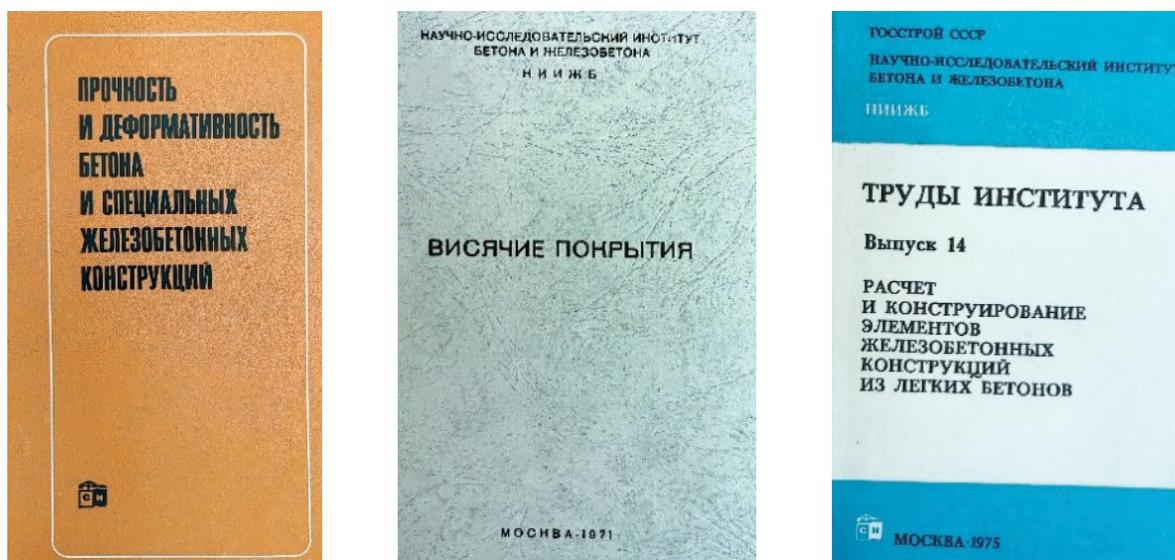


Рис. 7. Обложки научных изданий с публикациями И.Г. Людковского  
Fig. 7. Covers of books with I.G. Ludkovsky publications

вогнутого типа с плоским железобетонным опорным контуром.

Шатровое покрытие стоянки автобусов диаметром 102 м, возведенное в Новгороде, имело характерную особенность, которая впервые применялась при строительстве такого типа зданий, – центральную колонну, воспринимающую практически всю вертикальную нагрузку, разделили сферическим шарниром по высоте на две части. Подобное решение позволило практически полностью исключить появление изгибающих моментов во внешнем опорном контуре и, как следствие этого, снизить расход материалов.

Опыт, приобретенный в результате выполненных исследований, проектирования и возведения мембранных висячих покрытий, в полной мере использовали при создании проекта покрытия над трибунами Большой спортивной арены в Лужниках. Работы выполнялись под руководством И.Г. Людковского авторским коллективом в составе архитекторов Л. Гильбурда, А. Симонова, В. Давыденкова, Ю. Евтухова, инженеров А. Филякина и М. Иванова.

Размер перекрываемого пространства стадиона без промежуточных опор составлял 238 × 298 м. Отверстие в центре покрытия равнялось размеру футбольного поля, и оно в точности повторяло его конфигурацию. Таким образом, внешний и внутренний контуры покрытия имели прямолинейные вставки, величина которых приближалась к 100 м.

Конструкция, предназначенная для перекрытия спортивного сооружения, прошла всестороннюю экспериментально-теоретическую проверку, модели ее были испытаны на действие постоянных и временных нагрузок, проверены путем продувки в аэродинамической трубе ЦАГИ, испытаны на действие нагрузок при пожаре, показав высокую надежность.

