

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.

1 (632)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

ГЕЙДАРОВ Р.С., НИКОНОВА Н.В., СОРОКИНА Г.В., УЗДИН А.М., ДОЛГАЯ А.А.
Оценка класса сейсмостойкости бетонных и каменных конструкций . . . 5

КОМАРОВА М.А., ВЕДЯКОВ И.И., ШАЛАБИН М.В., ВЛАСКИН И.А.
**Исследование процессов атмосферной деструкции огнезащитного
покрытия методами ИК-спектроскопии . . . 11**

КРАКОВСКИЙ М.Б., ТИХОНОВ И.Н.
О методах расчета железобетонных конструкций . . . 20

ЦЫБИН Н.Ю.
**Методика вычисления геометрических характеристик
произвольного расчетного контура продавливания . . . 29**

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

СУМАРКОВ Е.В., ОБРЯДИНА А.В., КУЗЕВАНОВ Д.В., ВОЛОХОВА Е.В.
**Автоматизация контроля геометрических параметров
железобетонных конструкций в среде информационного
моделирования . . . 42**

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ» 15–16 ОКТЯБРЯ 2025 г., КРАСНОДАР

БАТАЕВ Д.К.-С., ДЖАМБУЛАТОВ Р.С.
**Гранулометрический состав и удельная поверхность наполнителей
и добавок для ремонтных и реставрационных составов . . . 50**

ЗИНОВЬЕВ А.А., БУЛГАКОВ Б.И., ЛЯПИДЕВСКАЯ О.Б.
**Прогнозирование морозостойкости бетона с помощью
микроструктурного анализа на примере вибропрессованных
изделий . . . 62**

КУЗЬМИНОВ О.О., ВАТИН Н.И.
**Метод оценки способности цементных композитов
к самозалечиванию путем оценки изменения проницаемости . . . 71**

ИТОГИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АЖБ В 2025 ГОДУ . . . 83

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, к. 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, bld. 2, Ryazansky prospect,
Moscow, 109428, Russian Federation

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

Registered by the Federal Service for
Supervision of Communications and
Information Technologies and mass
communications (ROSKOMNADZOR).

Mass media registration certificate
PI No. FS77-76959 dated October 09, 2019.

Mass media registration certificate
EI No. FS77-86552 dated December 26, 2023.

ISSN 0005-9889 (Print)

ISSN 3034-1302 (Online)

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

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

1 (632)

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

HEYDAROV R.S., NIKONOVA N.V., SOROKINA G.V., UZDIN A.M., DOLGAYA A.A.
Assessing the seismic resistance class of concrete and masonry structures . . . 5

KOMAROVA M.A., VEDYAKOV I.I., SHALABIN M.V., VLASKIN I.A.
**Investigation of the processes of atmospheric destruction
of flame-retardant coating by IR spectrometry methods 11**

KRAKOVSKY M.B., TIKHONOV I.N.
On methods of calculation of reinforced concrete structures. 20

TSYBIN N.YU.
**Method for geometric characteristics of an arbitrary calculated punching
contour calculation. 29**

LIFECYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION PROJECTS

SUMAROKOV E.V., OBRYADINA A.V., KUZEVANOV D.V., VOLOKHOVA E.V.
**Automation of geometric parameters control for reinforced concrete
structures in building information modeling environment 42**

3TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE „MODERN CONCRETES AND TECHNOLOGIES: PROBLEMS, SOLUTIONS, PROSPECTS“ OCTOBER 15–16, 2025, KRASNODAR

BATAYEV D.K.–S., DZHAMBULATOV R.S.
**Granulometric disposition and specific surface area of fillers
and additives for repair and restoration compounds 50**

ZINOVIEV A.A., BULGAKOV B.I., LYAPIDEVSKAYA O.B.
**Prediction of concrete frost resistance using microstructural analysis
using the example of vibropressed products 62**

KUZMINOV O.O., VATIN N.I.
**Self-healing ability and waterproofing of cementitious materials with
crystalline additive: development and assessment of a permeability
monitoring method. 71**

RESULTS OF ASC ACTIVITIES IN 2025 83

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, ученый секретарь, АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

МАИЛАН Д.Р., д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Донской 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 – KIT (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 ВНИИ-железобетон» (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения;

2.1.5 – Строительные материалы и изделия.

Editorial team

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

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

SMIRNOVA L.N., Scientific Editor, Cand. Sci. (Engineering), 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 VNIzhelezbeton" LLC (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.1 – Building constructions, buildings and structures;

2.1.5 – Building materials and products.

УДК 69.04

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-5-10](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-5-10)

**Р.С. ГЕЙДАРОВ^{1,✉}, Н.В. НИКОНОВА¹, Г.В. СОРОКИНА¹, А.М. УЗДИН¹,
А.А. ДОЛГАЯ²**

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

² АО «Трансмост», Подъездной пер., д. 1, г. Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

ОЦЕНКА КЛАССА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ БЕТОННЫХ И КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Введение. Бетонные и каменные сооружения составляют основной объем эксплуатируемых сооружений старой постройки.

Цель. Предложить методику оценки сейсмостойкости сечений элементов бетонных и каменных сооружений. Работа продолжает исследования указанного направления, начатые в СССР в начале 80-х годов прошлого века.

Материалы и методы. Рассмотрена методика оценки предельных ускорений и расчетных классов сейсмостойкости для бетонных элементов строительных конструкций. Для бетонных элементов класс сейсмостойкости оценивается по положению равнодействующей в сечении (ограничение растяжения бетона) и по сжимающим напряжениям в бетоне. Минимальный класс сейсмостойкости оценивается в предположении упругой работы сечения. На первом этапе оцениваются три значения расчетных пиковых ускорений, обеспечивающих соответственно упругую работу сечения, предельное состояние с коэффициентом предельных состояний $K_1 = 0,5$ и предельное состояние с коэффициентом предельных состояний $K_1 = 0,25$.

Результаты. По полученным ускорениям оценивается интенсивность расчетного воздействия на основе действующей в России шкалы балльности.

Выводы. На основе выполненных исследований оценены интенсивность и повторяемость воздействий, вызывающих различные предельные состояния сечений бетонных и каменных конструкций, в частности возникновение растяжений сечений, появление тех или иных трещин, полная разгрузка сечения, появление выколов в сжатой зоне бетона и т. д. Полученные данные представляют интерес как для собственников объектов, так и для страховых фирм.

Ключевые слова: бетонные сооружения, каменные сооружения, элементы строительных конструкций,

сечения элементов, оценка сейсмостойкости, методика оценки, предельные ускорения

Для цитирования: Гейдаров Р.С., Никонова Н.В., Сорокина Г.В., Уздин А.М., Долгая А.А. Оценка класса сейсмостойкости бетонных и каменных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 5–10. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-5-10](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-5-10). EDN: ROGESE.

Вклад авторов

Гейдаров Р.С. – написание текста статьи, проведение расчетов для статьи, подготовка и обсуждение материалов.

Никонова Н.В. – вывод формулы для предельных сжимающих ускорений, участие в подготовке и обсуждении материалов.

Сорокина Г.В. – оценка расчетного балла по пиковым ускорениям.

Уздин А.М. – руководство работой, постановка задачи исследований, редактирование статьи, отладка программного обеспечения.

Долгая А.А. – разработка всех программных средств для проведения расчетов, анализ результатов расчетов, участие в подготовке и обсуждении материалов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.12.2025

Поступила после рецензирования 27.01.2026

Принята к публикации 29.01.2026

R.S. HEYDAROV^{1,✉}, N.V. NIKONOVA¹, G.V. SOROKINA¹, A.M. UZDIN¹,
A.A. DOLGAYA²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky pr., 9, St. Petersburg, 190031, Russian Federation

² Transmost JSC, Podyezdnoy Lane, 1, St. Petersburg, 190013, Russian Federation

ASSESSING THE SEISMIC RESISTANCE CLASS OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

Abstract

Introduction. Concrete and masonry structures constitute the majority of old buildings in use.

The aim of this research is to propose a methodology for assessing the seismic resistance of the cross-sections of elements of concrete and masonry structures. This research develops the previous research results in this area, which began in the USSR in the early 1980s.

Materials and methods. The methodology of assessing the maximum accelerations and design seismic resistance classes for concrete elements of building structures is considered. For concrete elements the seismic resistance class is assessed by the position of the resultant force in the section (limitation of concrete tension) and by compressive stresses in concrete. The minimum seismic resistance class is assessed under the assumption of elastic work of the section. At the first stage, three values of the calculated peak accelerations are assessed, ensuring the following: the elastic work of the section, the limit state with the limit state coefficient $K_1 = 0.5$ and the limit state with the limit state coefficient $K_1 = 0.25$ respectively.

Results. Basing on the resulting accelerations, one can assess the intensity of the design earthquakes using the Russian Standard scale of earthquake intensity.

Conclusions. Basing on the research results, the authors assessed the intensity and repetitiveness of earthquakes resulting in various limit states of concrete and masonry structure sections, including the occurrence of section tension, the appearance of various cracks, complete section unloading, the appearance of spalls in the compressed zone of concrete, etc. These data are of interest to both facility owners and insurance companies.

Keywords: concrete structures, masonry structures, building structure elements, element sections, seismic resistance assessment, assessment methods, maximum accelerations

For citation: Heydarov R.S., Nikonova N.V., Sorokina G.V., Uzdin A.M., Dolgaya A.A. Assessing the seismic resistance class of concrete and masonry structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 5–10. (In Russian).

DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-5-10](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-5-10).
EDN: ROGESE.

Authors contribution statement

Heydarov R.S. – writing the text of the article, making calculations for the article, materials preparing and discussing.

Nikonova N.V. – derivation of the formula for maximum compressive accelerations, participation in the preparation and discussion of materials.

Sorokina G.V. – estimation of the calculated score for peak accelerations.

Uzdin A.M. – work management, research objectives setting, article editing, software debugging.

Dolgaya A.A. – development of all software tools for calculations, analysis of calculation results, participation in the preparation and discussion of materials.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.12.2025

Revised 27.01.2026

Accepted 29.01.2026

В работах [1, 2] предложен современный подход к оценке сейсмостойкости эксплуатируемых сооружений. Для этого введены понятия минимального, умеренного и максимального расчетных классов сейсмостойкости – $K_s^{(min)}$, $K_s^{(mod)}$ и $K_s^{(max)}$. Под расчетным классом понимается сила землетрясения в дробных баллах, которую может воспринять сооружение соответственно без нарушения нормальной эксплуатации, при возникновении умеренных повреждений и при разрушении сооружения. Отметим, что понятие класса сейсмостойкости было введено в начале 80-х годов прошлого века для оценки расчетной сейсмостойкости мостов [1]. Позже в работах [2–4] было введено другое понятие класса сейсмостойкости, рассматриваемое как некоторая категория сейсмостойкости в целых баллах. Чтобы не путать эти понятия, будем называть дробный класс сейсмостойкости расчетным классом, а целочисленный показатель – макросейсмическим классом. Оба понятия имеют смысл и свою область применения. Более того, расчетный класс сейсмостойкости может быть одним из атрибутов макросейсмического класса.

Обратимся теперь к описанию расчетного класса сейсмостойкости. Для оценки $K_s^{(min)}$ предусматривается обычный силовой расчет. Для оценки $K_s^{(max)}$ предполагается кинематический расчет, допускающий предельные перемещения $u_{lim} = K_1 \times u_{el}$, где K_1 – коэффициент предельных состояний; u_{el} – предел упругости по смещениям. Для оценки умеренного класса в [5] предлагается использовать предельное смещение $u_{mod} = 0,5u_{lim}$. Далее приводятся расчетные формулы для оценки сейсмостойкости бетонных и каменных элементов сооружения.

Проверка прочности бетонных конструкций осуществляется по двум критериям: положению равнодействующей и ограничению продольной сжимающей силы.

Проверка положения равнодействующей силы должна ограничить растяжение в бетоне и образование в нем трещин. Для этого должно выполняться условие:

$$e\eta < \theta h' \tag{1}$$

где $e = \frac{M}{N}$ – эксцентриситет продольной силы;

M и N – момент и продольная сила в сечении;

η – коэффициент, учитывающий увеличение эксцентриситета за счет деформации проверяемого элемента конструкции;

θ – множитель, показывающий, за какую часть высоты сечения элемента h от его середины может выйти равнодействующая N .

Для оценки минимального класса сейсмостойкости $K_s^{(min)}$ сечение должно быть сжато, то есть равнодействующая N должна находиться в ядре сечения. Для прямоугольного сечения $\theta = 1/6$, а для круга $\theta = 1/4$ (рис. 1).

Для максимального расчетного класса сейсмостойкости нельзя допустить растяжения всего сечения, то есть $\theta = 1/2$.

Если теперь учесть, что $M = M_{st} + PGA \times M_0$ и $N = N_{st} + PGA \times N_0$, то из (1) получим:

$$PGA = -\frac{-M_{st} + N_{st} \frac{\theta h}{\eta}}{\pm M_0 \pm N_0 \frac{\theta h}{\eta}} \tag{2a}$$

здесь M_{st} и N_{st} – момент и нормальная сила в сечении от статических нагрузок;

M_0 и N_0 – момент и нормальная сила в сечении от тестового землетрясения с единичной амплитудой ускорений.

В формуле (2a) учтено, что сейсмический момент M_0 от тестового землетрясения с $PGA = 1 \text{ м/с}^2$ и аналогичная нормальная сила N_0 могут иметь любой знак. Анализ показывает, что наименьший класс имеет место при следующих знаках усилий M_0 и N_0 :

$$PGA = -\frac{-M_{st} + N_{st} \frac{\theta h}{\eta}}{-M_0 + N_0 \frac{\theta h}{\eta}} \tag{2б}$$

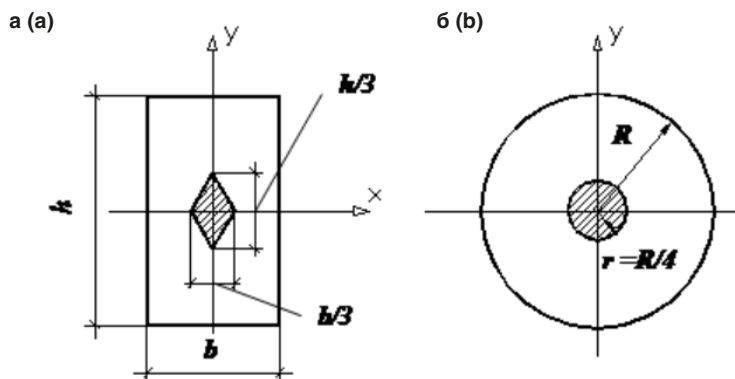


Рис. 1. Ядро сечения для прямоугольника (а) и круга (б)
Fig. 1. Section kernel for a rectangle (a) and a circle (b)

Величина η зависит от уровня нагрузки, определяемого значением PGA . Однако эта зависимость несущественна, в первом приближении можно вычислить η при $PGA = 4 \text{ м/с}^2$.

Проверка ограничения предельной сжимающей силы должна исключить выколы бетона сжатой зоны, она имеет вид:

$$N < m_1 R_b A(x), \tag{3}$$

где m_1 – коэффициент условий работы;

R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию;

$A(x)$ – площадь сжатой зоны бетона.

Для прямоугольного сечения высотой h и шириной b площадь сжатой зоны определяется по формуле:

$$A = (h - 2e\eta)b. \tag{4}$$

Подстановка (4) в (3), с учетом статической составляющей нагрузок, дает:

$$N_{st} + PGA \times N_0 < m_1 R_b \times b \times \left(h - 2\eta \times \frac{M_{st} + PGA \times M_0}{N_{st} + PGA \times N_0} \right).$$

Отсюда получаем квадратное уравнение для определения PGA :

$$PGA^2 + 2 \times PGA \times \left(\frac{N_{st}}{N_0} - \frac{m_1 \times R_b \times b \times h}{2 \times N_0} + \frac{m_1 \times \eta \times R_b \times b \times h \times N_{st}}{N_0^2} \right) - \left[\left(\frac{N_{st}}{N_0} \right)^2 - \frac{m_1 \times R_b \times b \times h \times \eta \times N_{st}}{N_0^2} + \frac{2 \times m_1 \times R_b \times b \times \eta \times M_{st}}{N_0^2} \right] = 0. \tag{5}$$

В результате получаем два значения PGA :

$$PGA = -P \pm \sqrt{P^2 - Q}, \tag{6}$$

где $P = \left(\frac{N_{st}}{N_0} \right) - \frac{m_1 \times R_b \times b \times h}{2 \times N_0} + \frac{m_1 \times \eta \times R_b \times b \times h \times N_{st}}{N_0^2}$;

$$Q = \left(\frac{N_{st}}{N_0} \right)^2 - \frac{m_1 \times R_b \times b \times h \times \eta \times N_{st}}{N_0^2} + \frac{2 \times m_1 \times R_b \times b \times \eta \times M_{st}}{N_0^2}.$$

Наименьший класс сейсмостойкости реализуется при использовании знака + в формуле (6).

Рассмотрим в качестве примера сечение бетонной мостовой опоры размером $a = 1 \text{ м}$, $b = 3 \text{ м}$ при статических усилиях $M_{st} = 10 \text{ кНм}$; $N_{st} = 120 \text{ кН}$; $M_0 = 5,1 \text{ кНм}$ и $N_0 = 0 \text{ кН}$.

Расчеты по формулам (2а,б) и (6) дают значения предельных ускорений, приведенные в табл. 1.

Необходимо отметить, что переход от пиковых ускорений к расчетному баллу должен учитывать зависимость PGA от преобладающего периода воздействия. Для периодов $T = 0,3-0,5 \text{ с}$ величина PGA принимается нами по шкале интенсивности сейсмических воздействий ШОС-2017 [6, 7]. Поправка на фактический период проводится в соответствии с рекомендациями [8]. Чем выше преобладающий период, тем меньше пиковые ускорения в рамках одного балла. В результате расчетный класс сейсмостойкости растет с ростом периода колебаний сооружения. На рис. 2 представлена зависимость расчетного класса от периода, построенная в соответствии с рекомендациями [5], применительно к значению по сжимающим напряжениям в бетоне.

Таблица 1

Предельные ускорения PGA для рассматриваемого сечения и расчетные классы сейсмостойкости для периода $T = 0,3 \text{ с}$

Table 1

PGA acceleration limits for the section under consideration and design seismic resistance classes for a period of $T = 0.3 \text{ s}$

	По растяжению	По сжатию
PGA_{\min} , м/с^2	0,141	0,534
PGA_{mod} , м/с^2	0,959	2,141
PGA_{\max} , м/с^2	8,589	8,567
$K_s^{(\min)}$	4,75	6,198
$K_s^{(\text{mod})}$	6,83	7,703
$K_s^{(\max)}$	9,211	9,208

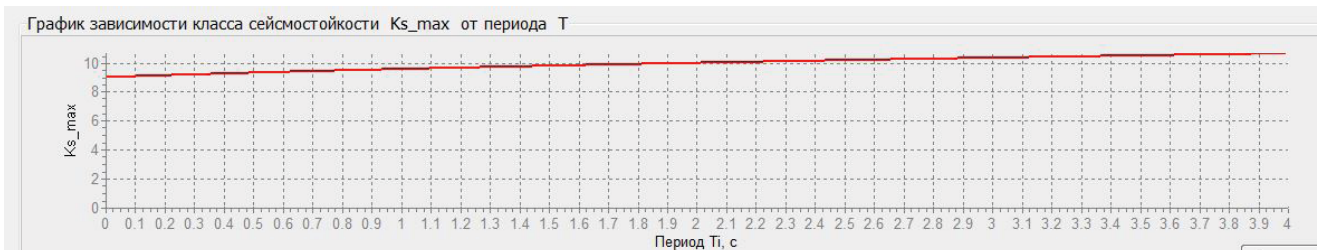


Рис. 2. Зависимость расчетного класса сейсмостойкости от периода основного тона колебаний сооружения
 Fig. 2. Dependence of the calculated seismic resistance class on the period of the fundamental vibration tone of the structure

Заключение

Выполненный анализ иллюстрирует задачу прогноза сценария повреждений сооружения от сейсмических воздействий. В рассмотренном случае в бетоне начнут появляться трещины при интенсивности воздействия $I > 4,75$ балла. Для района Сочи в зонах с ситуационной сейсмичностью $I_A = 8$, $I_B = 9$, $I_C = 10$ баллов землетрясения полученного класса имеют повторяемость $\tau = 10,2$ года. Превышение сжимающих напряжений в крайних волокнах возможно при $I > 6,198$ балла при $\tau = 54$ года. Серьезное развитие трещин возможно при $I > 6,83$ балла, $\tau = 112$ лет; выколы бетона сжатой зоны возможны при $I > 7,7$ балла и $\tau = 304$ года. Наконец полное разрушение сечения возможно при $I > 9,2$ балла и $\tau = 1710$ лет. Такая информация может быть полезна для пользователей и страховых фирм.