Многие конструктивные решения висячих покрытий найдены и реализованы в лаборатории специальных железобетонных конструкций НИИЖБ под руководством доктора технических наук, профессора Исаака Григорьевича Людковского. Что касается эффективности применения железобетона для контурных элементов перекрытий, ученый отмечал, что «это позволит в 2,5 раза снизить расход стали по сравнению со стальным контуром и резко уменьшить стоимость покрытия. Важно, что железобетонный контур практически не увеличивает расчетную нагрузку на фундамент» [7].

### **Железобетон в тяжелом машиностроении**

На рубеже 1980-х гг. достижения строительной науки позволяли изготавливать железобетонные конструкции, обладающие высокой прочностью, жаростойкостью и химической стойкостью, другими важнейшими свойствами. Так, многие марки бетона легко выдерживали температуру до 800 °С, специальные – даже до 1200–1600 °С, а прочность предварительно напряженного железобетона достигала 200 МПа и была по характеристикам сопоставима с прочностью

конструкционных сталей. Все это позволяло широко применять железобетон взамен металла в машиностроении.

Ряд предприятий и цехов строительной индустрии без ущерба для строительства переоснащали для выпуска железобетонных базовых деталей.

Специалистами НИИЖБ выполнена большая работа по исследованию, изготовлению и проверке в производственных условиях машин с базовыми деталями из железобетона, а также с заводами разработана техническая документация на некоторые типы станков кузнечно-прессовых машин и других видов оборудования с базовыми деталями из железобетона, выпущены соответствующие инструктивно-рекомендательные материалы.

Опытно-промышленная эксплуатация оборудования показала, что все железобетонные элементы машин удовлетворяли требованиям машиностроения: за 10–20-летний период работы их прочностные и жесткостные характеристики существенно не изменились, что служило предпосылкой для массового внедрения железобетона в машиностроение.

Ко многим элементам специальных конструкций предъявляются высокие требования с точки зрения сохранения во времени размеров и формы, что является одним из условий обеспечения жесткости не только самой конструкции, но и крепления закладных деталей, тогда как в обычных строительных конструкциях достаточно обеспечить прочность соединения закладной детали с бетоном. К примеру, неплоскостность направляющих станин допускается в пределах 0,02 на 1000 мм, а упругие смещения закладной детали не должны превышать 0,01–0,015 мм.

В связи с этим под руководством профессора И.Г. Людковского были проведены комплексные исследования по изучению изменения во времени размеров и формы железобетонных элементов за счет усадки бетона, прочности и деформативности крепления в железобетоне закладных деталей и анкеров различного типа.

Исследователь И.Г. Людковский в статье «Некоторые основные итоги исследований по применению железобетона в тяжелом машиностроении и прессостроении» сделал вывод, что в стране «создана современная теория расчета железобетонных конструкций, которая принималась и зарубежными строителями. Она основана на обширном экспериментальном материале, позволявшем проектировать самые разнообразные строительные конструкции» [8].

На практике наиболее целесообразной эта замена оказалась для массовых малонагруженных изделий, серийно выпускаемых машиностроительными заводами. К ним относились фундаментные и опорные плиты агрегатного оборудования, например компрессорного или насосного. Серийное производство железобетонных опорных плит одним из первых освоили на Свердловском заводе дефибрерных камней.

Продукция поставлялась на производства министерства химического и нефтяного машиностроения, в том числе на московский завод «Компрессор» и Щелковский насосный завод.

Рассматриваемые плиты предназначались для жесткого объединения отдельных узлов агрегата: насоса с электродвигателем, компрессора с электродвигателем и т. д. Смещение узлов недопустимо, так как оно может привести к снижению долговечности агрегата в результате ускоренного износа втулок и подшипников. Поэтому требуется, чтобы опорные плиты имели достаточные прочность и жесткость, обеспечивающие сохранность зафиксированного при монтаже взаимного положения узлов оборудования.