Список литературы

1. Инструкция по оценке сейсмостойкости эксплуатируемых мостов на сети железных и автомобильных дорог: (на территории Туркменской ССР): РСН-44-88: [Срок введ. в действие 01.04.88] / Госстрой ТССР. Ашхабад: Ылым, 1988.
2. Дорофеев В.М. Развитие макросейсмической шкалы интенсивности землетрясений // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2018. № 5 (36). С. 19–22. EDN: VWEAIY.
3. Дорофеев В.М. О классе сейсмостойкости // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2018. № 6 (37). С. 25–27. EDN: YZIHZJ.
4. Дорофеев В.М., Денисов А.С. Прогноз последствий сильных землетрясений // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2019. № 1 (38). С. 28–31. EDN: VWDAFQ.
5. Акбиев Р.Т., Сорокина Г.В., Уздин А.М., Федотова И.А., Гейдаров Р., Морозова Т.В. Оценка класса сейсмостойкости объекта по предельным пиковым ускорениям, вызывающим предельное состояние // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2025. № 1 (76). С. 33–37. EDN: TIVTBZ.
6. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. Москва: ООО «Наука и образование», 2012.
7. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Москва: Стандартинформ, 2017.
8. Жемчугов-Гитман Д.М., Сорокина Г.В., Уздин А.М. Аппроксимация зависимости пиковых ускорений от преобладающего периода на акселерограмме для расчетов сооружений по линейно-спектральной методике // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2023. № 4 (65). С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.55341/ptrbs.2023.65.4.008>. EDN: KXPXSB.

References

1. Instructions for assessing the seismic resistance of operated bridges on the railway and highway network: (on the territory of the Turkmen SSR): RSN-44-88: [Effective date 04/01/88] / Gosstroy of the TSSR. Ashgabat: Ylym, 1988. (In Russian).
2. Dorofeev V.M. The development of the macroseismic scale intensity of earthquakes. *Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2018, no. 5 (36), pp. 19–22. (In Russian). EDN: VWEAIY.
3. Dorofeev V.M. About the class of seismic resistance. *Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2018, no. 6 (37), pp. 25–27. (In Russian). EDN: YZIHZJ.
4. Dorofeev V.M., Denisov A.S. The forecast of consequences of strong earthquakes. *Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2019, no. 1 (38), pp. 28–31. (In Russian). EDN: VWDAFQ.
5. Akbiev R.T., Sorokina G.V., Uzdin A.M., Fedotova I.A., Heydarov R., Morozova T.V. Assessment of the earthquake resistance class of an object based on the maximum peak acceleration causing the limit state. *Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2025, no. 1 (76), pp. 33–37. (In Russian). EDN: TIVTBZ.
6. Aptikaev F.F. Instrumental Scale of Seismic Intensity. Moscow: Nauka i Obrazovanie LLC, 2012. (In Russian).
7. State Standard R 57546-2017. Earthquakes. Seismic intensity scale. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
8. Zhemchugov-Gitman D.M., Sorokina G.V., Uzdin A.M. Approximation of the dependence of peak accelerations on the prevailing period on the accelerogram for calculations of structures using the linear spectral method. *Natural and technogenic risks. Safety of structures*, 2023, no. 4 (65), pp. 24–28. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.55341/ptrbs.2023.65.4.008>. EDN: KXPXSB.

Информация об авторах / Information about the authors

Руслан Сардарович Гейдаров[✉], аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург
e-mail: r.heydarov99@yandex.ru

Ruslan S. Heydarov[✉], Graduate Student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
e-mail: r.heydarov99@yandex.ru

Наталья Вячеславовна Никонова, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

Natalia V. Nikonova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Галина Вячеславовна Сорокина, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

Galina V. Sorokina, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Александр Моисеевич Уздин, д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург
e-mail: uzdin@mail.ru

Alexander M. Uzdin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
e-mail: uzdin@mail.ru

Анжелика Александровна Долгая, канд. техн. наук, инженер, АО «Трансмост», Санкт-Петербург

Angelika A. Dolgaya, Cand. Sci. (Engineering), Engineer, Transmost JSC, St. Petersburg

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 614.841.45

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19)**М.А. КОМАРОВА¹, И.И. ВЕДЯКОВ¹, М.В. ШАЛАБИН^{1,✉}, И.А. ВЛАСКИН^{1,2}**

¹Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, д. 9, стр. 1, г. Москва, 125047, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДАМИ ИК–СПЕКТРОМЕТРИИ

Аннотация

Введение. Долговечность и сохранение огнезащитных свойств тонкослойных вспучивающихся покрытий в значительной степени определяются стойкостью их химического состава к атмосферным воздействиям, в первую очередь к влаге. Прямые натурные наблюдения за процессами деструкции требуют длительного времени, что делает актуальным применение инструментальных аналитических методов, таких как инфракрасная спектроскопия, для оперативной диагностики состояния и выявления механизмов деградации. В статье рассмотрены особенности применения ИК-Фурье спектроскопии для сравнительного анализа химического состояния огнезащитного покрытия после эксплуатации в различных климатических условиях.

Цель. Проведение сравнительной идентификации функциональных групп и оценка степени химической деструкции огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем после длительного (в течение 2 лет) воздействия атмосферной влаги при эксплуатации в открытой промышленной атмосфере холодного климата (открытый контур) по сравнению с условиями защищенной эксплуатации (закрытый контур).

Материалы и методы. В работе проведен анализ образцов огнезащитного покрытия, отобранных с объектов эксплуатации. Инфракрасные спектры поглощения снимали на Фурье-спектрометре в диапазоне 4000–400 см⁻¹ в форме таблеток с KBr в соответствии с ГОСТ Р 57941-2017. Качественная интерпретация спектров проведена на основе анализа характеристических полос поглощения функциональных групп полимерной матрицы, фосфорорганического антипирена и минерального наполнителя.

Результаты. Методом ИК-спектроскопии установлены значительные различия в химическом состоянии образцов. У образца из открытого контура зафиксировано практически полное исчезновение полос в области 1240–980 см⁻¹, характерных для валентных колебаний связей Р=О и Р–О–Р полифосфатного антипирена, что свидетельствует о его глубоком гидролитическом разрушении и вымывании. Одновременно наблюдается существенное усиление широкой полосы связанных ОН-групп (3600–3200 см⁻¹) и ослабление сигнатур эпоксидной матрицы. В образце из закрытого контура ключевые полосы антипирена и полимера сохраняются, однако наличие полосы ОН-группы указывает на начальные стадии гидролиза.

Выводы. Установлено, что доминирующим механизмом деградации огнезащитного покрытия является гидролитическое разрушение, интенсивность которого напрямую зависит от уровня влажностной нагрузки. Результаты подтверждают высокую чувствительность фосфорорганического антипирена и полимерной матрицы огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем к длительному воздействию влаги.

Ключевые слова: огнезащитное покрытие, атмосферная деструкция, инфракрасная спектроскопия, ИК-Фурье спектр, гидролиз, полифосфатный антипирен, эпоксидная матрица, водопоглощение, долговечность

Для цитирования: Комарова М.А., Ведяков И.И., Шалабин М.В., Власкин И.А. Исследование процессов атмосферной деструкции огнезащитного покрытия методами ИК-спектроскопии // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 11–19. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19). EDN: QDBCKX.

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ООО «ПСМК».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.12.2025

Поступила после рецензирования 09.02.2026

Принята к публикации 12.02.2026

M.A. KOMAROVA¹, I.I. VEDYAKOV¹, M.V. SHALABIN^{1,✉}, I.A. VLASKIN^{1,2}

¹ Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

² Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya Square, 9, bld. 1, Moscow, 125047, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF ATMOSPHERIC DESTRUCTION OF FLAME–RETARDANT COATING BY IR SPECTROMETRY METHODS

Abstract

Introduction. The durability and retention of fire-retardant properties of thin-film intumescent coatings are largely determined by the resistance of their chemical composition to atmospheric influences, primarily moisture. Direct in-situ observations of degradation processes require extensive time, making the use of instrumental analytical methods, such as infrared spectroscopy, essential for rapid diagnostics and identification of degradation mechanisms. This article discusses the application of Fourier-transform IR spectroscopy for comparative analysis of the chemical state of fire-retardant coatings after operation in various climatic conditions.

Aim. To conduct a comparative identification of functional groups and assess the degree of chemical degradation of an epoxy-acrylate-based fire-retardant coating after prolonged (2 years) exposure to atmospheric moisture during operation in an open industrial atmosphere in a cold climate (open circuit) compared to protected operating conditions (closed circuit).

Materials and methods. This study analyzed fire-retardant coating samples collected from operational sites. Infrared absorption spectra were recorded on a Fourier spectrometer in the range of 4000–400 cm⁻¹ using KBr pellets in accordance with State Standard R 57941-2017. Qualitative interpretation of the spectra was based on an analysis of the characteristic absorption bands of the functional groups of the polymer matrix, organophosphorus flame retardant, and mineral filler.

Results. IR spectroscopy revealed significant differences

in the chemical state of the samples. The open-loop sample showed the almost complete disappearance of bands in the range of 1240–980 cm⁻¹, characteristic of the stretching vibrations of the P=O and P–O–P bonds of the polyphosphate flame retardant, indicating its profound hydrolytic degradation and leaching. Concurrently, a significant strengthening of the broad band of bound OH groups (3600–3200 cm⁻¹) and a weakening of the epoxy matrix signatures were observed. In the closed-loop sample, the key bands of the flame retardant and polymer are preserved, but the presence of the OH band indicates the initial stages of hydrolysis.

Conclusions. It was established that the dominant degradation mechanism of the fire-retardant coating is hydrolytic degradation, the intensity of which directly depends on the level of moisture load. The results confirm the high sensitivity of the organophosphorus flame retardant and the polymer matrix of the epoxy-acrylate-based fire-retardant coating to long-term exposure to moisture.

Keywords: fire-retardant coating, atmospheric degradation, infrared spectroscopy, FTIR spectrum, hydrolysis, polyphosphate flame retardant, epoxy matrix, water absorption, durability

For citation: Komarova M.A., Vedyakov I.I., Shalabin M.V., Vlaskin I.A. Investigation of the processes of atmospheric destruction of flame-retardant coating by IR spectrometry methods. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 11–19. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19). EDN: QDBCKX.

Authors contribution statement

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

Funding

The study was carried out within the framework of contractual work between JSC Research Center of Construction and PSMK LLC.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.12.2025

Revised 09.02.2026

Accepted 12.02.2026

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Печатное и сетевое рецензируемое научно-техническое издание, в котором публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований по строительным материалам, конструкциям, сооружениям, основаниям и фундаментам при статических и динамических воздействиях.

«Вестник НИЦ «Строительство» (Print) включен в Перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Журнал индексируется в академических базах данных и информационных системах: ROAD, CrossRef, Академия Google. Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте vestnik.cstroy.ru

Подписной индекс ООО «Урал Пресс» – 36569.



**Приглашаем к сотрудничеству ученых,
аспирантов, исследователей!**

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

Введение

В настоящее время для обеспечения требуемых пределов огнестойкости металлических строительных конструкций широко применяются тонкослойные вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ТВОП). Их эффективность основана на способности под воздействием высокой температуры формировать многократно увеличивающийся в объеме пористый коксовый слой, обладающий высокими теплоизолирующими свойствами. Ключевым условием долговечности таких систем является сохранение исходного химического состава и структурной целостности покрытия на протяжении всего срока службы в условиях разнообразных эксплуатационных воздействий.

Наибольшее деструктивное влияние на органические композиции, к классу которых относятся многие современные ТВОП, оказывает атмосферная влага. Проникая в материал, вода может инициировать процессы гидролиза как полимерного связующего, так и функциональных огнезащитных добавок, в частности фосфорорганических соединений [1]. Это приводит к пластификации материала, снижению его адгезионной и когезионной прочностей, а главное – к необратимой потере огнезащитной эффективности вследствие деградации или вымывания активных компонентов. Поэтому объективная оценка состояния покрытия после определенного периода эксплуатации и прогнозирование его остаточного ресурса являются критически важными задачами для обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений.

Натурный мониторинг долговечности покрытий, связанный с длительными сроками наблюдений, зачастую затруднен. В этой связи актуальным является применение инструментальных физико-химических методов анализа, позволяющих проводить экспресс-диагностику и выявлять ранние признаки деструкции. Одним из наиболее информативных неразрушающих методов, пригодных для идентификации функциональных групп и качественной оценки химических превращений в материале, является инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИК-Фурье спектроскопия). Данный метод, регламентированный для полимерных композитов в ГОСТ Р 57941-2017 [2], предоставляет уникальную возможность получения «спектрального отпечатка» материала и отслеживания изменений в его молекулярной структуре.

В работах [3, 4] описаны проведенные исследования эффективности вспучивающихся тонкослойных огнезащитных покрытий в процессе ускоренных климатических испытаний. Однако применение ИК-спектроскопии для диагностики химической деструкции таких материалов после реальной (натурной) длительной эксплуатации в литературе освещено недостаточно.

Настоящая работа посвящена исследованию степени химической сохранности и механизмов атмосферной деструкции тонкослойного вспучивающегося огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связую-

щем после эксплуатации в течение 2 лет в условиях закрытого и открытого контуров на промышленном объекте г. Норильска.

Объектом исследования являются натурные образцы огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем, отобранные с эксплуатируемого объекта. Покрытие представляет собой модифицированную органико-минеральную композицию. Для анализа использовались два образца покрытия, снятые со стальных конструкций:

Образец № 1 отобран с закрытого контура (категория УХЛ3 по ГОСТ 15150-69 [5]), где воздействие атмосферной влаги было ограниченным.

Образец № 2 отобран с открытого контура (категория УХЛ1 по ГОСТ 15150-69 [5]), подвергался длительному прямому воздействию атмосферной влаги, температурным перепадам и другим атмосферным факторам.

Материалы и методы

Исследование выполнено методом ИК-Фурье спектроскопии с качественной интерпретацией полученных спектров.

Для получения инфракрасных спектров и последующего качественного анализа образцы покрытий высушивали при температуре (40 ± 5) °С до постоянной массы, после чего измельчали в агатовой ступке до состояния мелкодисперсного порошка. Порошкообразный образец (~1–2 мг) тщательно смешивали с бромидом калия (KBr, марка «спектроскопическая чистота», ~200 мг) и прессовали в таблетку диаметром 13 мм под давлением 10 т/см².

ИК-Фурье спектры поглощения регистрировали в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57941-2017 [2]. Спектры снимали на Фурье-спектрометре Perseus STA 449 F5 Jupiter, представленном на рис. 1. Измерения проводили в диапазоне волновых чисел 4000–400 см⁻¹. Число накоплений сканов – 32; оптическое разрешение – 4,0 см⁻¹. В качестве фона использовали спектр чистой таблетки KBr.

Качественную интерпретацию полученных спектров проводили на основе анализа положения, интенсивности и формы характеристических полос поглощения (пиков).

Идентификацию функциональных групп выполняли путем сопоставления экспериментальных данных с литературными спектрально-структурными корреляциями для полимерных материалов [6], фосфорорганических соединений [7] и минеральных наполнителей [8]. Особое внимание уделяли спектральным областям, отвечающим за ключевые компоненты покрытия:

– Область 3700–3200 см⁻¹: валентные колебания O–H и N–H связей (адсорбированная влага, гидроксильные и аминные группы).

– Область 1800–1500 см⁻¹: валентные колебания C=O карбонильных групп и деформационные колебания N–H.

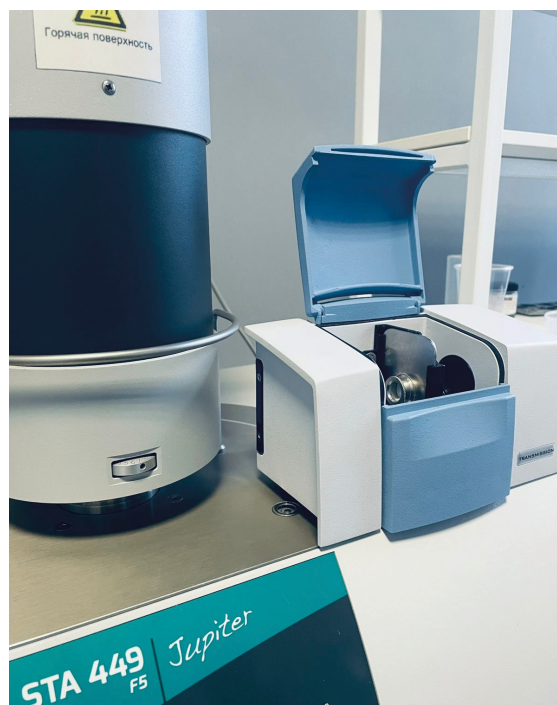


Рис. 1. Фурье-спектрометр Perseus STA 449 F5 Jupiter
Fig. 1. Perseus STA 449 F5 Jupiter Fourier spectrometer

– Область 1300–900 см⁻¹: валентные колебания связей С–О–С, Р=О, Р–О–Р, Р–О–С, характерные для эпоксидной матрицы и полифосфатного антипирена.

– Область ниже 900 см⁻¹: деформационные колебания органического скелета и валентные колебания Si–O–Si, Al–O минерального наполнителя.

Сравнительный анализ спектров образцов № 1 и 2 был нацелен на выявление различий в интенсивности и форме указанных полос, что является прямым свидетельством химических превращений, произошедших в материале в процессе эксплуатации.

Результаты

На основе полученных ИК-спектров (рис. 2 и 3) проведена их расшифровка и сравнительный анализ для установления химического состава огнезащитного покрытия и выявления характера деструктивных изменений в образцах после различной эксплуатации.

В табл. 1 представлена детальная интерпретация основных полос поглощения, наблюдаемых в ИК-спектрах исследуемых образцов, которая служит основой для качественной оценки состава материала.

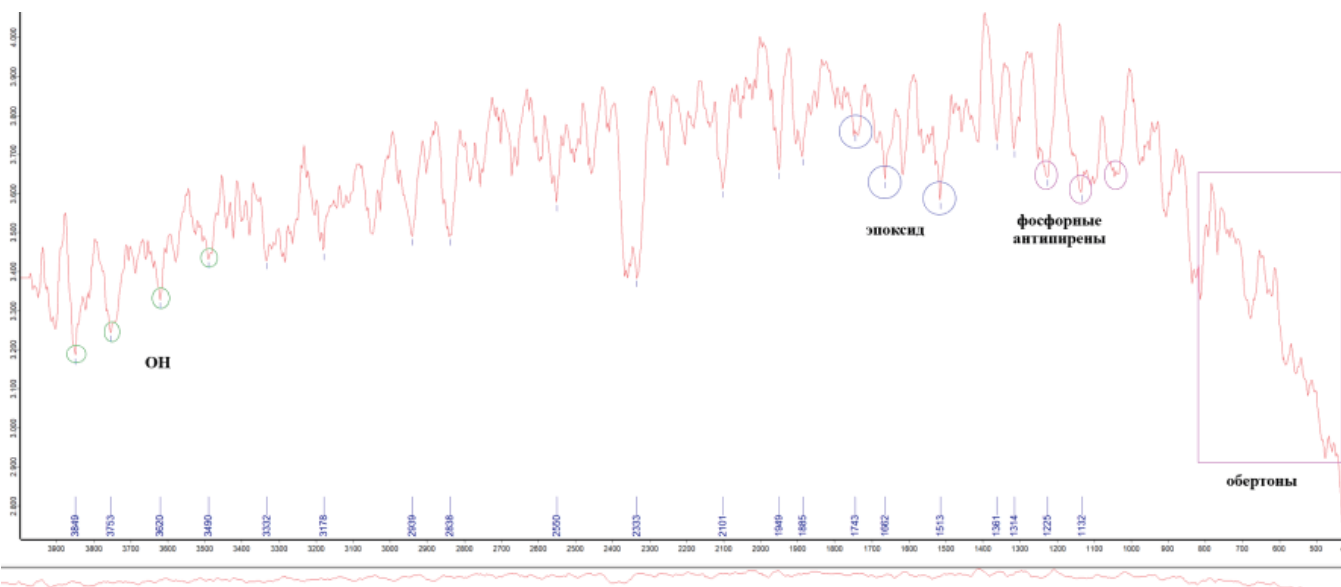


Рис. 2. ИК-спектр покрытия образца № 1
Fig. 2. IR spectrum of the sample No. 1 coating

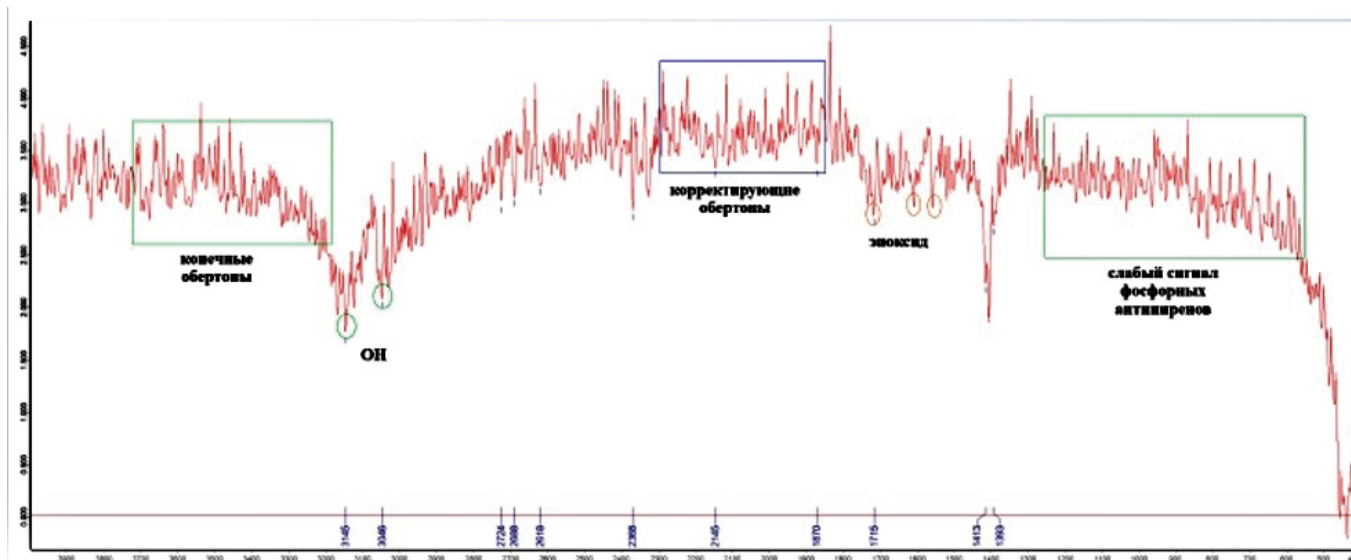


Рис. 3. ИК-спектр покрытия образца № 2
 Fig. 3. IR spectrum of the sample No. 2 coating

Таблица 1

Интерпретация характеристических полос ИК-спектров покрытий

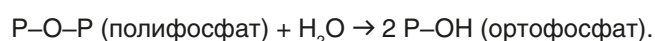
Table 1

Interpretation of characteristic bands of the IR spectrum of the coatings

ν , cm^{-1}	Интерпретация (функциональная группа, тип колебания)	Краткое обоснование
3849–3753	Свободные О–Н / Н-связанные ОН (высоочастотные кромки)	Слабые острые пики, характерные для свободных или слабосвязанных ОН-групп на поверхности минеральных частиц [8]
3620–3490	Связанная вода / гидроксильные группы (О–Н, Н-связи)	Широкая полоса, типичная для адсорбированной влаги и поверхностных гидроксидов Si–ОН, Al–ОН минерального наполнителя [8]
3330–3200	N–H (аминные) и/или О–Н (сильные водородные связи)	Область валентных колебаний аминных групп отвердителя и сильно связанной воды в порах материала
3000–2850	C–H (алкановые, CH ₂ , CH ₃)	Валентные колебания метиленовых и метильных групп, подтверждающие наличие органической полимерной матрицы (эпоксидной/акрилатной)
1740–1700	C=O (карбонильные группы эфиров, кетонов)	Интенсивный пик, характерный для сложноэфирных фрагментов эпоксидно-акрилатного связующего
1612–1600	C=C (ароматические) / N–H (деформационные)	Указывает на наличие ароматических структур или деформационных колебаний амидных/аминных групп
1516–1490	N–H (деформационные), аминные группы, ароматика	Подтверждает наличие аминов отвердителя и ароматических модификаторов в составе
1260–1188	C–O (эфирные) / P=O, P–O (фосфатные)	Интенсивная область, объединяющая валентные колебания эфирных связей C–O–C полимерной матрицы и фосфор-кислородных связей P=O и P–O антипирена [7]
1122–1050	C–O, C–N, P–O–C (эпоксидные циклы, эфиры, фосфаты)	Комплексная полоса, характерная для эпоксидных циклов, простых эфиров и фосфор-эфирных связей (P–O–C) [6, 7]
963–956	Эпоксидные «отпечатки» (C–O–C)	Специфический пик, ассоциируемый с эпоксидными циклами; его ослабление – признак разрушения матрицы
520–470	Si–O–Si / M–O (минеральные оксиды)	Валентные колебания в силоксановой сетке (Si–O–Si) и других оксидов металлов, «отпечаток» минеральной фазы наполнителя [8]

Сравнительный анализ ИК-спектров образцов из открытого и закрытого контуров выявил значительные различия, обусловленные различной влажностной нагрузкой.

В спектре образца № 1 (закрытый контур) отчетливо наблюдаются выраженные полосы в областях $1240\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ ($\text{P}=\text{O}$), $1120\text{--}1080\text{ см}^{-1}$ ($\text{P}-\text{O}-\text{P}$) и $1020\text{--}980\text{ см}^{-1}$ (мостиковые $\text{P}-\text{O}-\text{P}$). Это свидетельствует о частичной сохранности полифосфатной сетки, ответственной за огнезащитный эффект. В спектре образца № 2 (открытый контур) данные полосы резко ослаблены или практически отсутствуют, что является прямым доказательством глубокого гидролитического разрушения антипирена. Процесс протекает по реакции:



В дальнейшем происходит вымывание образовавшихся ортофосфатов атмосферной влагой [1, 7].

Интенсивность широкой полосы в области $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, отвечающей за валентные колебания ассоциированных $\text{O}-\text{H}$ групп, в образце № 2 существенно выше, чем в образце № 1. Это подтверждает значительно более высокую степень водопоглощения и насыщения покрытия влагой при эксплуатации в открытом контуре. Образование дополнительных гидрофильных центров $\text{P}-\text{OH}$ в результате гидролиза антипирена еще более усиливает этот эффект.

В обоих образцах присутствуют полосы валентных колебаний $\text{C}-\text{H}$ ($\approx 2920, 2850\text{ см}^{-1}$), что указывает на сохранность органического скелета. Однако в образце № 2 наблюдается заметное ослабление полос в областях $1260\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) и $963\text{--}956\text{ см}^{-1}$ (эпоксидные циклы) по сравнению с образцом № 1. Это свидетельствует о прогрессирующем гидролитическом расщеплении эпоксидной матрицы и эфирных связей под прямым воздействием атмосферной влаги [6].

Ключевыми факторами, обуславливающими повышенную гигроскопичность огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем, определяющую последующую деструкцию в условиях эксплуатации, являются:

– Наличие гидрофильных центров ($-\text{OH}$, $-\text{NH}$) является первичной причиной активного взаимодействия материала с атмосферной влагой. Так, полученные спектры демонстрируют выраженные полосы поглощения в областях, характерных для полярных групп, что предопределяет высокую сорбционную активность материала по отношению к воде. Широкая полоса в области $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям $\text{O}-\text{H}$ связей, связанных водородными связями. Это указывает на значительное количество адсорбированной влаги и поверхностных гидроксильных групп ($\text{Si}-\text{OH}$, $\text{Al}-\text{OH}$) минерального наполнителя [8]. Полосы в области $3400\text{--}3300\text{ см}^{-1}$ и $1510\text{--}1480\text{ см}^{-1}$ соответствуют валентным

и деформационным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ связей аминных групп отвердителя:

– Наличие пористой микроструктуры и минерального наполнителя. Интенсивное поглощение в области OH -групп ($3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$) и наличие низкочастотных полос $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ / $\text{Al}-\text{O}$ ($650\text{--}520\text{ см}^{-1}$) свидетельствуют о развитой удельной поверхности минеральной фазы. Пористая структура наполнителя создает разветвленную капиллярную систему, способствующую не только адсорбции, но и капиллярной конденсации паров воды, что многократно увеличивает общее водопоглощение и обеспечивает транспорт влаги вглубь покрытия.

– Гидролиз как основной деструктивный процесс, что подтверждается ослаблением полос $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ и $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ в образце закрытого контура.

Проникновение воды инициирует два параллельных и взаимосвязанных процесса гидролиза:

1. Гидролиз антипиреновой составляющей: наиболее уязвимыми являются мостиковые связи $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ в полифосфатной сетке. Их расщепление приводит к деполимеризации антипирена и его вымыванию, что напрямую ведет к потере огнезащитной функции [7].

2. Гидролиз полимерной матрицы: молекулы воды атакуют полярные связи $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ эпоксидной матрицы и $\text{C}-\text{N}$ аминных швов, что приводит к снижению молекулярной массы, пластификации и потере когезионной прочности связующего [6].

Результаты однозначно демонстрируют, что доминирующим механизмом деградации покрытий является гидролиз, а степень химического разрушения покрытия имеет прямую корреляцию с уровнем и продолжительностью влажностного воздействия в процессе эксплуатации. Деградация огнезащитного покрытия происходит последовательно, в несколько этапов:

Этап 1 – инициирующая сорбция атмосферной влаги. Благодаря наличию гидрофильных групп ($-\text{OH}$ наполнителя, $-\text{NH}$ аминов) и пористой микроструктуре материал активно сорбирует воду из атмосферы.

Этап 2 – гидролиз ключевых связей. Адсорбированная вода выступает как реагент, вызывая гидролитическое расщепление наиболее уязвимых химических связей: сначала мостиковых $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ в антипирене, затем $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ в эпоксидной матрице и $\text{C}-\text{N}$ в аминных швах.

Этап 3 – потеря функциональности и когезии. Деструкция антипирена приводит к потере огнезащитных свойств. Гидролиз полимерной сетки вызывает снижение молекулярной массы, пластификацию и потерю когезионной прочности.

Этап 4 – ускорение деструкции. Образующиеся гидрофильные продукты гидролиза (например, $\text{P}-\text{OH}$) усиливают водопоглощение, создавая положительную обратную связь и ускоряя дальнейшее разрушение. Циклы «увлажнение – сушка» создают дополнительные механические напряжения.

Заключение

Проведенный сравнительный ИК-спектральный анализ позволил установить механизмы и степень деструкции огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем при эксплуатации в условиях с различной влажностной нагрузкой.

Установлено, что для образца из закрытого контура (УХЛЗ) характерна частичная сохранность ключевых функциональных групп. В спектре наблюдаются полосы полифосфатного антипирена (1240–980 см⁻¹) и эпоксидной матрицы, однако наличие интенсивной полосы O–H (3600–3200 см⁻¹) свидетельствует о водопоглощении и начальных стадиях гидролиза.

Для образца из открытого контура выявлены признаки глубокой деградации: практически полное исчезновение полос антипирена, значительное усиление полосы O–H и ослабление сигнатур эпоксидной матрицы. Это указывает на интенсивное гидролитическое разрушение и вымывание активных компонентов.

На основе спектральных данных установлен доминирующий механизм гидролитической деструкции, последовательно включающий сорбцию влаги гидрофильными группами, расщепление связей P–O–P, C–O–C, C–N и последующую потерю функциональных свойств. Результаты подтверждают, что длительное прямое воздействие атмосферной влаги является критическим фактором, приводящим к необратимой потере огнезащитной эффективности покрытия. Метод ИК-Фурье спектроскопии показал высокую эффективность для диагностики подобных процессов деградации.

Список литературы

1. Докучаева Л.В., Старостенков А.С., Мельников Н.О. Исследование процессов ускоренного старения огнезащитных покрытий // *Успехи в химии и химической технологии*. 2012. № 2 (131). С. 99–104. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protseessov-uskorenogo-stareniya-ognezashchitnyh-pokrytiy?ysclid=ml7xmf06tz266373686>.
2. ГОСТ Р 57941-2017. Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ. Москва: Стандартинформ, 2017.
3. Комарова М.А., Гришин И.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Ведяков М.И. Оценка эффективности огнезащитных покрытий в процессе ускоренного климатического старения // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024. № 3 (42). С. 28–46. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46). EDN: TLKAPC.
4. Комарова М.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Скоробогатов В.А., Головина Е.В. Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении // *Техносферная безопасность*. 2024. № 4 (45). С. 3–22. EDN: NBZDZG.

5. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Москва: Стандартинформ, 2010.
6. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналитического применение: пер. с англ. Москва: Мир, 1982. 327 с.
7. Коровин Я.С., Жаров В.Т. Инфракрасные спектры и структура фосфорорганических соединений. Москва: Наука, 1985. 240 с.
8. Исаакян А.Р., Бегларян А.А., Пирумян П.А. и др. ИК-спектроскопическое исследование аморфных диоксидов кремния // *Журнал физической химии*. 2011. № 1 (85). С. 78–81. EDN NDJHKN.

References

1. Dokuchaeva L.V., Starostenkov A.S., Mel'nikov N.O. Research on accelerated aging of fire-resistant coatings. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii = Advances in chemistry and chemical technology*, 2012. no. 2 (131), pp. 99–104. (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protseessov-uskorenogo-stareniya-ognezashchitnyh-pokrytiy?ysclid=ml7xmf06tz266373686>.
2. State Standard R 57941-2017. Polymer composites. Infrared spectroscopy. Qualitative analysis. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
3. Komarova M.A., Grishin I.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Vedyakov M.I. Efficiency assessment of flame retardant coatings in the process of accelerated climatic aging. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2024, no. 3 (42), pp. 28–46. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46). EDN: TLKAPC.
4. Komarova M.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Skorobogatov V.A., Golovina E.V. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal building structures with accelerated climatic aging. *Tehnosfernaya bezopasnost' = Technosphere safety*, 2024, no. 4 (45), pp. 3–22. (In Russian). EDN: NBZDZG.
5. State Standard 15150-69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).
6. Smith A. Applied IR spectroscopy: Fundamentals, technique, analytical application: translated from English. Moscow: Mir Publ., 1982, 327 p. (In Russian).
7. Korovin Ya.S., Zharov V.T. Infrared spectra and structure of organophosphorus compounds. Moscow: Science Publ., 1985, 240 p. (In Russian).
8. Isaakyan A.R., Beglaryan A.A., Pirumyan P.A. et al.

IR Spectroscopic Study of Amorphous Silicon Dioxide. *Zhurnal fizicheskoy khimii = Russian Journal of Physical Chemistry*, 2011. no. 1 (85). pp. 78–81. (In Russian). EDN NDJHKH.

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

Мария Александровна Комарова, канд. хим. наук, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Maria A. Komarova, Cand. Sci. (Chem.), Bureau Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Иван Иванович Ведяков, д-р техн. наук, профессор, директор, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan I. Vedyakov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Михаил Валерьевич Шалабин[✉], аспирант, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Mikhail V. Shalabin[✉], Graduate Student, Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Игорь Андреевич Власкин, инженер научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; студент 1-го курса магистратуры кафедры техносферной безопасности, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Igor A. Vlaskin, Engineer, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; 1st year student of the Master's degree in Technosphere Security Department, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 6904; 091

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-20-28](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-20-28)**М.Б. КРАКОВСКИЙ¹, И.Н. ТИХОНОВ^{2,✉}**¹ ООО НПКТБ «ОПТИМИЗАЦИЯ», ул. Дмитрия Ульянова, д. 24, кв. 331, г. Москва, 117036, Российская Федерация² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Введение. Статья носит дискуссионный характер. Авторы представляют результаты своих исследований, предлагая их для обсуждения и оценки широкому кругу инженерной общественности: составителям норм, разработчикам и пользователям компьютерных программ, сотрудникам проектных, экспертных и научно-исследовательских организаций, преподавателям и студентам вузов.

Цель. Сравнить результаты, получаемые при расчетах нормальных сечений железобетонных конструкций по двум методам: нелинейной деформационной модели (НДМ) и методу предельных усилий (МПУ). Проанализировать реализацию НДМ в различных ЭВМ-программах для расчетов железобетонных конструкций: OM СНиП Железобетон, Ing+, Арбат, ЛИРА-САПР, Лира 10, STARK ES.

Материалы и методы. При сравнении результатов, получаемых по НДМ и МПУ, исследованы изгибаемые и внецентренно сжатые элементы. При внецентренном сжатии рассмотрен случай двузначной эпюры деформаций при расчетах по НДМ. Расчеты выполняли по программе OM СНиП Железобетон. При анализе реализации НДМ в различных ЭВМ-программах сравнивали алгоритмы, предусмотренные в СП 63.13330.2018 и использованные разработчиками программ, а также анализировали результаты, получаемые по программам.

Результаты. Выявлены случаи существенного расхождения результатов, получаемых по НДМ и МПУ. Оказалось, что НДМ требует значительного неоправданного перерасхода устанавливаемой для обеспечения прочности арматуры по сравнению с МПУ. Указаны причины расхождений. Ежегодный экономический ущерб только от перерасхода арматуры, возникающего при неправильных расчетах, составляет свыше 100 млрд руб. Также возможны аварии. Сформулированы вопросы для обсуждения с целью исправления ситуации.

Выводы. Общее состояние расчетов железобетонных конструкций следует признать требующим корректировки. Обсуждение поставленных вопросов должно помочь решению этой задачи. Считать целесообразным разработку документа с набором эталонных примеров, позволяющих получать по разным программам одинаковые результаты при одинаковых исходных данных.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, нормальные сечения, расчет, прочность, нелинейная деформационная модель, метод предельных усилий, сопоставление результатов, ЭВМ-программы, OM СНиП Железобетон, Ing+, Арбат, ЛИРА-САПР, Лира 10, STARK ES

Для цитирования: Краковский М.Б., Тихонов И.Н. О методах расчета железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 20–28. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-20-28](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-20-28). EDN: XFXAUR.

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 02.12.2025

Поступила после рецензирования 28.01.2026

Принята к публикации 05.02.2026

M.B. KRAKOVSKY¹, I.N. TIKHONOV^{2,✉}

¹ LLC NPKTB OPTIMIZATSIYA, Dmitry Ulyanov str., 24, apt. 331, Moscow, 117036, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

ON METHODS OF CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract

Introduction. The article is debatable in nature. The authors present the results of their research, offering them for discussion and evaluation to a wide range of the engineering community: drafters of standards, developers and users of computer programs, employees of design, expert and research organizations, teachers and university students.

Aim. To compare the results obtained when calculating the normal cross-sections of reinforced concrete structures using two methods: the nonlinear deformation model (NDM) and the ultimate efforts method (UEM). To analyze the implementation of NDM in various computer programs for calculations of reinforced concrete structures: OM SNIIP Reinforced Concrete, Ing+, Arbat, LIRA-CAD, Lira 10, STARK ES.

Materials and methods. When comparing the results obtained by NDM and UEM, bendable and non-centrally compressed elements were studied. In the case of off-center compression, the case of a positive and negative values deformation diagram in NDM calculations is considered. Calculations were performed according to the OM SNIIP Reinforced Concrete program. When analyzing the implementation of NDM in various computer programs, the algorithms provided for in SP 63.13330.2018 and used by program developers were compared, and the results obtained from the programs were analyzed.

Results. Cases of significant discrepancies between the results obtained by NDM and UEM have been identified. It turned out that NDM requires significant unjustified overspending of the reinforcement installed to ensure the strength compared to UEM. The reasons for the discrepancies are indicated. The annual economic damage caused by overspending of fittings, which occurs due to incorrect calculations, is over 100 billion rubles. Accidents are also possible. Questions have been formulated for discussion in order to remedy the situation.

Conclusions. The general state of calculations of reinforced concrete structures should be recognized as requiring adjustments. Discussion of the issues raised should help solve this problem. It is advisable to develop a document with a set of reference examples that allows to obtaining the same results for different programs with the same source data.

Keywords: reinforced concrete structures, normal cross-sections, calculation, strength, nonlinear deformation model, method of limiting forces, comparison of results, computer programs, OM SNIIP Reinforced Concrete, Ing+, Arbat, LIRA-CAD, Lira 10, STARK ES

For citation: Krakovsky M.B., Tikhonov I.N. On methods of calculation of reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 20–28. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-20-28](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-20-28). EDN: XFXAUR.

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 02.12.2025

Revised 28.01.2026

Accepted 05.02.2026

Расчет железобетонных конструкций является важным этапом их проектирования. Правильность расчетов во многом определяет надежность и экономичность возводимых зданий и сооружений. Основные положения расчетов регламентирует СП 63.13330.2018 [1]. В этом документе предусмотрены два подхода к оценке прочности нормальных сечений: нелинейная деформационная модель (НДМ) как основной метод и метод предельных усилий (МПУ), допустимый при выполнении следующих условий:

- сечение имеет простейшую форму: прямоугольную, тавровую или двутавровую;
- внешняя сила действует в плоскости оси симметрии;
- арматура расположена у перпендикулярных к этой плоскости граней.

В статье обсуждаются особенности приведенных подходов. Рассмотрены два вопроса:

- особенности расчетов по НДМ и МПУ;
- реализация в компьютерных программах положений СП [1] расчета по НДМ.