При существовавшем объеме выпуска агрегатов только в отрасли насосного машиностроения на фундаментные плиты и опорные конструкции расходовалось в год более 100 тыс. т металла. Применение железобетона для фундаментных плит дает большие технико-экономические преимущества. Значительно улучшились эксплуатационные качества конструкции, так как железобетон обладал повышенной демпфирующей способностью (примерно в 5 раз более высокой, чем у чугуна). Резко снизился и расход металла.

Внедрение железобетонных фундаментных плит для ограниченной номенклатуры по подсчетам И.Г. Людковского по пяти заводам министерства химического и нефтяного машиностроения давало экономию металла около 4500 т в год.

При организации массового применения фундаментных плит на всех предприятиях Минхиммаша СССР годовая экономия составляла около 60 тыс. т металла и 8,5 млн рублей. Подобная экономия могла быть получена при выпуске всего 4000 м<sup>3</sup> железобетонных плит, что в 4–5 раз меньше производительности одного современного завода сборного железобетона.

Результаты проведенных исследований железобетонных опорных плит и их серийного внедрения в лабораторных условиях под руководством профессора И.Г. Людковского позволили сделать важные выводы: плиты имеют достаточный запас прочности и трещиностойкости при действии статических нагрузок; конструкция плит и технология их изготовления обеспечивают все требования по плоскостности, взаимной параллельности установочных поверхностей и точности межцентровых расстояний; размеры плит достаточно стабильны при транспортировке и в условиях эксплуатации; при установке агрегата непосредственно на железобетонную поверхность не требуется дополнительных фиксирующих приспособлений; сокращается расход металла на плиты, снижаются стоимость и трудовые затраты при изготовлении.

### Заключение

В статье представлен историографический анализ научной деятельности профессора И.Г. Людковского, теоретика и практика, заложившего основы развития

отечественной теории по созданию железобетонных пространственных конструкций.

По признанию научного сообщества доктор технических наук, профессор И.Г. Людковский внес существенный вклад в развитие отечественной науки, являясь крупным специалистом в области железобетонных конструкций, всяких перекрытий и строительных материалов. Он не только сделал ряд фундаментальных открытий в разных областях строительной науки, но и провел огромную целенаправленную работу по созданию отечественной школы железобетонных пространственных конструкций.

Благодаря фундаментальным исследованиям профессора И.Г. Людковского путевку в жизнь получили всякие конструкции, которые сегодня широко распространены в строительстве. Можно назвать революционными его инженерные идеи по анализу и особенностям работы, по применению покрытий в строительстве тонколистовых мембран. Он доказал, что, несмотря на минимальную толщину несущей тонколистной конструкции, она обладает большой надежностью: мембрана, изготовленная из сталей обыкновенного качества, имеющих относительное удлинение более 18 %, представляет собой практически неразрушимую конструкцию. Это обусловлено тем, что с увеличением нагрузки резко возрастает стрела провеса покрытия, а следовательно, и его несущая способность. Кроме того, Людковский предложил применять железобетон для изготовления опорного контура, что дало не только экономию средств, но и повлияло на надежность конструкции.

Выявленное и опытно подтвержденное свойство всяких мембранных конструкций И.Г. Людковского по предложению доктора технических наук, профессора А.А. Гвоздева рассматривалось на ученом совете НИИЖБ и было названо им «как открытие в области строительной механики и строительных конструкций» [9].

Член-корреспондент Академии наук СССР И.М. Рабинович в своем заключении об открытых свойствах мембранных систем в отклике на научные предложения профессора И.Г. Людковского отмечал, что «в принципе опорный контур может быть выполнен в виде замкнутого плоского шарнирного многоугольника, способного воспринимать лишь нормальные сжимающие усилия» [10], тем самым подтверждая правильность направления исследований ученого.

Исаак Григорьевич внес существенный вклад в создание железобетонных конструкций высокой прочности, трещиностойкости и жесткости, которые обеспечивают длительное сопротивление многократно повторяющимся ударным и вибрационным нагрузкам, что позволяет в ряде случаев применять железобетон вместо металла при изготовлении специальных конструкций и сооружений, а также в различных отраслях машиностроения.