Изложение носит дискуссионный характер. Авторы представляют результаты своих исследований, предлагая их для обсуждения и оценки широкому кругу инженерной общественности: составителям норм, разработчикам и пользователям компьютерных программ, сотрудникам проектных, экспертных и научно-исследовательских организаций, преподавателям и студентам вузов.

Особенности расчетов по НДМ и МПУ

Сравнение результатов, получаемых по МПУ и НДМ для отдельных сечений, приведено в [2]. Ниже представлены результаты дальнейших исследований. Чтобы выявить особенности напряженно-деформированного состояния сечений при расчетах по обоим методам, определим напряжения в арматуре в зависимости от относительной высоты сжатой зоны бетона в каждом случае. Исследуем изгибаемые и внецентренно сжатые элементы. При внецентренном

сжатии рассматриваем случай двузначной эпюры деформаций при расчетах по НДМ.

В [3] отмечено, что использование высоты сжатой зоны в качестве исходного параметра для определения напряжения в арматуре имеет ряд преимуществ, поскольку высота сжатой зоны качественно отражает особенности напряженного состояния сечения – она учитывает совокупность влияния многих параметров (вида и количества арматуры, прочности и деформативности бетона, эксцентриситета и т. п.). Поэтому зависимость « $\sigma_s - \xi$ » принимает универсальный характер, будучи пригодной как для внецентренно сжатых, так и для изгибаемых элементов.

Методика расчета по НДМ

Напряжения в арматуре при расчетах по НДМ определяем следующим образом. На рис. 1 изображена схема распределения деформаций по сечению в соответствии с гипотезой плоских сечений.

Из рис. 1 видно, что при заданных значениях ϵ_b и ξ напряжения в арматуре σ_s можно определить по формуле:

$$-R_{sc} \leq \sigma_s = E_s \times \epsilon_b (1 - \xi) / \xi \leq R_s,$$

где R_s, R_{sc} – расчетные сопротивления арматуры соответственно при растяжении и сжатии;

E_s – модуль упругости арматуры.

Методика расчета по МПУ

При расчетах по МПУ используем общий метод расчета (при любых сечениях, внешних усилиях и любом армировании) [4]. Это наиболее универсальный и точный подход, по сравнению с чаще всего используемым упрощенным расчетом прямоугольных, тавровых и двутавровых сечений, при сформулированных выше ограничениях. Ранее при ручном счете применение общего метода было затруднено, поэтому использовали упрощенный подход для простейших случаев [1].

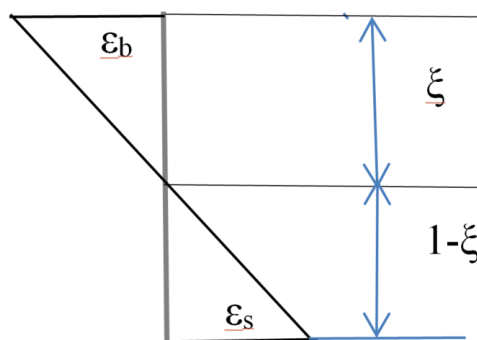


Рис. 1. Распределение деформаций в сечении при расчете по НДМ: ϵ_b – максимальные сжимающие деформации в бетоне (по модулю); ϵ_s – максимальные растягивающие деформации в арматуре; ξ – относительная высота сжатой зоны бетона

Fig. 1. Distribution of deformations in the section when calculated according to NDM: ϵ_b – maximum compressive deformations in concrete (modulo); ϵ_s – maximum tensile deformations in reinforcement; ξ – relative height of the compressed zone of concrete

В настоящее время реализация алгоритмов общего случая на ЭВМ [5] позволяет в полной мере использовать все ее преимущества. Напряжения в арматуре определяют по формуле [4]:

$$(\sigma_{si} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} (\frac{\omega}{\xi_i} - 1) + \sigma_{spi} \tag{1}$$

где $\omega = \alpha - 0,008R_b$ ([4, формула (26)]);
 $\sigma_{spi} = 0$ (рассматриваем ненапряженные конструкции).

Результаты расчетов

Рассчитываем сечение элемента из тяжелого бетона класса В25, $\gamma_{b2} = 0,9$; $R_b = 13,05$ МПа. При расчетах по НДМ принимаем $\epsilon_b = \epsilon_{b2} = 0,0048$ ([1, табл. 6.10], относительная влажность воздуха окружающей среды 40–75 %). При расчетах по МПУ $\sigma_{sc,u} = 500$ МПа [4, п. 3.12], $\alpha = 0,85$; $\omega = 0,75$.

Формулы для определения σ_s при расчетах по НДМ и МПУ приобретают соответственно вид:

$$-435 \leq \sigma_s = 960 (1 - \xi) / \xi \leq 435;$$

$$-435 \leq \sigma_s = 1571 (0,75 / \xi - 1) \leq 435.$$

В табл. 1 для каждого заданного значения относительной высоты сжатой зоны ξ определено соответствующее напряжение в арматуре при расчетах по НДМ и МПУ. При этом нужно учитывать следующее:

- формы эпюр напряжений в бетоне сжатой зоны различны в НДМ (треугольная) и МПУ (прямоугольная);
- при одинаковой высоте сжатой зоны суммарные усилия в сжатом бетоне при расчетах по НДМ меньше, чем по МПУ;
- сравнение напряжений в табл. 1 проводится в методических целях для анализа различий результатов расчетов по МПУ и НДМ.

На рис. 2 из [3] приведены подтвержденные экспериментально зависимости « $\sigma_s - \xi$ ». Они носят универсальный характер и относятся к любым видам одноосного напряженного состояния сечений.

Таблица 1

Напряжение в арматуре σ_s , МПа, при различных высотах сжатой зоны ξ при расчетах по НДМ и МПУ

Table 1

Reinforcement stresses σ_s , МПа, at different heights of the compressed zone ξ when calculated according to NDM and UEM

ξ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
σ_s , НДМ	435	435	435	435	435	435	411	240	107
σ_s , МПУ	435	435	435	435	435	393	112	-98	-261

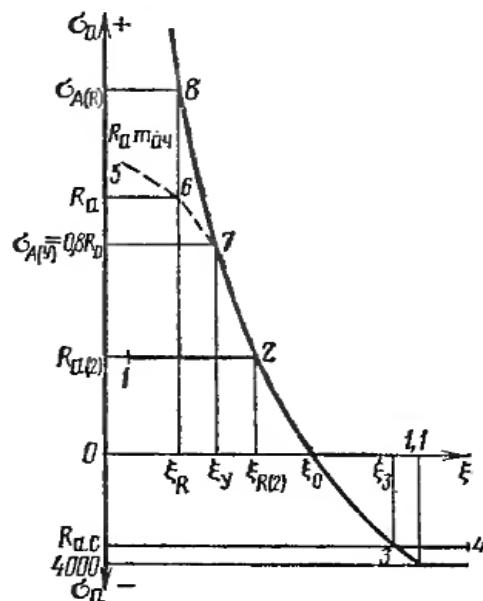


Рис. 2. Зависимость напряжения в арматуре от высоты сжатой зоны при $\sigma_0 = 0$. Характеристики с индексом (2) относятся к арматуре с физическим пределом текучести [3, рис. 7]

Fig. 2. The dependence of the stress in the reinforcement on the compressed zone height at $\sigma_0 = 0$. The characteristics with index (2) refer to reinforcement with a physical yield strength [3, Fig. 7]

Обратим внимание на характеристику сжатой зоны бетона ξ_0 , при которой нейтральная ось проходит по арматуре. При внецентренном сжатии в случае $\xi > \xi_0$ **арматура оказывается сжатой**, распределение напряжений соответствует линии 1 - 2 - 3 - 4. В расчетах по НДМ из-за треугольной эпюры напряжений в сжатом бетоне и принятой гипотезе плоских сечений такого распределения получить нельзя: **арматура всегда растянута** (рис. 1).

Таким образом, результаты расчетов по МПУ в табл. 1 полностью соответствуют подтвержденным экспериментально зависимостям на рис. 2. При $\xi > \xi_0 = 0,75$ в расчетах по МПУ напряжения $\sigma_s < 0$. В расчетах по НДМ напряжения $\sigma_s \geq 0$ при любых значениях ξ . Это подтверждает выводы [2] о значительном перерасходе арматуры при больших значениях ξ .

В [2, 6] приведен пример расчетов прочности по МПУ и НДМ таврового сечения изгибаемого железобетонного элемента с одиночным армированием. Получены следующие результаты. При армировании 4 Ø 25 предельный момент по МПУ 284,2 кНм превышает воспринимаемый момент по НДМ 269,5 кНм на 5,4 %. Однако при действии момента 284,2 кНм нелинейная деформационная модель для обеспечения прочности требует армирования 5 Ø 40, то есть в 3,2 раза больше, чем МПУ 4 Ø 25. Таким образом, небольшое увеличение момента в НДМ (на 5,4 %) вызывает значительное увеличение армирования (в 3,2 раза). Это противоречит физическим представлениям о работе конструкции и является свидетельством серьезного недостатка нелинейной деформационной модели.

Реализация положений СП [1] в компьютерных программах

В [1] предусмотрен следующий алгоритм проверки прочности нормальных сечений по НДМ.

1. Задаем исходные данные:
 - форму и геометрические размеры сечения;

- прочностные и деформативные характеристики материалов (бетона и арматуры);
 - точку начала координат в сечении;
 - координаты центра тяжести сечений арматурных стержней;
 - действующие усилия: моменты в двух направлениях $M_{x,d}, M_{y,d}$, продольную силу N_d .
2. Составляем уравнения равновесия [1, (8.39)–(8.41)]. В упрощенном виде их можно представить следующим образом:

$$M_{x,d} = M_{x,b}, M_{y,d} = M_{y,b}, N_d = N_b, \quad (2)$$

где $M_{x,b}, M_{y,b}, N_b$ – воспринимаемые усилия.

3. Решаем уравнения (2), определяя неизвестные – кривизну в каждом направлении $1/r_x, 1/r_y$ и относительную деформацию ϵ_0 в начале координат.

4. По формулам [1, (8.29), (8.30)] находим деформации бетона ϵ_b и арматуры ϵ_s в характерных точках сечения.

5. Среди найденных в п. 4 значений находим максимальные деформации бетона $|\epsilon_{b, max}|$ и арматуры $\epsilon_{s, max}$.

6. Согласно [1, п. 8.1.30] находим предельные значения деформаций бетона $\epsilon_{b, ult}$ и арматуры $\epsilon_{s, ult}$.

7. Сечение считаем прочным при выполнении условий [1, (8.37), (8.38)]:

$$|\epsilon_{b, max}| \leq \epsilon_{b, ult}, \epsilon_{s, max} \leq \epsilon_{s, ult} \quad (3)$$

Представленный алгоритм реализован в программе ОМ СНиП Железобетон [5], а также изложен в книге [7]. Сравнение примеров из [7], расчеты которых выполнены вручную, и по программе [5] показало практически полное совпадение результатов (табл. 2). Поэтому оба подхода с полным основанием следует признать правильными, и получаемые по программе [5] результаты использовать в качестве эталонных.

Таблица 2

Примеры из [7]. Максимальные относительные деформации бетона и арматуры, полученные расчетами в [5] и [7]

Table 2

Examples from [7]. The maximum relative deformations of concrete and reinforcement, obtained by calculations in [5] and [7]

Номер примера расчета в [7]	Расчет по			
	[7]		[5]	
	Вид деформаций			
	$ \epsilon_{b, max} $	$\epsilon_{s, max}$	$ \epsilon_{b, max} $	$\epsilon_{s, max}$
14	0,00019	0,0004	0,0002	0,0004
15	0,0032	0,0014	0,0031	0,14
16	0,0034	0,0012	0,0031	0,0012

Таким образом, основной принцип расчетов по НДМ состоит в следующем. При выполнении условий равновесия (равенстве действующих и воспринимаемых усилий) прочность сечения проверяют сравнением максимальных расчетных значений относительных деформаций бетона и арматуры с предельными значениями.

В компьютерных программах Лира 10, Ing+, ЛИРА-САПР, SCAD (Арбат), STARK ES, используемых в проектировании, принят другой подход. Критериями прочности являются понятия, отсутствующие в СП [1]: коэффициент запаса, коэффициент использования, процент использования. Сечение считают прочным, если, в отличие от (2), каждое из действующих усилий не превышает соответствующего воспринимаемого усилия:

$$M_{x,d} \leq M_{x,v}, M_{y,d} \leq M_{y,v}, N_d \leq N_v. \quad (4)$$

При этом деформации вообще не рассматривают, поэтому сравнить их с целью проверки выполнения условий (3) не представляется возможным. Отсутствуют также неотъемлемые составляющие НДМ – диаграммы состояния бетона и арматуры.

Поэтому сравнение действующих и воспринимаемых усилий (4) ошибочно и прочности не обеспечивает. Для подтверждения приведем изложенное в комментариях к [8] мнение разработчика программы Ing+:

«На слайде хорошо видно, что предельные усилия N, M_y, M_z равны 1431,15; 1011,63 и 420,96 кНм. А ниже мы видим, что действующие усилия N, M_y, M_z существенно больше – 1500, 1060,29 и 441,21 кНм. И вердикт – прочность сечения не обеспечена!».

Таким образом, по мнению разработчика, при заданном армировании уменьшение действующих усилий ведет к возрастанию прочности сечения. Это

очень серьезное заблуждение. На рис. 3 представлен график из пособия к СНиП 2.03.01-84 [9]. По горизонтальной и вертикальной осям отложены соответственно относительные моменты и продольные силы. Кривые ограничивают области прочности при различном армировании. Как видно, в нижней части графика при фиксированном моменте уменьшение продольной силы требует увеличения армирования. Действительная ситуация прямо противоположна представлениям разработчика, заложенным в программу Ing+. Более подробно этот вопрос рассмотрен в видеоролике [10].

В правильных расчетах при сравнении усилий должно выполняться неравенство [4, (65)]:

$$M \leq \pm(R_b S_b - \Sigma \sigma_{st} S_{st}).$$

Для каждого из возможных видов напряженного состояния – одноосного и косоугольного изгиба, внецентренного сжатия, внецентренного растяжения – в [4] приведена методика определения значений входящих в формулу величин.

Используемый в программах подход противоречит сформулированному выше основному принципу НДМ и простому здравому смыслу: нельзя сравнивать величины, которые должны быть равны, и выяснять, какая из них больше. При этом уравнения равновесия, представляющие основной закон механики, не выполняются: они просто исчезают, превращаясь в условия прочности. При отсутствии уравнений равновесия становится ненужным использование диаграмм состояния бетона и арматуры – неотъемлемых составляющих НДМ. В подобных обстоятельствах получаемые результаты в подавляющем большинстве случаев оказываются ошибочными и правильными могут быть только случайно.

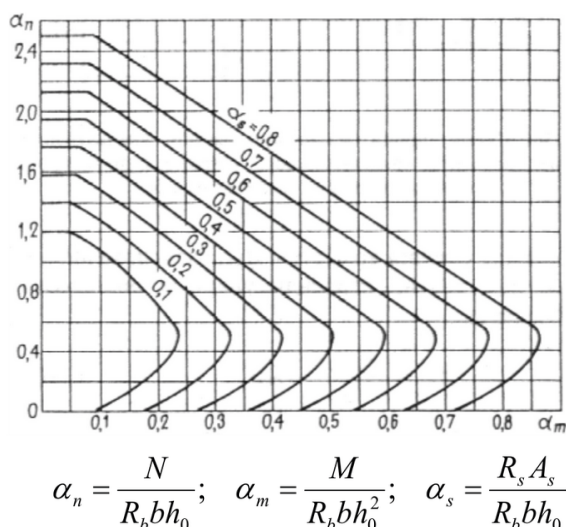


Рис. 3. Графики несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой [9, чертеж 35]

Fig. 3. Graphs of the bearing capacity of non-centrally compressed rectangular cross-section elements with symmetrical reinforcement [9, Drawing 35]

Укажем также, что, с точки зрения разработчиков, чем больше принятые критерии, тем больше запас и прочнее сечение. С этим нельзя согласиться. При увеличении критериев увеличивается степень невыполнения условий равновесия, вследствие чего возрастает вероятность получения полностью неприемлемых результатов.

Далее проанализируем методику, описанную разработчиками в документации к Лире 10. Для остальных рассматриваемых программ ради краткости приведем по одному ошибочному примеру.

Программа Лира 10. Рассмотрим цитату из руководства пользователя [11]:

«По нормам СНиП 2.03.01-84 положение нейтральной оси определяется из условий равенства внешней и внутренней нормальных сил и параллельности векторов внешних и внутренних моментов. Внутренний момент должен быть больше внешнего.»

По другим нормам положение нейтральной оси определяется из условия равенства внешних и внутренних нормальных сил и моментов согласно нелинейной деформационной теории. Максимальное сжатие в бетоне и растяжение в арматуре должны быть меньше соответствующих предельных значений.

Вычисление процента использования (%) по продольной силе (N) и изгибающим моментам (M) происходит следующим образом: по методике, изложенной в нормативных документах, определяются предельные усилия, воспринимаемые сечением с заданной продольной арматурой. Процент использования (%) вычисляется как отношение предельных и фактических усилий (N) и (M)».

Во втором абзаце цитаты, относящемся к НДМ, утверждается, что должны быть равны внешние (фактические) и внутренние (предельные) усилия, а в третьем абзаце предлагается вычислить отношение этих же усилий для оценки прочности. Налицо явное противоречие – при выполнении основного принципа НДМ отношение ВСЕГДА должно быть равно единице.

Согласно [1], вычислить воспринимаемые (предельные) усилия без действующих усилий невозможно. Воспринимаемые усилия – правые части уравнений равновесия (2) – получают автоматически после определения из уравнений равновесия значений кривизны $1/r_x$, $1/r_y$ и деформации ϵ_0 , так что воспринимаемые усилия ВСЕГДА равны действующим. В приведенной выше цитате записано, что предельные (воспринимаемые) усилия определяют «по методике, изложенной в нормативных документах». Однако никакой другой методики кроме решения системы уравнений равновесия в нормативных документах нет. Поэтому остается неясным, как разработчики Лир 10 вычисляют воспринимаемые усилия независимо от действующих усилий.

В [8] приведено полученное разработчиками Лир 10 решение примера 1, в котором непрочное

сечение считается прочным и недостаточное армирование может привести к аварии.

Аналогичные обстоятельства характерны и для рассмотренных ниже других программ.

Программа Ing+. В одной и той же точке сечения получены относительные деформации, отличающиеся в **56,8 раза** [12].

Программа ЛИРА-САПР. При одинаковых условиях расход арматуры, полученный в разных версиях программы, отличается в **5,2 раза** [13].

Программа SCAD (Арбат). Разработчики признают ошибочность результатов подбора армирования, однако никаких рекомендаций по исправлению ситуации не дают [14].

Программа STARK ES. При подборе армирования полученный расход арматуры **вдвое превышает требуемый** [8].

Из-за несоответствия алгоритмов программ нормам проектирования часть прокатываемой арматуры расходуется впустую. Ежегодный экономический ущерб только от перерасхода арматуры, возникающего при неправильных расчетах, составляет свыше 100 млрд руб. [15]. Также возможны аварии.

Вопросы для обсуждения

1. При сравнительно большой относительной высоте сжатой зоны бетона ξ результаты расчетов по НДМ значительно (количественно и качественно) отличаются от опытных данных и результатов по МПУ, что ведет к существенному неоправданному перерасходу арматуры и увеличению стоимости.

2. В компьютерных программах Лира 10, Ing+, ЛИРА-САПР, SCAD (Арбат), STARK ES при расчетах по НДМ приняты неправильные критерии прочности, что приводит к следующим ошибкам:

- сравниваются не расчетные относительные деформации бетона и арматуры с предельными значениями, как требует НДМ, а расчетные и предельные усилия, которые должны быть равны;
- сравнение расчетных и предельных усилий выполнено неправильно и не обеспечивает выполнения условий прочности;
- нарушается основной закон механики – не выполняются условия равновесия;
- не используются неотъемлемые составляющие НДМ – диаграммы состояния бетона и арматуры;
- алгоритмы программ не имеют ничего общего с НДМ в [1].

Поэтому в общем случае получаемые результаты ошибочны и могут привести к авариям или неоправданному перерасходу арматуры.

3. Целесообразно разработать документ для тестирования расчетов железобетонных конструкций на ЭВМ с набором эталонных примеров, сравнение с которыми позволит оценивать правильность расчетов по различным ЭВМ-программам и получать по ним одинаковые результаты при одинаковых исходных данных.

Широкое обсуждение сформулированных вопросов будет способствовать совершенствованию проектирования железобетонных конструкций, увеличению их экономичности и надежности. Ранее уже предлагалось провести аналогичное обсуждение [16]. Теперь, в связи с изложенными фактами, дискуссия представляется еще более актуальной и необходимой.