Специалист в области строительных материалов и техники профессор И.Г. Людковский со своими коллегами путем исследований показал целесообразность применения железобетона в машиностроении для изготовления как станин прессов и других несущих элементов машин, воспринимающих значительные нагрузки, так и многих малонагруженных базовых деталей. Надо отметить, что опыт применения железобетонных опорных плит в масштабах страны выявил их значительную технико-экономическую эффективность.

Результативная работа исследователей лаборатории специальных железобетонных конструкций и труб во главе с профессором И.Г. Людковским способствовала созданию и внедрению конструкций оболочек и складок для массовых и уникальных сооружений и зданий в отечественном строительстве.

Исаак Григорьевич придавал большое значение вопросам широкого применения трубобетона в машиностроении, к примеру, не только для стоек прессов, клетей прокатных станов и других неподвижных частей различных станин, но и в подвижных рабочих элементах: плунжерах, подштамповых блоках и т. д. Он, поднимая планку требований к условиям изготовления изделий, подтверждал: «Важно, чтобы они работали в упругой стадии и деформации были минимальными» [11].

Изобретатель И.Г. Людковский – автор первых в стране станков для навивки напряженной арматуры на трубы (авторское свидетельство № 78574), примененных на строительстве «Закавказметаллургстроя». Кроме того, он является изобретателем «Устройства стыкового соединения предварительно напряженных труб» (авторское свидетельство № 81193). Инженер И.Г. Людковский будучи ответственным исполнителем «Технических условий на напорные железобетонные трубы» провел большую работу по разработке конструкции предварительно напряженных напорных труб, их расчету, испытанию и изготовлению.

К сожалению, отдельные проекты и разработки И.Г. Людковского остались нереализованными (прессы усилием до 500 тыс. тонн, покрытия пролетом свыше 200 метров, оригинальные конструкции дороги до северных районов страны, железобетонные специальные суда и др.).

Таким образом, исследователь Исаак Григорьевич Людковский со своими единомышленниками сформировал в коллективе исследователей НИИЖБ им. А.А. Гвоздева отечественную научную школу, ставшую основой для новых достижений в области железобетонных пространственных конструкций в отечественной строительной науке.

Последователи и ученики лестно отзывались о деятельности профессора И.Г. Людковского, его высоких нравственных качествах, отмечая выдающийся вклад ученого в науку и практику строительной отрасли страны.

И.Г. Овчинникова, кандидат технических наук, сотрудник НИИЖБ им. А.А. Гвоздева: «В полной мере отношу себя к числу множественных учеников Исаака Григорьевича. Очень дорожу тем, что он выступал моим научным руководителем при защите кандидатской диссертации, конечно, во многом помогал мне в исследовательской работе. Профессор Людковский обладал не только глубокими профессиональными знаниями, но и педагогическим талантом. В его характере преобладали чувство такта, уважение к коллегам, всегда поощрял их инициативу, не навязывал своих убеждений, в то же время в людях ценил самостоятельность и творческий поиск на научной ниве».

Б.М. Браславский, кандидат технических наук: «Творческий путь Исаака Григорьевича был многогранен. В нем гармонично сочетались качества талантливого ученого, выдающегося инженера и замечательно новатора. Его вклад в науку о железобетоне трудно переоценить, он находил ему применение там, где, казалось бы, этому материалу нет места» [11].