Список литературы

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва, 2018.
- Краковский М.Б., Тихонов И.Н. Реализация расчетов нормальных сечений железобетонных конструкций в программных комплексах // *Бетон и железобетон*. 2024. № 1 (620). С. 5–13. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1\(620\)-5-13](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1(620)-5-13). EDN: KIRZSS.
- Гвоздев А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат, 1978.
- СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР. Москва, 1989.
- ЭВМ-программа «ОМ СНиП Железобетон» для расчета железобетонных конструкций по отечественным нормам. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/d9198874a393cca32546401c9d1ac5fb/?ysclid=ml7s4tzjfx123388177>.
- Показательный пример: сравнение МПУ и НДМ. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=1HgChimxLAU>.
- Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Федоров В.С., Терехов И.А. Железобетонные конструкции. В 2-х частях. Москва, 2022.
- Результаты тестирования программ расчетов железобетонных конструкций Рабочей группой РААСН. Режим доступа: https://thewikihow.com/video_GTVNZ7bAD4c.
- ЦНИИПромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84). Москва, 1986.
- Состояние и перспективы развития расчетов железобетонных конструкций в РФ. Режим доступа: https://thewikihow.com/video_o7EVPQ5XiCA.
- Лира 10.12. Руководство пользователя, 2021. Режим доступа: <https://lira-soft.com/download/manuals/?ysclid=mkp8resaj131205688>.
- За 5 минут убедитесь в ошибочности программы Ing+. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/f69c498016d7220933062967640d7d22/?ysclid=ml7sfc087n222213611>.
- Экономичное проектирование железобетонных зданий. Устранение ошибок программы Лира-САПР. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=VZn4LsITa9M>.
- Признания SCAD Soft: программы Арбат и SCAD ошибочны, пользователи дезинформированы. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/56527a3e93fea729afaa63991ab95d69/?ysclid=ml7sk1a5mp457272299>.
- Краковский М.Б. Три возможности: как снизить металлоемкость железобетонных конструкций // *Строительная газета*. 2023. № 20. Режим доступа: <https://stroygaz.ru/publication/materials/tri-vozmozhnosti-kak-snizit-metalloemkost-zhelezobetonnykh-konstruktsiy/?ysclid=mk13gyggdw928736122>.
- Обращение к разработчикам программ расчетов железобетонных конструкций. Режим доступа: https://thewikihow.com/video_jofsT3ifeJE?ysclid=ml7smbfo8u576164690.

References

- SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow, 2018. (In Russian).
- Krakovsky M.B., Tikhonov I.N. Implementation of calculations of normal sections of reinforced concrete structures in software packages. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 2024, no. 1 (620), pp. 5–13. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1\(620\)-5-13](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1(620)-5-13). EDN: KIRZSS.
- Gvozdev A.A. New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978. (In Russian).
- SNiP 2.03.01-84*. Concrete and reinforced concrete structures. Gosstroy USSR. Moscow, 1989. (In Russian).
- OM SNiP Reinforced Concrete program for calculating reinforced concrete structures according to domestic standards. Available at: <https://rutube.ru/video/d9198874a393cca32546401c9d1ac5fb/?ysclid=ml7s4tzjfx123388177>.
- An illustrative example: comparing UEM and NDM. <https://www.youtube.com/watch?v=1HgChimxLAU>.
- Kodysh E.N., Trekin N.N., Fedorov V.S., Terехov I.A. Reinforced Concrete Structures. In 2 parts. Moscow, 2022. (In Russian).
- Results of testing of programs for calculating reinforced concrete structures by the RAASN Working Group. Available at: https://thewikihow.com/video_GTVNZ7bAD4c.
- TsNIIPromzdaniy of the USSR State Construction Committee, Research Institute of Reinforced Concrete of the USSR State Construction Committee. Guidelines for the Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures Made of Heavy and Light Concretes without Pre-Tensioned Reinforcement (to SNiP 2.03.01-84). Moscow, 1986. (In Russian).
- The state and prospects of development of reinforced concrete structures in the Russian Federation.

Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=o-7EVPQ5XiCA>.

11. Lira 10.12. User Manual, 2021. Available at: <https://lira-soft.com/download/manuals/?ysclid=mkp8res-jaj131205688>.
12. In 5 minutes, make sure that the lng+. program is wrong. Available at: <https://rutube.ru/video/f69c498016d7220933062967640d7d22/?ysclid=ml7s-fc087n222213611>.
13. Economical design of reinforced concrete buildings. Elimination of errors in the LIRA-CAD program. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=VZn4Lsl-Ta9M>.
14. SCAD Soft's Confessions: The Arbat and SCAD programs are flawed, and users are misinformed. Available at: <https://rutube.ru/video/56527a3e93fea729a-faa63991ab95d69/?ysclid=ml7sk1a5mp457272299>.
15. Krakovskiy M.B. Three Possibilities: How to Reduce the Metal Content of Reinforced Concrete Structures. *Stroitel'naya Gazeta*, 2023, no. 20. Available at: <https://stroygaz.ru/publication/materials/tri-voz-mozhnosti-kak-snizit-metalloemkost-zhelezobeton-nykh-konstruktsiy/?ysclid=mkl3gyggdw928736122>. (In Russian).
16. Appeal to the developers of programs for calculating reinforced concrete structures. Available at: https://thewikihow.com/video_jofsT3ifeJE?ysclid=ml7smb-fo8u576164690.

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Борисович Краковский, д-р техн. наук, профессор, директор, ООО НПКТБ «ОПТИМИЗАЦИЯ», Москва

e-mail: mbkrakov@yandex.ru

Mikhail B. Krakovsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director, LLC NPCTB OPTIMIZATSIYA, Moscow

e-mail: mbkrakov@yandex.ru

Игорь Николаевич Тихонов[✉], д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: tikhonovniizhb21@yandex.ru

Igor N. Tikhonov[✉], Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: tikhonovniizhb21@yandex.ru

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.45; 624.073

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-29-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-29-41)**Н.Ю. ЦЫБИН**

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

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОЛЬНОГО РАСЧЕТНОГО КОНТУРА ПРОДАВЛИВАНИЯ

Аннотация

Введение. Сосредоточенное действие нагрузок является одной из основных причин хрупкого разрушения железобетонных конструкций. Расчет на продавливание железобетонных плит в отечественных и зарубежных нормах опирается на геометрические характеристики контура, расположенного вокруг площадки передачи нагрузки. В случае действия сосредоточенной силы, единственной геометрической характеристикой является периметр. Положения расчета на продавливание требуют учета сосредоточенных моментов, следовательно есть необходимость вычисления соответствующих геометрических характеристик. Методика их вычисления в нормативной документации описана в общем виде. Для сложных контуров готовые формулы отсутствуют. Это влечет за собой необходимость разработки универсальной методики расчета геометрических характеристик для произвольных контуров.

Цель. Разработка универсальной методики вычисления геометрических характеристик произвольных расчетных контуров продавливания, составленных из отрезков и дуг.

Материалы и методы. Предложенная в статье методика основана на общих подходах курса сопротивления материалов. Основным отличием является то, что геометрические характеристики вычисляются для контура. Это приводит к различиям в единицах измерения соответствующих величин для поперечных сечений стержней и контура.

Результаты. Получены геометрические характеристики элементарных фигур, таких как отрезок и дуга, на основе которых затем вычислены данные величины для всего расчетного контура. Полученные формулы исключают противоречия в единицах измерения. На основе полученных формул выполнен пример расчета контура, составленного из отрезков и дуг.

Выводы. В статье предложен универсальный координатный метод вычисления геометрических характеристик, в том числе центробежного момента инерции, произвольного расчетного контура продавливания, составленного из отрезков и дуг. Данный подход можно реализовать с использованием распространенного программного обеспечения, электронных таблиц и т. д.

Ключевые слова: железобетон, перекрытие, продавливание, сосредоточенная нагрузка, сосредоточенный момент, геометрические характеристики, момент инерции, координатный метод, расчетный контур

Для цитирования: Цыбин Н.Ю. Методика вычисления геометрических характеристик произвольного расчетного контура продавливания // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 29–41. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-29-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-29-41). EDN: JMRDIA.

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 28.11.2025

Поступила после рецензирования 03.02.2026

Принята к публикации 05.02.2026

N.Yu. TSYBIN

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

METHOD FOR GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF AN ARBITRARY CALCULATED PUNCHING CONTOUR CALCULATION

Abstract

Introduction. The concentrated action of loads is one of the main causes of brittle failure in reinforced concrete structures. The punching calculation of reinforced concrete slabs in domestic and international codes is based on the geometric characteristics of a contour located around the load application area. In the case of a concentrated force, the only geometric characteristic considered is the perimeter. Punching calculation provisions also require accounting of concentrated moments, which consequently necessitates the calculation of the corresponding geometric characteristics. The methodology for their calculation is described in general terms in regulatory documents. Ready-made formulas are not available for complex contours. This creates the need to develop a universal method for calculating the geometric characteristics of arbitrary contours.

Aim. To develop a universal method for calculating the geometric characteristics of arbitrary punching contour composed of straight-line segments and arcs.

Materials and methods. The method proposed in the article is based on general approaches from the course of strength of materials. The main distinction is that the geometric characteristics are calculated for a contour. This leads to differences in the units of measurement of the corresponding quantities for bar cross-sections and for a contour.

Results. The geometric characteristics of elementary figures, such as a straight-line segment and an arc, are derived. These expressions are then used to determine the corresponding characteristics for the entire contour. The obtained formulas eliminate inconsistencies in units of measurement. An example calculation of a contour composed of straight-line segments and arcs is provided based on the derived formulas.

Conclusions. A universal coordinate-based method for calculating the geometric characteristics, including the rotational moment of inertia, of an arbitrary punching contour composed of straight-line segments and arcs is proposed. The approach can be implemented using commonly available software tools, spreadsheets, etc.

Keywords: reinforced concrete, slab, punching, concentrated load, concentrated moment, geometric characteristics, moment of inertia, coordinate method, contour

For citation: Tsybin N.Yu. Method for geometric characteristics of an arbitrary calculated punching contour calculation. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 29–41. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-29-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-29-41). EDN: JMRDIA.

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 28.11.2025

Revised 03.02.2026

Accepted 05.02.2026

Введение

Вопрос разрушения плоских безбалочных плит железобетонных перекрытий зданий и сооружений при действии сосредоточенных сил (продавливание) рассматривается в инженерном и научном сообществе давно [1] и активно [2, 3]. Причиной является тот факт, что существенная часть аварийных ситуаций в подобных конструкциях возникает именно в результате продавливания.

В области передачи сосредоточенных усилий на плиту перекрытия в последней возникает сложное напряженно-деформированное состояние (НДС). Его изучение является предметом многочисленных научных исследований [4]. Результаты этих исследований, в силу сложности, редко применяются в инженерной практике. В научных исследованиях рассматриваются конкретные расчетные ситуации [5], которые не могут в полной мере отразить все разнообразие случаев, встречающихся на практике.

В процессе проектирования инженеру-конструктору в пределах одного здания бывает необходимо проверять десятки, а иногда и сотни участков продавливания, некоторые из которых могут существенно отличаться от примеров, приведенных в нормативных документах. Несмотря на существенное развитие численных методов, позволяющих моделировать подобные задачи в пространственной физически нелинейной постановке [6, 7], сложность процесса моделирования и время, затрачиваемое на расчет, не позволяют на данном этапе научно-технического прогресса внедрять такой подход повсеместно. Ввиду этого в большинстве нормативных документов, отражающих вопросы расчета на продавливание, исследование сложного НДС в зоне передачи нагрузки заменяют проверкой на прочность некоторого контура [8, 9], расположенного вокруг площадки передачи нагрузки. Данный контур далее будем называть расчетным.

Сама форма расчетного контура, а также то, каким образом в критериях прочности учитываются его характеристики, является обобщением научных, численных, экспериментальных исследований [10] и отличается в различных нормативных документах. Именно уточнению формы и габаритов расчетного

контура посвящено существенное число научных работ [11, 12]. Отметим, что расчетный контур может быть замкнутым [13] или незамкнутым, полным (вокруг всей площадки передачи нагрузки) или усеченным, обрезанным отверстиями [7], состоять только из прямых отрезков или содержать дополнительно дуги (закругления). На рис. 1 приведены некоторые варианты расчетных контуров.

Выбор формы контура при продавливании оставим на усмотрение требований соответствующих нормативных документов, отражающих вопрос расчета на продавливание. Отметим, что, независимо от формы расчетного контура, элементы, из которых он составлен, представляют собой отрезки и дуги.

Необходимость учета в расчетах на продавливание сосредоточенных моментов приводит к тому, что в соответствующих формулах появляются слагаемые [12], аналогичные моментам инерции и сопротивления поперечных сечений стержней. Рассмотрим это на конкретных формулах наиболее распространенных нормативных документов. Для простоты рассмотрим случаи расчета без учета поперечного армирования.

Согласно Eurocode 2 [8], максимальное значение сдвигающих сил, V_{Ed} в расчетном контуре, распределенных по длине и направленных по нормали к плите, которое затем должно сравниваться с предельно допустимым, в случае внецентренного приложения нагрузки (при наличии сосредоточенных моментов) определяется формулой:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d}, \quad d = (d_y + d_z)/2, \quad \beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \times \frac{u_1}{W_1}, \quad (1)$$

где V_{Ed} , M_{Ed} – сосредоточенная продавливающая сила и момент соответственно;

d_y , d_z , – эффективная глубина (рабочая высота сечения согласно СП 63.13330.2018 [9]) в направлении двух взаимно перпендикулярных осей плиты;

u_i – периметр контрольного (расчетного) контура;

W_1 – фактически представляет собой пластический момент сопротивления, который может быть получен из статических моментов полусечений;

k – коэффициент, зависящий от соотношения между размерами колонны.

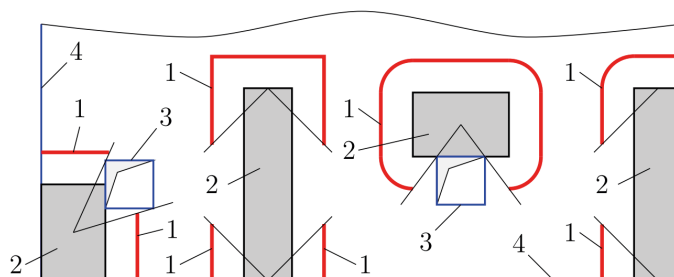


Рис. 1. Некоторые варианты расчетных контуров: 1 – элементы расчетных контуров; 2 – площадка передачи нагрузки (колонна, пилон, стена); 3 – отверстие в плите перекрытия; 4 – грань плиты перекрытия
Fig. 1. Some variants of calculation contours: 1 – elements of the design contours; 2 – load transfer area (column, pylon, wall); 3 – hole in the floor slab; 4 – face of the floor slab

Для определения величины W_1 в данном нормативном документе приведена общая формула для i -го участка контура, а именно:

$$W_i = \int_0^{u_i} |e| dl, \quad (2)$$

в которой dl – дифференциал длины расчетного контура;

e – расстояние до осей, относительно которых действует момент.

Для некоторых вариантов расчетных контуров значения W_1 приведены непосредственно в Eurocode 2 [8], однако приведенный список полностью не исчерпывает многообразие встречающихся на практике случаев.

Согласно СП 63.13330.2018 [9], геометрические характеристики расчетного контура вычисляются как сумму соответствующих характеристик отдельных участков, с условной единичной шириной $t = 1$. Это может привести к неправильным результатам, особенно если расчетчик (инженер) не в полной мере осознает понятие «единичная ширина». Причиной является то, что в курсе сопротивления материалов изучаются геометрические характеристики именно площади. Таким образом, понятие *геометрических* характеристик контура остается невостребованным и рассматривается лишь в курсе физики, в контексте инерции линейной *массы*, а также в курсе математики, без привязки к реальным физическим величинам и объектам.

Рассмотрим данное утверждение на конкретном примере абстрактного контура, составленного из одного вертикального отрезка длиной $L = 0,6$ м. Так как в [9] моменты и геометрические характеристики расчетного контура при расчете на продавливание рассматриваются *в направлении оси, а не относительно*, как это принято в курсе сопротивления материалов, будем придерживаться того же правила.

В соответствии с известными формулами моментов инерции для прямоугольного сечения найдем:

$$I_x = \frac{t^3 L}{12} = \frac{1^3 \times 0,6 \text{ м}}{12} = 0,05 \text{ м}^4; \quad I_y = \frac{t L^3}{12} = \frac{1 \times (0,6 \text{ м})^3}{12} = 0,018 \text{ м}^4. \quad (3)$$

Из приведенных результатов может сложиться впечатление, что момент инерции *в направлении* оси y значительно меньше, чем в направлении оси x . Однако это противоречит физическому смыслу. Также различаются размерности полученных значений. Ввиду сказанного выше можно сделать вывод, что понятие момента инерции контура, приведенное в [9], требует уточнения.

Сформулируем список требований к разрабатываемой методике.

1. В первую очередь методика должна быть универсальной, т. е. позволять рассчитывать геометрические характеристики произвольных расчетных контуров.

2. Учитывая различные варианты расчетных контуров, предлагаемых нормативными документами, методика должна учитывать возможное наличие прямолинейных и дуговых участков.

3. Методика должна быть легко реализуема в различных программных средах и языках программирования, в первую очередь в электронных таблицах, учитывая широкое использование последних в практике.

4. Методика должна позволять определять по универсальным формулам: периметр; положение центра тяжести; осевые, центробежные и полярный моменты инерции; упругие моменты сопротивления расчетного контура.

Учитывая сформулированные требования к разрабатываемой методике, можно определить ее целевую аудиторию. В первую очередь это инженеры-конструкторы, в чьи повседневные обязанности входит проверка прочности плит перекрытий при продавливании.

Материалы и методы

Геометрические характеристики отрезка

Рассмотрим отрезок AB в произвольной декартовой прямоугольной системе координат $x_0 O_0 y_0$ (рис. 2). Середину отрезка обозначим точкой O и разместим в ней систему координат xOy , причем $x \parallel x_0$ и $y \parallel y_0$. Середина отрезка O совпадает с его центром тяжести, следовательно оси x и y являются центральными.

Совместим с отрезком естественную координатную ось $O_1 l$ ($l \in [0, L]$). Положение точки O_1 совпадает с точкой A начала отрезка. Тогда координата произвольной точки M на отрезке в системе $x_0 O_0 y_0$ будет связана с координатой l (в соответствии с рис. 2) соотношениями:

$$x_0 = x_{a_0} + l \cos(\alpha); \quad y_0 = y_{a_0} + l \sin(\alpha). \quad (4)$$

Аналогично в системе координат xOy получим:

$$x = \left(l - \frac{L}{2}\right) \cos(\alpha); \quad y = \left(l - \frac{L}{2}\right) \sin(\alpha). \quad (5)$$

В данных выражениях L – полная длина отрезка:

$$L = \int_0^L dl = \sqrt{(x_{b_0} - x_{a_0})^2 + (y_{b_0} - y_{a_0})^2} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}. \quad (6)$$

Координаты центра тяжести отрезка в системе координат $x_0 O_0 y_0$ обозначим как x_{c_0} и y_{c_0} . В соответствии с рис. 2 связь между координатами x_0 и y_0 произвольной точки M и координатами x и y имеет вид:

$$x_0 = x + x_{c_0}; \quad y_0 = y + y_{c_0}. \quad (7)$$

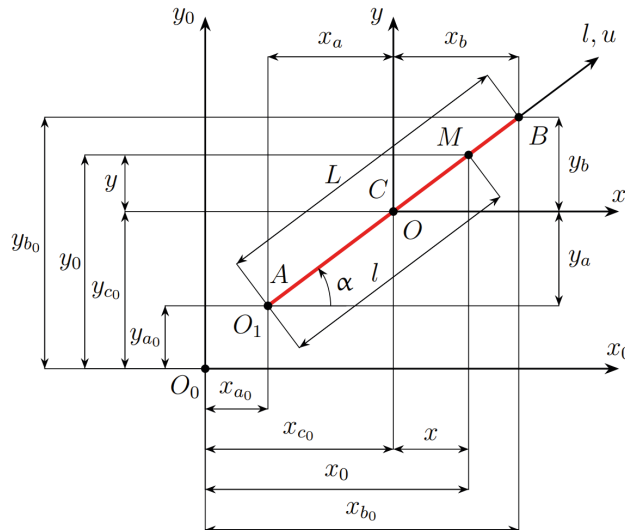


Рис. 2. Произвольный отрезок
Fig. 2. Arbitrary segment

Координаты центра тяжести отрезка в системе $x_0O_0y_0$ могут быть вычислены по формулам:

$$x_{c_0} = x_{a_0} + \frac{L}{2} \cos(\alpha); \quad y_{c_0} = y_{a_0} + \frac{L}{2} \sin(\alpha). \quad (8)$$

Косинус и синус угла α можно вычислить из координат начала (A) и конца (B) отрезка в системе $x_0O_0y_0$ или xOy по формулам:

$$\cos(\alpha) = \frac{x_{b_0} - x_{a_0}}{L} = \frac{x_b - x_a}{L}; \quad \sin(\alpha) = \frac{y_{b_0} - y_{a_0}}{L} = \frac{y_b - y_a}{L}. \quad (9)$$

Вычислим осевые (I_x, I_y) и центробежный (I_{xy}) моменты инерции отрезка в направлении (а не относительно) центральных осей xOy с учетом выражений (5):

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \int_0^L x^2 dl = \frac{L^3}{12} \cos^2(\alpha); \quad I_y = \int_0^L y^2 dl = \frac{L^3}{12} \sin^2(\alpha); \\ I_{xy} &= \int_0^L xy dl = \frac{L^3}{12} \sin(\alpha) \cos(\alpha). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Величины I_x, I_y, I_{xy} в дальнейшем будем называть центральными (собственными) моментами инерции отрезка. Из данных формул следует, что осевые моменты инерции отрезка, в отличие от осевых моментов поперечных сечений стержней, могут принимать также нулевое значение, в зависимости от величины угла α . Размерностью осевых и центробежного моментов инерции отрезка является [длина³], в отличие от аналогичных величин для площади, где размерностью является [длина⁴]. Осевые моменты положительны или равны нулю. Центробежный момент инерции может быть положительным, отрицательным или равным нулю.