#### Список литературы

1. Архив АО «НИЦ «Строительство» (НИИЖБ). Личное дело профессора И.Г. Людковского. 1957 г. 25 с.
2. РГАЭ. Ф.8593. О. 20. Д. 2691.
3. РГАЭ. Ф.8593. О. 20. Д. 2691.
4. РГАЭ. Ф.180. О. 10. Д. 159.
5. РГАЭ. Ф.180. О. 10. Д. 159.
6. Браславский Б.М., Харитонов Е.П. Висячие конструкции и их применение в строительстве // *Бетон и железобетон*. 2002. № 4. С. 4–6.
7. Людковский И.Г. Комбинированные висячие покрытия. Труды НИИЖБ. Выпуск № 8. Москва: Стройиздат, 1973. С. 4–17.
8. Людковский И.Г. Применение железобетона машиностроении: сборник статей. Москва: Машиностроение, 1964. С. 16–25.
9. Железобетонные конструкции в машиностроении и висячих покрытиях: (05.23.01): (Новые решения в обл. применения). Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. Москва, 1980. 53 с.
10. Прогрессивные методы крепления оборудования к фундаментам. Москва: Стройиздат, 1978. 114 с.
11. Применение железобетона в машиностроении: Сборник статей / Под ред. канд. техн. наук И.Г. Людковского. Москва: Машиностроение, 1964. 503 с.
12. Опыт применения железобетона в машиностроении: (по материалам координационной конференции) / под ред. канд. техн. наук И.Г. Людковского. Москва, 1964. 119 с.
13. Производство предварительно напряженных железобетонных напорных труб / кандидаты техн. наук А.Н. Попов и И.Г. Людковский. Москва: Госстройиздат, 1958. 19 с.
14. Железобетон в конструкциях и фундаментах машин: Сб. науч. тр. / НИИ бетона и железобетона. Москва: НИИЖБ, 1984. 99 с.

15. Исследование висячих покрытий зданий и сооружений: Сб. науч. тр. / НИИ бетона и железобетона. Москва: Стройиздат, 1980. 115 с.
16. Прочность и деформативность бетона и специальных железобетонных конструкций / Госстрой СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона «НИИЖБ». Москва: Стройиздат, 1972. 191 с.
17. Висячие покрытия: труды науч. сессии ин-та, 1970 / Госстрой СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона «НИИЖБ». Москва: Отдел научно-технической информации НИИЖБ, 1971. 240 с.
18. Висячие покрытия кругового очертания в плане / под редакцией И.Г. Людковского. Москва: Госстройиздат, 1962. 161 с.
19. Висячие покрытия (исследования, опыт проектирования и внедрения) / под редакцией И.Г. Людковского. Москва: Отдел научно-технической информации НИИЖБ, 1973. 133 с.
20. Сборные железобетонные опорные плиты агрегатного оборудования / под редакцией И.Г. Людковского, М.И. Браиловского. Москва: Стройиздат, 1974. 85 с.

#### References

1. Archive of JSC Research Center of Construction (NIIZHB). Personal file of Professor I.G. Ludkovsky. 1957, 25 p. (In Russian).
2. RSAE. F.8593. O. 20. D. 2691. (In Russian).
3. RSAE. F.8593. O. 20. D. 2691. (In Russian).
4. RSAE. F.180. O. 10. D. 159. (In Russian).
5. RSAE. F.180. O. 10. D. 159. (In Russian).
6. Braslavskiy B.M., Kharitonova E.P. Hanging structures and their application in construction. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2002, no. 4, pp. 4–6. (In Russian).
7. Ludkovsky I.G. Combined hanging coverings. The works of NIIZHB. Issue No. 8. Moscow: Stroyizdat Publ., 1973, pp. 4–17. (In Russian).
8. Ludkovsky I.G. Application of reinforced concrete in mechanical engineering: collection of articles. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964, pp. 16–25. (In Russian).
9. Reinforced concrete structures in mechanical engineering and suspended coverings: (05.23.01): (New solutions in the field of application). Abstract of the dissertation for Dr. Sci. (Engineering) academic degree. Moscow, 1980, 53 p. (In Russian).
10. Progressive methods of fastening equipment to foundations. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978, 114 p. (In Russian).
11. Application of reinforced concrete in mechanical engineering: A collection of articles / edited by Cand. Sci. (Engineering) I.G. Ludkovsky. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964, 503 p. (In Russian).
12. The experience of using of the reinforced concrete in mechanical engineering: (based on the materials of the coordination conference) / edited by Cand. Sci. (Engineering) I.G. Ludkovsky. Moscow, 1964, 119 p. (In Russian).
13. Production of prestressed reinforced concrete pressure pipes / Cand. Sci. (Engineering) A.N. Popov and I.G. Ludkovsky. Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1958, 19 p. (In Russian).
14. Reinforced concrete in structures and foundations of machines: Collection of scientific papers / Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete. Moscow: NIIZHB, 1984, 99 p. (In Russian).
15. Research of hanging coverings of buildings and structures: Collection of scientific papers / Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, 115 p. (In Russian).
16. Strength and deformability of concrete and special reinforced concrete structures / Gosstroy of the USSR. Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete "NIIZHB". Moscow: Stroyizdat Publ., 1972, 191 p. (In Russian).
17. Hanging coverings: proceedings of the scientific sessions of the Institute, 1970 / Gosstroy of the USSR. Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete "NIIZHB". Moscow: Department of Scientific and Technical Information of NIIZHB, 1971, 240 p. (In Russian).
18. Hanging coverings of circular outline in the plan / edited by I.G. Ludkovsky. Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1962, 161 p. (In Russian).
19. Hanging coverings (research, design and implementation experience) / edited by I.G. Ludkovsky. Moscow: Department of Scientific and Technical Information of NIIZHB, 1973, 133 p. (In Russian).
20. Precast reinforced concrete base plates of aggregate equipment / edited by: I.G. Ludkovsky, M.I. Brailovsky. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974, 85 p. (In Russian).

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

**Александр Леонидович Калиниченко**, сотрудник редакционно-издательского отдела департамента научно-методической деятельности, АО «НИЦ «Строительство», член Союза писателей России, заслуженный работник культуры Российской Федерации, Москва  
e-mail: kalinichenkoal@cstroy.ru

**Alexander L. Kalinichenko**, Staff Member of the Editorial and Publishing Division of the Department of Scientific and Methodological Activities, JSC Research Center of Construction, Member of the Union of Writers of Russia, Honored Worker of Culture of the Russian Federation, Moscow  
e-mail: kalinichenkoal@cstroy.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.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС77-75188 от 22.02.2019 г., сетевого издания – Эл № ФС77-82129 от 18.10.2021 г.

Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN (International Standard Serial Number): печатное – 2224-9494, сетевое – 2782-3938.

«Вестник НИЦ «Строительство» (Print) включен в Перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Журнал индексируется в академических базах данных и информационных системах: ROAD, CrossRef, Академия Google. Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте [vestnik.cstroy.ru](http://vestnik.cstroy.ru)

Подписной индекс ООО «Урал Пресс», ООО «АРЗИ» – 36569.



*Приглашаем к сотрудничеству  
ученых, аспирантов,  
исследователей!*

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская ул., дом 6, корпус 1, кабинет 400/2

Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023

Выпускающий редактор – Починина Наталья

e-mail: [pochininane@cstroy.ru](mailto:pochininane@cstroy.ru)





# 3<sup>rd</sup> International Workshop on “Durability and Sustainability of Concrete Structures” (DSCS 2025) Naples (Italy), September 16th-18th, 2025

## Circular 3 Call for Abstracts

**Venue:** University of Naples Federico II, Conference Centre in Via Partenope

**Organized by:** American Concrete Institute Italy Chapter (ACI IC) and University of Naples Federico II (UniNa)

**ACI Sponsoring Committees:** ACI 130 - Sustainability of Concrete, ACI 201 – Durability of Concrete, ACI 243- Seawater Concrete

### Organizing Committee:

Luigi Coppola (ACI IC President, University of Bergamo)  
Marta Del Zoppo (University of Naples Federico II)  
Liberato Ferrara (ACI IC Vice President, Politecnico di Milano)  
Antonio Nanni (ACI Past President, University of Miami)  
Andrea Prota (University of Naples Federico II)  
Roberto Realfonzo (University of Salerno)

### Honor Committee:

Mario Collepardi (Italy)  
Edoardo Cosenza (Italy)  
Mario Alberto Chiorino (Italy)  
Gaetano Manfredi (Italy)