Вычислим осевые моменты инерции в направлении главных центральных осей в соответствии с формулами, знакомыми из курса сопротивления

материалов.

$$I_{u,v} = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2}\right)^2 + I_{xy}^2}. \quad (11)$$

В результате найдем:

$$I_u = \frac{L^3}{12}; \quad I_v = 0. \quad (12)$$

Направление главной оси u (совпадающее с осью l) показано на рис. 2. Начало оси расположено в точке O (в центре отрезка).

Складывая между собой первые два равенства (10) и равенства (12), получим условие инвариантности полярного момента инерции:

$$I_p = I_x + I_y = I_u + I_v = \frac{L^3}{12}. \quad (13)$$

Подстановка (12) в (10) приведет к более простым формулам:

$$I_x = I_u \cos^2(\alpha); \quad I_y = I_u \sin^2(\alpha); \quad I_{xy} = I_u \sin(\alpha) \cos(\alpha). \quad (14)$$

Положение центральных осей отрезка в общем случае не совпадает с положением центральных осей всего контура. В связи с этим необходимо знать, каким образом вычисляются характеристики отрезка относительно произвольных осей x_0, y_0 . Вычислим осевые (I_{x_0}, I_{y_0}) и центробежный ($I_{x_0y_0}$) моменты инерции отрезка. Для этого воспользуемся формулами:

$$I_{x_0} = \int_0^L x_0^2 dl; \quad I_{y_0} = \int_0^L y_0^2 dl; \quad I_{x_0y_0} = \int_0^L x_0y_0 dl. \quad (15)$$

Учитывая формулы (6), (7) и (10), получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{x_0} &= \int_0^L (x + x_{c_0})^2 dl = I_x + 2S_x x_{c_0} + Lx_{c_0}^2; \\ I_{y_0} &= \int_0^L (y + y_{c_0})^2 dl = I_y + 2S_y y_{c_0} + Ly_{c_0}^2; \\ I_{x_0 y_0} &= \int_0^L (x + x_{c_0})(y + y_{c_0}) dl = I_{xy} + 2S_x x_{c_0} + 2S_y y_{c_0} + Lx_{c_0} y_{c_0}. \end{aligned} \right\} (16)$$

Здесь, как и в случае статических моментов, вычисление выполнено *не относительно, а в направлении* соответствующих осей.

Входящие в формулы (16) величины S_x и S_y представляют собой статические моменты отрезка *в направлении* осей x и y , вычисляемые по формулам:

$$S_x = \int_0^L x dl = 0; \quad S_y = \int_0^L y dl = 0. \quad (17)$$

Данные величины равны нулю, так как оси x и y являются центральными. Убедиться в этом можно, подставив (5) в (17). В направлении произвольных осей x_0 и y_0 формулы (17), с учетом (7), примут вид:

$$\left. \begin{aligned} S_{x_0} &= \int_0^L x_0 dl = \int_0^L (x + x_{c_0}) dl = Lx_{c_0}; \\ S_{y_0} &= \int_0^L y_0 dl = \int_0^L (y + y_{c_0}) dl = Ly_{c_0}. \end{aligned} \right\} (18)$$

Формулы (18) также могут быть использованы для определения центра тяжести:

$$x_{c_0} = \frac{S_{x_0}}{L}; \quad y_{c_0} = \frac{S_{y_0}}{L}. \quad (19)$$

Окончательные формулы (16) для вычисления моментов инерции отрезка *в направлении* произвольных осей x_0 и y_0 , с учетом (17), примут вид:

$$I_{x_0} = I_x + Lx_{c_0}^2; \quad I_{y_0} = I_y + Ly_{c_0}^2; \quad I_{x_0 y_0} = I_{xy} + Lx_{c_0} y_{c_0}. \quad (20)$$

Таким образом, осевые и центробежный моменты инерции отрезка в направлении произвольных осей $x_0 O_0 y_0$ представляют собой сумму осевого и центробежного моментов инерции в направлении собственных центральных осей xOy , вычисляемых по формулам (14), и слагаемого, отвечающего за эксцентриситет центра тяжести, аналогично формулам для геометрических характеристик поперечных сечений.

Используя формулы (20), можно выполнить обратное действие:

$$I_x = I_{x_0} - Lx_{c_0}^2; \quad I_y = I_{y_0} - Ly_{c_0}^2; \quad I_{xy} = I_{x_0 y_0} - Lx_{c_0} y_{c_0}. \quad (21)$$

Данные формулы (21) интерпретируются следующим образом: если известны осевые (I_{x_0}, I_{y_0}) и центробежный ($I_{x_0 y_0}$) моменты инерции в произвольной системе координат $x_0 O_0 y_0$, а также положение центра тяжести в данной системе координат (x_{c_0}, y_{c_0}), то, используя формулы (21), можно вычислить осевые (I_x, I_y) и центробежный (I_{xy}) моменты инерции в направлении центральных осей xOy .

Геометрические характеристики дуги

Во введении было показано, что, согласно требованиям некоторых нормативных документов, расчетный контур может содержать дуги. Ввиду этого получим также геометрические характеристики произвольной дуги AB , приведенной на рис. 3.

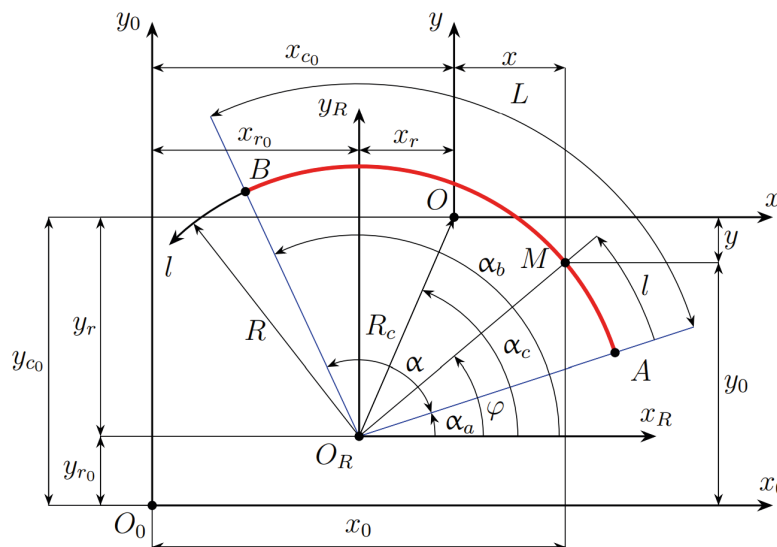


Рис. 3. Произвольная дуга
Fig. 3. Arbitrary arc

На рис. 3 приведена произвольная дуга, имеющая радиус R . Центр опорной окружности O_R расположен относительно произвольной системы координат $x_0O_0y_0$ в точках x_{r_0}, y_{r_0} . В точке O_R расположена вспомогательная система координат $x_R O_R y_R$. Введем в данной системе угловую координату φ , отсчитываемую от оси x_R . Тогда координаты произвольной точки M дуги в системе координат $x_0O_0y_0$ связаны с углом φ следующими соотношениями:

$$x_0 = x_{r_0} + R \cos(\varphi); \quad y_0 = y_{r_0} + R \sin(\varphi). \quad (22)$$

Длина дуги вычисляется по известной формуле:

$$L = R\alpha, \quad (23)$$

где α – центральный угол дуги, измеряемый в радианах:

$$\alpha = \alpha_b - \alpha_a. \quad (24)$$

В соответствии с рис. 3 в данной формуле α_a и α_b – значения угла φ , которые соответствуют началу (точка A) и концу дуги (точка B).

Естественная координата l отсчитывается вдоль дуги от точки A . Дифференциал дуги dl линейно связан с дифференциалом угла φ и радиусом R соотношением:

$$dl = R d\varphi. \quad (25)$$

Тогда статические моменты в направлении осей x_0 и y_0 будут определяться формулами:

$$S_{x_0} = \int_0^L x_0 dl = \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} x_0 R d\varphi; \quad S_{y_0} = \int_0^L y_0 dl = \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} y_0 R d\varphi. \quad (26)$$

После подстановки выражений (22) в (26) найдем:

$$\left. \begin{aligned} S_{x_0} &= R^2(\sin(\alpha_b) - \sin(\alpha_a)) + Lx_{r_0} = 2R^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\alpha_c) + Lx_{r_0}; \\ S_{y_0} &= R^2(\cos(\alpha_a) - \cos(\alpha_b)) + Ly_{r_0} = 2R^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha_c) + Ly_{r_0}. \end{aligned} \right\} (27)$$

Формулы (27) могут быть использованы для нахождения центра тяжести дуги в системе координат $x_0O_0y_0$ по аналогии с формулами (19). В результате получим:

$$\left. \begin{aligned} x_{c_0} &= \frac{S_{x_0}}{L} = R_c \cos(\alpha_c) + x_{r_0} = x_r + x_{r_0}; \\ y_{c_0} &= \frac{S_{y_0}}{L} = R_c \sin(\alpha_c) + y_{r_0} = y_r + y_{r_0}; \\ R_c &= \frac{2R^2}{L} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad \alpha_c = \frac{\alpha_b + \alpha_a}{2} = \alpha_a + \frac{\alpha}{2}; \\ x_r &= R_c \cos(\alpha_c); \quad y_r = R_c \sin(\alpha_c). \end{aligned} \right\} (28)$$

где x_r и y_r – координаты центра тяжести дуги в системе координат $x_R O_R y_R$;

R_c – радиус окружности, проходящей через центр тяжести дуги с центром в точке O_R ;

α_c – средний угол дуги.

Собственные центральные оси xOy дуги представлены на рис. 3. Положение произвольной точки M дуги в системе координат xOy будет вычисляться по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - x_{c_0} = R \cos(\varphi) - R_c \cos(\alpha_c); \\ y &= y_0 - y_{c_0} = R \sin(\varphi) - R_c \sin(\alpha_c). \end{aligned} \right\} (29)$$

Вычислим моменты инерции в направлении собственных центральных осей с учетом формул (29):

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} x^2 R d\varphi = \frac{LR^2}{2} + \frac{R^3}{2} \sin(\alpha) \cos(2\alpha_c) - Lx_r^2; \\ I_y &= \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} y^2 R d\varphi = \frac{LR^2}{2} - \frac{R^3}{2} \sin(\alpha) \cos(2\alpha_c) - Ly_r^2; \\ I_{xy} &= \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} xy R d\varphi = \frac{LR^2}{2} \left(\frac{R}{L} \sin(\alpha) - \frac{R_c^2}{R} \right) \sin(2\alpha_c). \end{aligned} \right\} (30)$$

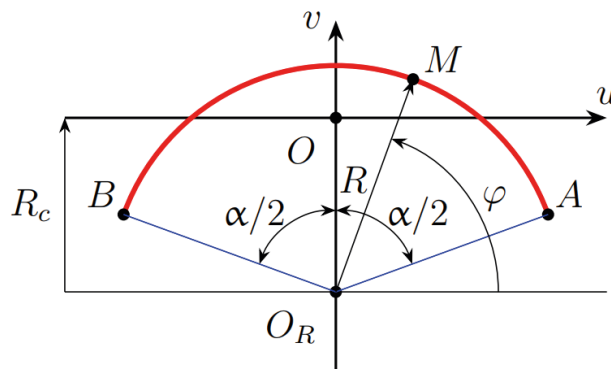


Рис. 4. Произвольная дуга относительно главных центральных осей
Fig. 4. An arbitrary arc relative to the main central axe

Выражения (30) аналогично полученным ранее для отрезка (14) удобнее записать через главные моменты инерции. Направление главной оси Ov дуги совпадает с направлением линии, проведенной из центра опорной окружности к центру тяжести. Формулы для вычисления центра тяжести дуги относительно опорной окружности были получены ранее.

Положение произвольной точки M в системе главных центральных осей uOv в соответствии с рис. 4 вычисляется по формулам:

$$u = R \cos(\varphi); \quad v = R \sin(\varphi) - R_c. \quad (31)$$

Формулы для вычисления моментов инерции дуги в главной системе координат uOv записаны ниже:

$$I_u = \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} u^2 R d\varphi; \quad I_v = \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} v^2 R d\varphi; \quad I_{uv} = \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} uv R d\varphi. \quad (32)$$

С учетом (31) из (32) получим:

$$\begin{aligned} I_u &= \frac{LR^2}{2} \left(1 - \frac{R}{L} \sin(\alpha) \right); \\ I_v &= \frac{LR^2}{2} \left(1 + \frac{R}{L} \sin(\alpha) \right) - LR_c^2; \quad I_{uv} = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

Аналогичные результаты можно получить, если положить в формулы (30) средний угол дуги $\alpha_c = \pi/2$.

Складывая между собой первые две формулы (30) и (33), получим:

$$I_p = I_x + I_y = I_u + I_v = L(R^2 - R_c^2). \quad (34)$$

Таким образом, инвариантность полярного момента инерции I_p относительно поворота центральной системы координат выполняется.

Используя равенства (33), перепишем формулы (30) в более удобном виде через главные моменты инерции:

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_u \sin^2(\alpha_c) + I_v \cos^2(\alpha_c); \\ I_y &= I_u \cos^2(\alpha_c) + I_v \sin^2(\alpha_c); \\ I_{xy} &= \frac{I_v - I_u}{2} \sin(2\alpha_c). \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Теперь, зная собственные моменты инерции дуги (формулы (30) или (35)) в направлении центральных осей xOy , можно найти данные величины в направлении произвольных осей x_0Oy_0 по формулам (20). Положение центра тяжести x_{c_0} и y_{c_0} при этом необходимо вычислять по формулам (28).

Геометрические характеристики контура

При определении геометрических характеристик контура, составленного из нескольких элементов (отрезков или дуг), можно использовать аддитивное свойство интегралов, заключающееся в том, что интеграл суммы равен сумме интегралов. Таким образом, величина какой-либо характеристики контура равна сумме

соответствующих характеристик каждого из элементов, составляющих данный контур.

Суммарная длина контура определяется формулой:

$$L = \sum_{i=1}^N L_i, \quad (36)$$

где i – номер элемента (отрезка или дуги) в контуре;

N – число элементов в контуре;

L_i – длина элемента i , определяемая согласно (6) для отрезков или (23) для дуги.

Для статических моментов контура, составленного из нескольких элементов, получим:

$$S_{x_0} = \sum_{i=1}^N S_{i,x_0} = \sum_{i=1}^N L_i x_{i,c_0}; \quad S_{y_0} = \sum_{i=1}^N S_{i,y_0} = \sum_{i=1}^N L_i y_{i,c_0}. \quad (37)$$

где S_{i,x_0} и S_{i,y_0} – статические моменты элемента i в направлении осей x_0 и y_0 ;

x_{i,c_0} и y_{i,c_0} – координаты центра элемента i в направлении осей x_0 и y_0 , определяемые согласно (8) для отрезков или (28) для дуг.

Положение центра тяжести всего контура может быть определено по формулам (19). С учетом выражений (36) и (37) получим:

$$x_{c_0} = \frac{S_{x_0}}{L} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i x_{i,c_0}}{\sum_{i=1}^N L_i}; \quad y_{c_0} = \frac{S_{y_0}}{L} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i y_{i,c_0}}{\sum_{i=1}^N L_i}. \quad (38)$$

Для осевых и центробежного моментов инерции с учетом формул (20) в направлении произвольных осей x_0Oy_0 получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{x_0} &= \sum_{i=1}^N I_{i,x_0} = \sum_{i=1}^N (I_{i,x_i} + L_i x_{i,c_0}^2); \\ I_{y_0} &= \sum_{i=1}^N I_{i,y_0} = \sum_{i=1}^N (I_{i,y_i} + L_i y_{i,c_0}^2); \\ I_{x_0 y_0} &= \sum_{i=1}^N I_{i,x_0 y_0} = \sum_{i=1}^N (I_{i,x_i y_i} + L_i x_{i,c_0} y_{i,c_0}), \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

где I_{i,x_i} , I_{i,y_i} и $I_{i,x_i y_i}$ – осевые и центробежный моменты инерции элемента i в направлении собственных центральных осей x_i и y_i согласно формулам (14) для отрезков. Для дуг данные величины вычисляются по формулам (35).

Для вычисления осевых и центробежного моментов инерции в направлении центральных осей всего контура можно использовать два основных подхода.

1. Пересчитать геометрические характеристики каждого из элементов относительно центральных осей контура, т. е. выполнить расчет по формулам:

$$I_x = \sum_{i=1}^N (I_{i,x_i} + L_i(x_{i,c_0} - x_{c_0})^2); \quad I_y = \sum_{i=1}^N (I_{i,y_i} + L_i(y_{i,c_0} - y_{c_0})^2);$$

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^N (I_{i,x_i y_i} + L_i(x_{i,c_0} - x_{c_0})(y_{i,c_0} - y_{c_0})). \quad (40)$$

2. Используя значения осевых и центробежного моментов относительно произвольных осей $x_0 O_0 x_0$, выполнить расчет по формулам (21).

Результаты вычисления по формулам (40) и (21) будут одинаковыми.

После нахождения осевых и центробежных моментов всего контура по формулам (40) или (21) осевые моменты инерции в направлении главных осей можно вычислить по формулам (11). Далее можно вычислить углы поворота главных осей по формулам:

$$\alpha_u = \arctan\left(\frac{I_{xy}}{I_x - I_v}\right); \quad \alpha_v = \arctan\left(\frac{I_{xy}}{I_x - I_u}\right). \quad (41)$$

Углы α_u и α_v отсчитываются от оси x против часовой стрелки (в сторону оси y). В формулах (41) также имеется отличие от классических формул, полученных в курсе сопротивления материалов:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{I_{xy}}{I_y - I_1}\right); \quad \alpha_2 = \arctan\left(\frac{I_{xy}}{I_y - I_2}\right). \quad (42)$$

Причиной данного отличия является тот факт, что в данной статье, в соответствии с [9], геометрические характеристики контура вычислялись не относительно, а в направлении осей. Формулы совпадут при замене в правых частях, а именно $2 \leftrightarrow u, 1 \leftrightarrow v, x, y \leftrightarrow y, x$.

По аналогии с курсом сопротивления материалов далее можно ввести следующие геометрические характеристики, называемые моментами сопротивления контура:

$$W_x^+ = \frac{I_x}{x_{\max}}; \quad W_x^- = \frac{I_x}{|x_{\min}|}; \quad W_y^+ = \frac{I_y}{y_{\max}}; \quad W_y^- = \frac{I_y}{|y_{\min}|}. \quad (43)$$

В данных формулах x_{\min}, x_{\max} – координаты точек, наиболее удаленных вдоль оси x от центра тяжести расчетного контура (левая и правая точка); y_{\min}, y_{\max} – точки, наиболее удаленные от центра тяжести вдоль оси y (верхняя и нижняя точки расчетного контура соответственно). Моменты сопротивления всегда положительны и измеряются в единицах [длина²].

Результаты

Пример вычисления геометрических характеристик контура по предложенной методике

Рассмотрим конкретный пример расчетного контура, приведенный на рис. 5.

Представленный на рис. 5 контур состоит из пяти элементов: четырех отрезков и одной дуги. Номера подписаны рядом с элементами. Вспомогательная сетка построена с шагом 1×1 дм в каждом направлении. Отметим здесь, что положение вспомогательных осей x_0 и y_0 , а также порядок точек в каждом из отрезков контура (начало – конец = конец – начало) могут быть произвольными. Для дуг значения начального и конечного углов должны быть в порядке возрастания. Данное правило можно нарушать, если применять в формуле вычисления длины окружности (23) абсолютное значение центрального угла $\alpha = |\alpha_b - \alpha_a|$.