### Tentative International Scientific Committee:

Maria Antonietta Aiello (Italy)	Nele de Belie (Netherlands)	Lidia La Mendola (Italy)	Marisa Pecce (Italy)
Carmen Andrade Perdrix (Spain)	Frank Dehn (Germany)	Pietro Lura (Switzerland)	Giovanni Plizzari (Italy)
Nemkumar Banthia (Canada)	Marco di Prisco (Italy)	Giuseppe Mancini (Italy)	Paolo Riva (Italy)
Hans Beushausen (South Africa)	Guillermo J. Etse (Argentina)	Enzo Martinelli (Italy)	Luc Taerwe (Belgium)
Antonio Caggiano (Italy)	<b>Vyacheslav Falikman (Russia)</b>	Claudio Mazzotti (Italy)	Romildo D. Toledo Filho (Brazil)
Jan Cervenka (Czech Republic)	David Fernández-Ordóñez (Switzerland)	Viktor Mechtcherine (Germany)	Roberto Torrent (Argentina)
Chun-Tao Chen (Taiwan)	Paula Folino (Argentina)	Ole Mejlhede Jensen (Denmark)	Tamon Ueda (Japan)
Denny Coffetti (Italy)	Stephen Foster (Australia)	Harald S. Müller (Germany)	
Laura De Lorenzis (Switzerland)	Pietro Gambarova (Italy)	Annalisa Napoli (Italy)	
Antonello De Luca (Italy)	Ravindra Gettu (India)	Emidio Nigro (Italy)	

**Objectives and Themes:** This is the third edition of International Workshop on “Durability and Sustainability of Concrete Structures”, after the successful past editions of Moscow 2018 and Bologna 2015. The purpose of this international workshop is to present and discuss the most innovative developments and research on durability and sustainability of concrete construction. Among the topics to be addressed are: reduction in CO<sub>2</sub> emissions; use of binders alter-

native to Portland cement, superplasticizers for low-content clinker cements, recycled materials and innovative products; design of durable structures, maintenance, repair and refurbishment of concrete structures. The topics will be tackled from all perspectives, from material science to testing, from environmental impact evaluation to design under severe conditions and will include maintenance, monitoring, repair and reuse of concrete structures.

### Important dates:

- Call for abstracts: **January 31, 2025**
- Acceptance of abstracts: **February 15, 2025**
- Submission of full papers: **April 6, 2025**
- Notification of acceptance: **May 31, 2025**
- Submission of final papers: **June 30, 2025**

**Abstracts submission:** The 300-words abstracts can be submitted within January 31, 2025 at the following email address: [submissionDSCS25@aciitaly.com](mailto:submissionDSCS25@aciitaly.com)

**Website:** <https://www.aciitaly.com/events/dscs-2025/>

**Conference Secretary:** [organizingDSCS25@aciitaly.com](mailto:organizingDSCS25@aciitaly.com), Dr. Marta Del Zoppo

**ACI IC Secretary (registration queries only):** [aciitalychapter@gmail.com](mailto:aciitalychapter@gmail.com), Eng. Valentina Trinchese



**АО «НИЦ «Строительство»** — это более чем 95-летний опыт исследований и достижений в области строительной науки.

Мы – команда единомышленников, способных реализовать сложнейшие инженерные проекты.

## УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



**ниц строительство**  
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК  
ИИ В.А. КУЧЕРСКО



НИИЖБ  
ИИ А.Л. ГОРДЫШЕВА



НИИОСП  
ИИ НИ ТЕРСЕВАНОВА

📍 г. Москва,  
2-я Институтская ул., д. 6

☎ +7 (499) 174-73-80 | +7 (499) 174-73-84

🌐 [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



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»

## ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



Обучение в аспирантуре, докторантуре

Прикрепление для подготовки диссертации без освоения образовательных программ



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. 2 (627) 2025

Редактор выпуска Починина Н.Е.  
Компьютерная верстка Игнатьева Е.Н.  
Дата выхода в свет 30.04.2025 Формат 60x88 1/8