Исходные данные и некоторые вспомогательные расчеты для всех элементов контура представлены с округлением в табл. 1.

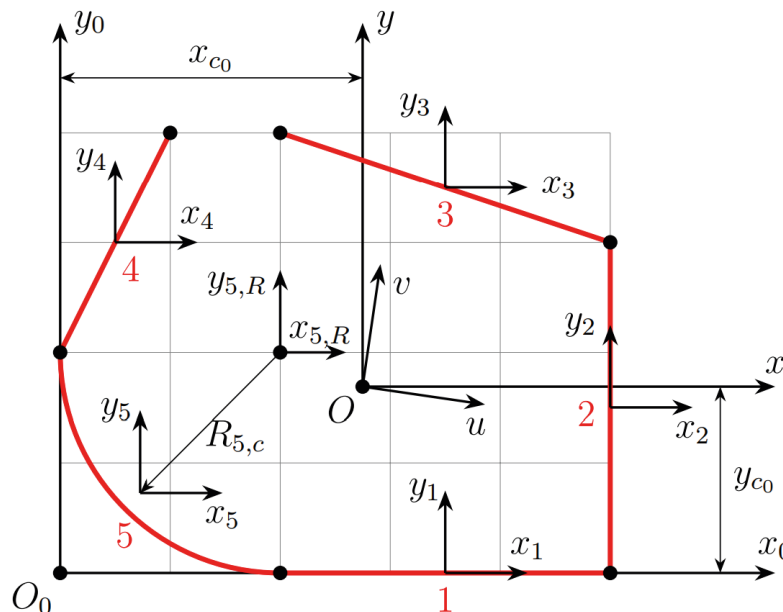


Рис. 5. Эскиз расчетного контура для примера
Fig. 5. Sketch of the calculation contour for an example

Таблица 1

Расчетные данные для примера

Table 1

Calculation data for the example

		1	2	3	4	5	Номер <i>i</i> элемента в контуре
1	x_{i,a_0}, x_{i,r_0}	2,0	5,0	5,0	0,0	2,0	Координаты начала отрезка или центр опорной окружности дуги
2	y_{i,a_0}, y_{i,r_0}	0,0	0,0	3,0	2,0	2,0	
3	$x_{i,b_0}, \alpha_{i,a}$	5,0	5,0	2,0	1,0	180,0	Координаты конца отрезка или углы начала и завершения дуги
4	$y_{i,b_0}, \alpha_{i,b}$	0,0	3,0	4,0	4,0	270,0	
5	R_i	–	–	–	–	2,0	Радиус опорной окружности дуги
6	L_i	3,0	3,0	3,16	2,24	3,14	Длина элемента. Формула (6) для отрезков и (23) для дуг
7	x_{i,c_0}	3,5	5,0	3,5	0,5	0,73	Координаты центра тяжести в направлении вспомогательных осей x_0 и y_0 . Формулы (8) для отрезков и (28) для дуг
8	y_{i,c_0}	0,0	1,5	3,5	3,0	0,73	
9	S_{i,x_0}	10,5	15,0	11,07	1,12	2,28	Статические моменты элемента <i>i</i> в направлении вспомогательных осей x_0 и y_0 по формулам (18)
10	S_{i,y_0}	0,0	4,5	11,07	6,71	2,28	
11	$I_{i,u}$	2,25	2,25	2,64	0,93	2,28	Моменты инерции элемента в направлении собственных главных центральных осей u_i и v_i . Формулы (12) для отрезков и (33) для дуг
12	$I_{i,v}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
13	$I_{i,x}$	2,25	0,0	2,37	0,19	1,19	Осевые и центробежный моменты инерции элемента <i>i</i> в направлении собственных осей x_i и y_i . Формулы (14) для отрезков и (35) для дуг
14	$I_{i,y}$	0,0	2,25	0,26	0,75	1,19	
15	$I_{i,x,y}$	0,0	0,0	-0,79	0,37	-1,09	
16	I_{i,x_0}	39,0	75,0	41,1	0,75	2,85	Осевые и центробежный моменты инерции элемента <i>i</i> в направлении вспомогательных осей x_0 и y_0 , вычисляемые согласно формулам (20)
17	I_{i,y_0}	0,0	9,0	39,0	20,87	2,85	
18	I_{i,x_0,y_0}	0,0	22,5	37,94	3,73	0,57	

Подобное табличное представление позволяет легко автоматизировать вычисление геометрических характеристик всего контура, без ограничения на число элементов, составляющих его, во многих программных комплексах, (например, в среде Excel, Smath Studio или Mathcad). Обратим внимание, что вводимыми (исходными) данными в табл. 1 являются только строки 1–5. Остальные величины вычисляются

на основе исходных данных по формулам, полученным ранее.

Суммарная длина контура, приведенного на рис. 5, определяется по формуле (36) с учетом данных 6-й строки табл. 1.

$$L = \sum_{i=1}^5 L_i = 3,0 + 3,0 + 3,16 + 2,24 + 3,14 = 14,54 \text{ дм.} \quad (44)$$

Вычислим суммарные статические моменты контура в направлении вспомогательных осей x_0 и y_0 . Для этого воспользуемся формулами (37) и данными из 9 и 10 строк табл. 1.

$$S_{x_0} = \sum_{i=1}^5 S_{i,x_0} = 10,5 + 15,0 + 11,07 + 1,12 + 2,28 = 39,97 \text{ дм}^2;$$

$$S_{y_0} = \sum_{i=1}^5 S_{i,y_0} = 0,0 + 4,5 + 11,07 + 6,71 + 2,28 = 24,56 \text{ дм}^2. \tag{45}$$

Подставляя (44) и (45) в формулы (38), определим положение центра тяжести всего контура:

$$x_{c_0} = \frac{S_{x_0}}{L} = \frac{39,97}{14,54} = 2,749 \text{ дм}; \quad y_{c_0} = \frac{S_{y_0}}{L} = \frac{24,56}{14,54} = 1,689 \text{ дм}. \tag{46}$$

Центральные оси x и y , с учетом полученных в (46) значений, приведены на рис. 5.

В расчетах нас в первую очередь интересуют геометрические характеристики в направлении центральных осей. Для вычисления осевых и центробежного моментов инерции всего контура в направлении центральных осей, в соответствии со вторым способом, представленным ранее, будем использовать формулы (21).

Центробежные и осевые моменты инерции контура в направлении вспомогательных осей x_0 и y_0 , согласно (39) и данным строк 16–18 табл. 1, составят:

$$\left. \begin{aligned} I_{x_0} &= \sum_{i=1}^5 I_{i,x_0} = 39,0 + 75,5 + 41,1 + 0,75 + 2,85 = 158,7 \text{ дм}^3; \\ I_{y_0} &= \sum_{i=1}^5 I_{i,y_0} = 0,0 + 9,0 + 39,0 + 20,87 + 2,85 = 71,72 \text{ дм}^3; \\ I_{x_0y_0} &= \sum_{i=1}^5 I_{i,x_0y_0} = 0,0 + 22,5 + 37,94 + 3,73 + 0,57 = 64,74 \text{ дм}^3. \end{aligned} \right\} \tag{47}$$

Подставляя (44), (46) и (47) в формулы (21), найдем осевые и центробежный моменты инерции в направлении центральных осей x и y :

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_{x_0} - Lx_{c_0}^2 = 158,7 - 14,54 \times 2,749^2 = 48,83 \text{ дм}^3; \\ I_y &= I_{y_0} - Ly_{c_0}^2 = 71,72 - 14,54 \times 1,689^2 = 30,24 \text{ дм}^3; \\ I_{xy} &= I_{x_0y_0} - Lx_{c_0}y_{c_0} = 64,74 - 14,54 \times 2,749 \times 1,689 = -2,77 \text{ дм}^3. \end{aligned} \right\} \tag{48}$$

По формулам (11) вычислим главные моменты инерции с учетом значений (48):

$$\left. \begin{aligned} I_u &= \frac{48,83 + 30,24}{2} + \sqrt{\left(\frac{48,83 - 30,24}{2}\right)^2 + (-2,77)^2} = 49,23; \\ I_v &= \frac{48,83 + 30,24}{2} - \sqrt{\left(\frac{48,83 - 30,24}{2}\right)^2 + (-2,77)^2} = 29,83. \end{aligned} \right\} \tag{49}$$

По результатам вычисления главных моментов инерции (49) найдем углы поворота главных осей по формулам (41):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_u &= \arctan\left(\frac{-2,77}{48,83 - 29,83}\right) = -8,3^\circ; \\ \alpha_v &= \arctan\left(\frac{-2,77}{48,83 - 49,23}\right) = 81,7^\circ. \end{aligned} \right\} \tag{50}$$

Главные центральные оси u и v представлены на рис. 5.

Выводы

В представленной статье на основе известных представлений о геометрических характеристиках поперечных сечений стержней, методом непосредственного интегрирования получены формулы, позволяющие рассчитывать аналогичные характеристики для линий и дуг как основных элементов различных вариантов расчетных контуров при продавливании. Предложенный подход позволил исключить неоднозначность в трактовке размерностей моментов инерции и моментов сопротивления. На основе аддитивных свойств интеграла полученные формулы обобщены на расчет произвольного контура, составленного из данных элементов.

С использованием предложенной координатной методики выполнен пример расчета несимметричного контура. Расчет может быть реализован в электронных таблицах. На основе предложенной методики планируется разработка алгоритма и программного модуля для автоматизации расчетов.

В статье показано, что у несимметричных контуров, помимо моментов инерции в направлении центральных осей, также возникает центробежный момент инерции. Согласно курсу сопротивления материалов, в подобных случаях в поперечном сечении стержня возникают дополнительные напряжения. Однако в нормативных документах отсутствуют рекомендации по их учету. В связи с этим критерии прочности при продавливании контуров при наличии сосредоточенных моментов (как внешних, так и вызванных внецентренным приложением сосредоточенной нагрузки) в направлениях, не совпадающих с направлениями главных осей, требуют уточнения. Полученные результаты могут служить основой для дополнения и уточнения формул в нормативных документах с учетом центробежного момента инерции несимметричных контуров.

Список литературы

1. Moe J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads. Bulletin (Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Development Department); D-47. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1961. P. 135.
2. Болгов А.Н., Сокуров А.З., Алексеенко Д.В. Продавливание промежуточных узлов сопряжения плита –

- колонна, усиленных клеенной поперечной арматурой // *Бетон и железобетон*. 2014. № 3. С. 10–13. EDN: UAIIPIH.
- Трекин Н.Н., Крылов В.В., Андриян К.Р. Совершенствование методики расчета плит на продавливание // *Железобетонные конструкции*. 2024. Т. 6. № 2. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2024.1.35-42>. EDN: DLDWEY.
 - Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкция опытных образцов // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 3. С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-3-47-53>.
 - Филатов В.Б. Силовое сопротивление железобетонных монолитных плит перекрытий при продавливании колоннами прямоугольного сечения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4–5. С. 1322–1324. EDN: QBPFST.
 - Fatma S., Ezz El-Din M., Ayman H.H.K. Non-linear finite element analysis for the behavior of punching shear in flat slabs with openings. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2020, vol. 11, no. 10, pp. 239–247. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351941392_Non-linear_Finite_Element_Analysis_for_the_Behavior_of_Punching_Shear_in_Flat_Slabs_with_Openings.
 - Eid H., Riad K.H., Zaher A.H. Punching shear strength of pre-stressed flat slab in case of near-column openings. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 32, no. 5, pp. 780–791. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.05.14532>.
 - EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
 - СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва, 2018.
 - Болгов А.Н., Сокуров А.З., Алексеенко Д.В. Продавливание крайних узлов сопряжения плита – колонна, усиленных клеенной поперечной арматурой // *Бетон и железобетон*. 2013. № 3. С. 11–13. EDN: WGDLYD.
 - Филатов В.Б. Совершенствование нормативной методики расчета на продавливание плоских железобетонных плит // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 5 (40). С. 80–84. EDN: RTGLDX.
 - Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. К построению общей методики расчета железобетонных плит на продавливание с учетом влияния моментов // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3–2. С. 86–91. EDN: OWCDIF.
 - Кремнев В.А., Кузнецов В.С., Талызова Ю.А. Расчет прочности на продавливание плиты безбалочного безкапитального перекрытия // *Вестник МГСУ*. 2014. № 10. С. 34–40. EDN: SWJDWZ.
- ### References
- Moe J. Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrated Loads. Bulletin (Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Development Department); D-47. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1961. P. 135.
 - Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Alekseenko D.V. Punching of intermediate plate–column interface nodes reinforced with glued transverse reinforcement. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 2014, no. 3, pp. 10–13. (In Russian). EDN: UAIIPIH.
 - Trekin N.N., Krylov V.V., Andrian K.R. Improvement of the method of calculating plates for punching. *Zhelezobetonnyye konstruksii = Reinforced concrete structures*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 35–42. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2024.1.35-42>. EDN: DLDWEY.
 - Krylov V.V., Sarkisov D. Yu., Ergeshov E.T., Evstafyeva E.B. Program of experimental studies of the load-bearing capacity of girderless plates for pushing under dynamic loading. Design of prototypes. *Construction Materials and Products*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 47–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-3-47-53>.
 - Filatov V.B. Power resistance of the ferroconcrete monolithic flat plates of floorings at punching by rectangular columns. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4–5, pp. 1322–1324. (In Russian). EDN: QBPFST.
 - Fatma S., Ezz El-Din M., Ayman H.H.K. Non-linear finite element analysis for the behavior of punching shear in flat slabs with openings. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2020, vol. 11, no. 10, pp. 239–247. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351941392_Non-linear_Finite_Element_Analysis_for_the_Behavior_of_Punching_Shear_in_Flat_Slabs_with_Openings.
 - Eid H., Riad K.H., Zaher A.H. Punching shear strength of pre-stressed flat slab in case of near-column openings. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 32, no. 5, pp. 780–791. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.05.14532>.
 - EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
 - SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow, 2018. (In Russian).
 - Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Alekseenko D.V. Punching of the extreme plate–column interface nodes reinforced with glued transverse reinforcement. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 2013, no. 3, pp. 11–13. (In Russian). EDN: WGDLYD.
 - Filatov V.B. Perfecting of code design procedure for punching of reinforced concrete flat plates. *Bulletin*

- of Civil Engineers*, 2013, no. 5 (40), pp. 80–84. (In Russian). EDN: RTGLDX.
12. Karpenko N.I., Karpenko S.N. On creation of general method of punching shear calculation of reinforced concrete slabs taking into account influence of moments. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 3–2, pp. 86–91. (In Russian). EDN: OWCDIF.
13. Kremnev V.A., Kuznetsov V.S., Talyzova Yu.A. Burst strength analysis for a plate of girderless capitelless floor. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 10, pp. 34–40. (In Russian). EDN: SWJDWZ.

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

Никита Юрьевич Цыбин, канд. техн. наук, доцент кафедры «Соппротивление материалов», НИУ МГСУ, Москва

e-mail: science@nikitatsybin.ru

Nikita Yu. Tsybin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: science@nikitatsybin.ru

УДК 624.012.45:004.946

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-42-49](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-42-49)

**Е.В. СУМАРОКОВ^{1,✉}, А.В. ОБРЯДИНА², Д.В. КУЗЕВАНОВ¹,
Е.В. ВОЛОХОВА¹**

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

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 2-я Красноармейская ул., д. 4., г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СРЕДЕ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

Введение. В современной практике возведения железобетонных конструкций традиционный измерительный контроль с использованием ручных инструментов и последующей отрисовкой схем в CAD-системах остается наиболее трудоемким этапом технического надзора. Дискретность таких измерений и отсутствие прямой связи с проектной цифровой средой затрудняют оперативную верификацию выполненных работ. Внедрение технологий информационного моделирования (BIM) открывает возможности для создания принципиально новых механизмов контроля качества, основанных на сплошном сканировании реальности.

Цель. Обоснование технологической эффективности и разработка методики автоматизированного сопоставления данных натурных измерений (облаков точек) с проектными BIM-моделями для повышения скорости формирования исполнительной документации.

Материалы и методы. Исследование базируется на использовании наземного лазерного сканирования (TLS) как инструмента фиксации фактической геометрии монолитных колонн (объект в Калининграде). Обработка данных проводилась в среде Revit. Для сопоставления «проект – факт» использован метод совмещения облака точек и информационной модели по единым базовым координатам. Математическая оценка точности полученного массива точек относительно контрольных замеров проводилась с использованием показателя среднеквадратического отклонения расстояний (DRMS).

Результаты. Доказана принципиальная возможность полной автоматизации процесса выявления геометрических отклонений железобетонных конструкций

в BIM-среде. Установлено, что автоматизированное сопоставление фактического облака точек с проектными элементами позволяет формировать исполнительные схемы значительно быстрее, чем при традиционном подходе. Сравнительный анализ показал кратное сокращение трудозатрат на камеральную обработку данных. Отмечено, что прямой перевод данных об отклонениях в расчетные комплексы (ПК Лири) позволяет оперативно выполнять поверочные расчеты несущей способности элементов, чьи параметры вышли за пределы нормативных допусков, что технически неосуществимо в рамках традиционного черчения в AutoCAD.

Выводы. Применение BIM-технологий в связке с лазерным сканированием позволяет перейти от выборочной ручной проверки к системному автоматизированному мониторингу качества железобетонных конструкций. Данный подход обеспечивает прозрачность приемки и актуализацию цифрового двойника здания, минимизируя временные потери на этапе строительного контроля.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, BIM-технологии, технический надзор, лазерное сканирование, исполнительная документация, контроль качества, облако точек, автоматизация строительства

Для цитирования: Сумароков Е.В., Обрядина А.В., Кузеванов Д.В., Волохова Е.В. Автоматизация контроля геометрических параметров железобетонных конструкций в среде информационного моделирования // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 42–49. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-42-49](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-42-49). EDN: RQMXTV.

Вклад авторов

Сумароков Е.В. – разработка общей концепции исследования, создание алгоритмов автоматизированного сопоставления данных, научное редактирование текста.

Обрядина А.В. – статистическая обработка данных натурных измерений в Калининграде, работа с информационными моделями, подготовка графических материалов.

Кузеванов Д.В. – научное руководство разделом расчетных методик, консультативная поддержка в области нелинейной деформационной модели для оценки несущей способности внецентренно сжатых железобетонных колонн, критический анализ результатов поверочных расчетов с учетом геометрических несовершенств, рецензирование методической части исследования.

Волохова Е.В. – техническая реализация и отладка алгоритмов автоматизированного сопоставления данных в среде Revit, участие в обработке и валидации массивов точек, подготовка дополнительных графических материалов для верификации результатов, тестирование гибридного алгоритма взаимодействия между BIM-моделью и расчетным комплексом ЛИРА-САПР.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.12.2025

Поступила после рецензирования 29.01.2026

Принята к публикации 05.02.2026

**E.V. SUMAROKOV^{1,✉}, A.V. OBRYADINA², D.V. KUZEVANOV¹,
E.V. VOLOKHOVA¹**

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

² St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), 2nd Krasnoarmeiskaya str., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation

AUTOMATION OF GEOMETRIC PARAMETERS CONTROL FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN BUILDING INFORMATION MODELING ENVIRONMENT

Abstract

Introduction. In current practice of reinforced concrete structures erection, traditional measurement control using manual tools followed by drafting schemes in CAD systems remains the most labor-intensive stage of technical supervision. The discreteness of such measurements and the lack of a direct link to the project digital environment complicate the rapid verification of completed work. The introduction of Building Information Modeling (BIM) technologies opens up opportunities for creating fundamentally new quality control mechanisms based on continuous reality scanning.

Aim. Substantiation of technological efficiency and development of a methodology for automated comparison of field measurement data (point clouds) with project BIM models to increase the speed of executive documentation formation.

Materials and methods. The study is based on the use of terrestrial laser scanning (TLS) as a tool for capturing the actual geometry of monolithic columns (a project in Kaliningrad). Data processing was carried out in the Revit environment. To compare “As-Built vs As-Designed” states, the method of aligning the point cloud and the information model using shared base coordinates was used. Mathematical estimation of the accuracy of the obtained point array relative to control measurements was carried out using the distance root mean squared (DRMS) indicator.

Results. The fundamental possibility of full automation of the process of identifying reinforced concrete structures geometric deviations in the BIM environment is proved. It has been established that automated comparison of the actual point cloud with project elements allows for the formation of executive schemes significantly faster than with the traditional approach. A comparative analysis showed

a multiple reduction in labor costs for cameral data processing. It is noted that the direct transfer of deviation data to calculation complexes (LIRA-CAD allows for rapid verification calculations of the bearing capacity of elements whose parameters have exceeded the standard tolerances, which is technically unfeasible within traditional drafting in AutoCAD.

Conclusions. The use of BIM technologies in conjunction with laser scanning allows moving from selective manual inspection to systematic automated monitoring of reinforced concrete structures quality. This approach ensures acceptance transparency and updating of the building's digital twin, minimizing time losses at the technical supervision stage.

Keywords: reinforced concrete structures, BIM technologies, technical supervision, terrestrial laser scanning, executive documentation, quality control, point cloud, construction automation

For citation: Sumarokov E.V., Obryadina A.V., Kuzevanov D.V., Volokhova E.V. Automation of geometric parameters control for reinforced concrete structures in building information modeling environment. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 42–49. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-42-49](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-42-49). EDN: RQMXTV.

Authors contribution statement

Sumarokov E.V. – development of the research concept, creation of automated data matching algorithms, scientific editing.

Obryadina A.V. – statistical processing of field measurement data in Kaliningrad, work with information models, preparation of graphics.

Kuzevanov D.V. – scientific management of the calculation methodology section, advisory support in the field of nonlinear deformation model for assessing the bearing capacity of non-centrally compressed reinforced concrete columns, critical analysis of the results of verification calculations taking into account geometric imperfections, review of the methodological part of the study.

Volokhova E.V. – technical implementation and debugging of algorithms for automated data matching in the Revit environment, participation in the processing and validation of arrays of points, preparation of additional graphic materials for the results verification, testing of a hybrid algorithm for interaction between the BIM model and the LIRA-CAD calculation complex.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.12.2025

Revised 29.01.2026

Accepted 05.02.2026

Введение

В современной практике возведения монолитных каркасных зданий обеспечение проектных показателей надежности напрямую зависит от точности соблюдения геометрических параметров несущих элементов. Традиционные методы технического надзора, основанные на выборочных измерениях ручными инструментами, характеризуются высокой трудоемкостью и дискретностью данных, что зачастую не позволяет своевременно выявить отклонения, превышающие нормативные допуски. Современные подходы к контролю качества железобетонных конструкций охватывают как геометрический мониторинг несущих элементов [1–4], так и дефектоскопию (обнаружение трещин и поверхностных повреждений на основе облаков точек и изображений [5, 6]). Несоответствие фактического положения конструкций проектному (концепция “As-Built vs As-Designed”) может приводить к возникновению нерасчетных эксцентриситетов, снижающих несущую способность колонн и пилонов.

Внедрение технологий информационного моделирования (BIM) в соответствии с требованиями Постановления Правительства РФ № 331 [7] открывает новые возможности для автоматизации контроля качества. Интеграция данных наземного лазерного сканирования (TLS) в среду общих данных (CDE) позволяет перейти от точечного контроля к сплошному мониторингу всей геометрии возводимого каркаса. Однако, несмотря на наличие нормативной базы (ГОСТ Р 58944-2020 [8]), механизмы оперативной передачи фактических данных со строительной площадки в расчетные модели для оценки влияния дефектов на эксплуатационную пригодность фундаментов и надземных конструкций остаются недостаточно проработанными.

В настоящей статье рассматривается методика автоматизированного сопоставления облаков точек с проектными BIM-моделями на примере объекта

в Калининграде. Особое внимание уделено технологическому преимуществу использования единой координатной базы и сокращению временных затрат на проведение поверочных расчетов в ПК ЛИРА-САПР при обнаружении сверхнормативных отклонений.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились в условиях реального строительного производства на объекте в Калининграде. Объектом контроля выступали монолитные железобетонные колонны регулярного прямоугольного сечения. Для получения высокоточных пространственных данных о фактической геометрии конструкций (“As-Built”) применялась технология наземного лазерного сканирования (TLS) с использованием прибора Trimble RX 10 [1, 2, 4].

Процесс камеральной обработки базировался на интеграции облаков точек в среду информационного моделирования Revit. Совмещение (регистрация) данных сканирования с проектной BIM-моделью (“As-Designed”) выполнялось по единым базовым координатам, жестко зафиксированным в обоих файлах, что обеспечило однозначную планово-высотную привязку рис. 1.

Для извлечения данных о конкретных колоннах из общего массива облака точек применялся метод «области интереса» (Region of Interest). Вокруг каждой проектной колонны в цифровой среде задавалась расширенная габаритная рамка (bounding box), в пределах которой производилась автоматизированная обрезка массива точек фактической поверхности. Поскольку проектные и фактические координаты элементов в единой системе сопоставимы, данный подход позволил мгновенно локализовать фрагменты облака, относящиеся к конкретному элементу, минуя стадию предварительной семантической сегментации и классификации всего массива данных [3].

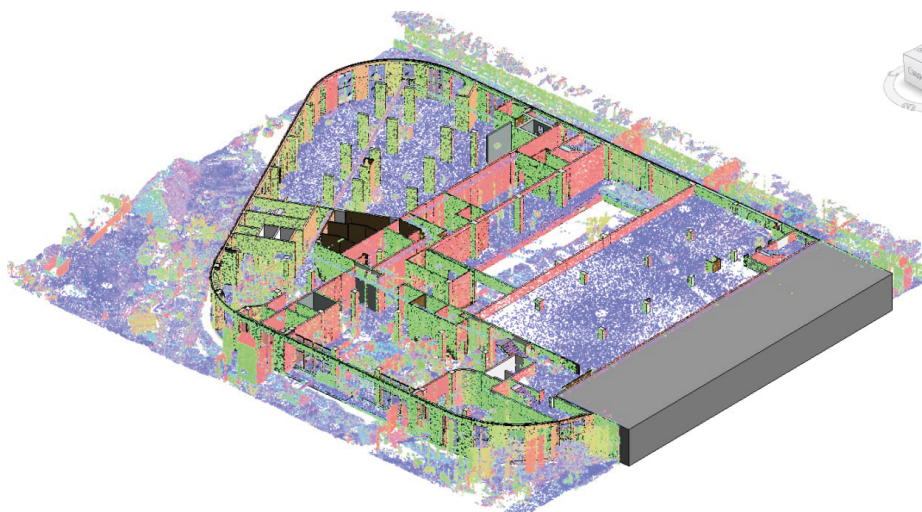


Рис. 1. Пример полученного облака точек с совмещенной BIM-моделью
Fig. 1. Example of point cloud combined with BIM model

Оценка влияния выявленных геометрических несовершенств на несущую способность железобетонных конструкций реализовывалась через гибридный алгоритм взаимодействия информационных и расчетных систем. Вместо прямой корректировки конечно-элементной (КЭ) схемы в расчетном комплексе была внедрена методика трансляции данных в атрибутивную среду BIM-модели. Усилия, возникающие в колоннах (продольные силы N и изгибающие моменты M), экспортировались из ЛИРА-САПР и в автоматизированном режиме записывались в свойства соответствующих элементов в Revit (рис. 2). Сопоставление элементов расчетной модели и информационной модели Revit осуществлялось по пространственному положению стержней и их координатам в нижнем и верхнем сечениях [9].

Финальная верификация несущей способности выполнялась с помощью разработанного алгоритма на языке Python. Расчет базировался на положениях нелинейной деформационной модели (НДМ) согласно СП 63.13330.2018 [10]. Алгоритм позволил проводить анализ сечения колонны с учетом фактических эксцентриситетов, вызванных зафиксированными отклонениями осей. Такой подход обеспечивает оперативную проверку конструктивной безопасности без необходимости трудоемкой ручной корректировки КЭ-моделей, сократив время анализа выборки конструкций в несколько раз по сравнению с традиционными методами (рис. 3).

Результаты и обсуждение

В рамках поверочного расчета был проведен детальный анализ 33 железобетонных колонн, имеющих

геометрические отклонения от проектного положения. Данные конструкции были проверены на несущую способность с учетом фактических эксцентриситетов, выявленных в ходе исполнительной съемки. Результаты обработки данных указаны в табл. 1.

Геометрические отклонения. Для ряда колонн зафиксированы значительные значения несоосности (смещения осей), превышающие стандартный допуск СП 70.13330.2012 [11] (15 мм). Максимальное зафиксированное отклонение (несоосность по оси Y) составляет 40 мм (колонна № 31, марка 8/Г). Также значительные отклонения наблюдаются у колонны № 11 (маркер 6/1) – 34,5 мм по оси X .

Использование несущей способности (N/N_{ult}). Несмотря на существенные геометрические отклонения, поверочный расчет подтверждает эксплуатационную надежность всех рассмотренных элементов. Коэффициент использования несущей способности N/N_{ult} варьируется в диапазоне от **0,05** (колонна № 28) до **0,56** (колонна № 11).

Запас прочности. Максимальная загруженность сечения составляет 56 %, что свидетельствует о наличии почти двукратного запаса прочности даже с учетом возникших при монтаже эксцентриситетов и дополнительных моментов (M_1, M_2).

Таким образом, результаты поверочного расчета подтверждают, что фактические отклонения, отраженные в табл. 1, не являются критическими для механической безопасности здания при текущих нагрузках.

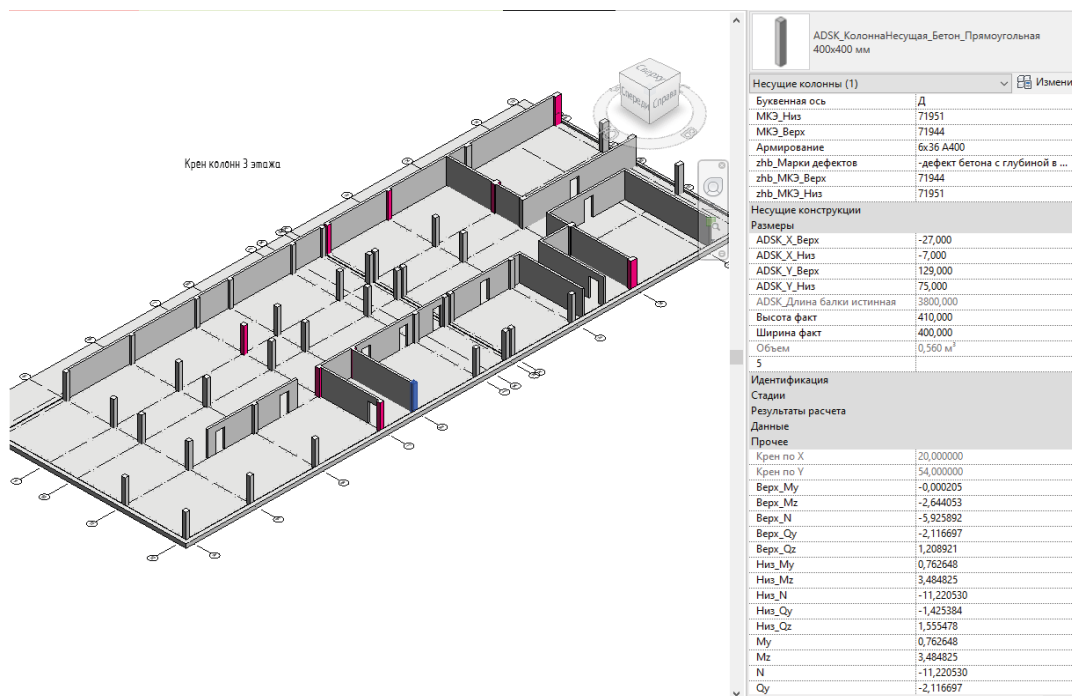


Рис. 2. Пример заполнения свойств отклонений и усилий в колонне
 Fig. 2. Example of deviation and force property filling in column

Таблица 1

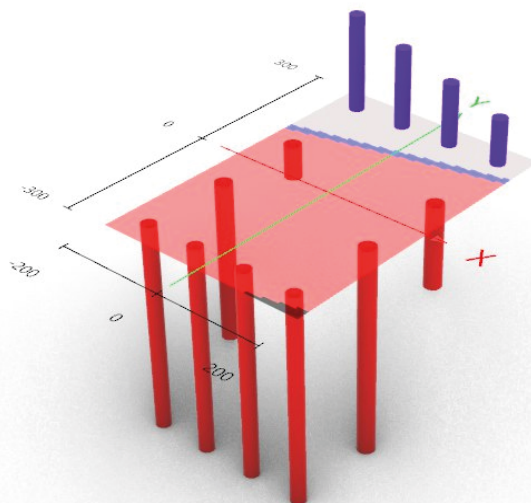
Table 1

Результаты обработки данных по колоннам

Processing results for column data

№ п/п	Базовый уровень	Марка колонны	Маркер расположения колонны	Длина колонны, мм	Сечение, мм		Армирование	Отклонения				Экцентриситет, обусловленный отклонениями		Доп. момент		Условия из стат. расчета (кН, кН × м)			N _{нтр} , кН	N/N _{нтр}			
					ширина сечения (А, мм)	высота сечения (В, мм)		наклон оси по Х	наклон оси по Y	несоосность X	несоосность Y	е1, мм	е2, мм	M _{1,доп} , кН × м	M _{2,доп} , кН × м	N, кН	M ₁ , кН × м	M ₂ , кН × м					
1	-0,940	K1-1	1/И	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-5,50	-6,00	-11,00	-18,50	16,50	24,50	6,89	10,23	-417,61	5,32	23,74	-417,61	15,55	30,63	2453	0,17
2	-0,940	K1-1	3/И	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-0,50	-9,00	-18,50	-14,00	19,00	23,00	8,71	10,54	-458,22	-0,33	20,25	-458,22	10,86	28,96	2310	0,20
3	-0,940	K1-1	4/И	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-7,00	-6,00	-19,50	-1,00	26,50	7,00	9,35	2,47	-352,98	-4,02	24,32	-352,98	6,49	33,67	2154	0,16
4	-0,940	K1-1	1/Ж	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-7,00	-3,00	-14,00	-17,00	21,00	20,00	8,06	7,68	-383,90	13,39	25,55	-383,90	21,07	33,61	2460	0,16
6	-0,940	K1-1	3/Ж	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-5,50	-10,00	-16,00	-8,00	21,50	18,00	7,92	6,63	-368,29	3,24	21,46	-368,29	9,87	29,38	1779	0,21
7	-0,940	K1-1	7/Ж	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	1,50	-0,50	-10,50	-15,50	9,00	16,00	5,98	10,63	-664,09	32,34	77,61	-664,09	42,97	83,58	1932	0,34
8	-0,940	K1-1	8/Ж	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-2,00	7,00	-17,00	-19,00	19,00	12,00	11,81	7,46	-621,64	-4,35	70,71	-621,64	11,81	82,52	2687	0,23
9	-0,940	K1-1	1/Е	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-3,00	-8,50	-16,50	-15,50	19,50	24,00	11,27	13,87	-578,09	16,45	13,05	-578,09	30,32	24,32	3220	0,18
10	-0,940	K1-1	4/Д	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-6,50	-3,50	-17,00	-12,00	23,50	15,50	21,57	14,23	-917,98	8,05	-8,98	-917,98	22,27	30,55	2298	0,40
11	-0,940	K1-1	6/Г	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-11,50	16,00	-2,00	-34,50	13,50	18,50	8,61	11,80	-637,96	47,49	8,40	-637,96	59,29	17,02	1144	0,56
12	-0,940	K1-2	6/В	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-4,00	1,00	-10,00	-17,00	14,00	16,00	4,08	4,66	-291,41	60,00	-32,05	-291,41	64,66	36,13	1207	0,24
13	-0,940	K1-2	2/Б	4910	400	400	6032+2032 (A500CE)	-7,50	8,00	-4,00	-17,00	11,50	9,00	3,67	2,88	-319,50	0,94	21,34	-319,50	3,82	25,01	2631	0,12
14	-0,940	K1-2	4/Б	4960	400	400	4022 (A500CE)	-0,50	15,00	-3,00	-19,00	3,50	4,00	0,95	1,09	-272,15	8,06	15,45	-272,15	9,14	16,40	1612	0,17
15	-0,940	K1-2	5/Б	4960	400	400	4022 (A500CE)	-6,50	13,00	-1,00	-19,50	7,50	6,50	2,06	1,79	-274,84	17,82	9,88	-274,84	19,61	11,95	1456	0,19
16	-0,940	K1-2	2/А	4960	400	400	4022 (A500CE)	10,00	16,50	-10,50	-23,00	0,50	20,00	0,14	1,86	-285,54	-0,93	-27,14	-285,54	2,79	27,29	1326	0,22
17	-0,940	K1-2	6/А	4960	400	400	4022 (A500CE)	-2,50	7,00	3,00	-27,00	0,50	20,00	-0,13	5,38	-269,01	17,85	-35,27	-269,01	23,23	35,40	930	0,29
18	+4,420	K2-1	4/Ж	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	-5,00	-15,00	-6,00	2,00	11,00	13,00	1,97	2,33	-179,13	-4,53	17,29	-179,13	6,86	19,26	1586	0,11
19	+4,420	K2-1	7/Ж	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	3,50	5,00	-15,50	-0,50	12,00	4,50	3,03	-1,14	-252,23	28,01	64,10	-252,23	29,15	67,13	1119	0,23
20	+4,420	K2-1	8/Ж	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	-3,50	21,00	-15,00	-16,50	18,50	4,50	4,37	-1,06	-236,31	-32,98	46,97	-236,31	34,05	51,34	1181	0,20
21	+4,420	K2-1	1/Е	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	1,00	-14,50	-18,00	-13,00	17,00	27,50	4,28	6,92	-251,70	94,88	40,63	-251,70	101,80	44,91	748	0,34
22	+4,420	K2-1	2/Е	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	3,50	3,50	-2,50	-16,00	1,50	12,50	0,48	4,03	-322,52	-36,23	76,82	-322,52	40,26	77,31	1165	0,28
23	+4,420	K2-1	8/Е	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	8,00	-9,00	-24,00	-5,00	16,00	14,00	5,23	4,57	-326,69	-23,83	30,48	-326,69	28,40	35,70	1906	0,17
24	+4,420	K2-1	9/Е	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	4,50	-2,00	-19,50	-6,50	15,00	8,50	4,40	2,49	-293,10	0,56	90,74	-293,10	3,05	95,14	1131	0,26
25	+4,420	K2-1	10/Е	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	8,00	6,00	-20,00	-4,00	12,00	2,00	3,01	-0,50	-251,12	-116,02	55,80	-251,12	116,52	58,82	629	0,40
26	+4,420	K2-1	7/Д	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	0,50	-1,50	-6,00	14,00	5,50	12,50	2,80	-6,36	-508,54	10,48	-27,17	-508,54	16,84	29,97	2894	0,18
27	+4,420	K2-1	8/Д	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	-1,00	-6,00	-16,00	8,00	17,00	2,00	8,63	-1,01	-507,47	-27,86	-31,48	-507,47	28,87	40,11	2402	0,21
28	+4,420	K2-1	9/Д	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	-7,00	-1,50	-16,00	-8,00	23,00	9,50	10,26	4,24	-446,04	47,14	-32,74	-446,04	51,38	43,00	1801	0,25
29	+4,420	K2-1	10/Д	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	3,00	9,00	-17,00	-22,00	14,00	13,00	4,86	4,51	-347,09	-157,81	-32,55	-347,09	162,32	37,41	745	0,47
30	+4,420	K2-1	4/Г	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	1,00	-11,00	-3,00	6,00	2,00	5,00	0,47	1,18	-235,69	2,62	-38,33	-235,69	3,80	38,80	1842	0,13
31	+4,420	K2-1	8/Г	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	-1,00	4,00	-39,00	-4,50	40,00	0,50	12,91	0,16	-322,70	-25,12	-73,29	-322,70	25,28	86,20	1196	0,27
32	+4,420	K2-1	9/Г	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	5,50	3,00	-13,00	-12,00	7,50	9,00	2,33	2,79	-310,07	0,52	-49,05	-310,07	3,32	51,37	1837	0,17
33	+4,420	K2-1	10/Г	3200	400	400	6032+2032 (A500CE)	6,00	-5,00	-23,00	-24,00	17,00	29,00	3,57	6,09	-210,03	-124,80	-22,94	-210,03	130,89	26,51	576	0,36

Исходные данные:
 Колонна сечением 400×600 мм высотой 4000 мм из бетона класса В25
 Армирование: 6Ø32+2Ø32 (А500СЕ) - 81,43 см²
 Внешние усилия: N = -5000 кН, M1 = 0 кН×м, M2 = 800 кН×м



Результаты:
 $\epsilon_{b,max} = -0.00366$; $\epsilon_{s,max} = 0.00091$
 $\epsilon_{b,ult} = -0.00350$; $\epsilon_{s,ult} = 0.02500$
 Условие обеспечения несущей способности при расчёте по НДМ (п.8.1.24 СП 63.133330.2018) не выполнено

Рис. 3. Пример полученного автоматическим способом результата расчета по НДМ
Fig. 3. Example of automated calculation result according to FEM (finite element method)

Обработка результатов свидетельствует о наличии практически двукратного запаса прочности, что позволяет признать выявленные отклонения допустимыми для безопасной эксплуатации объекта при текущих нагрузках. Возможность оперативного получения таких данных в среде BIM реализует принцип адаптивного строительного контроля: вместо формального следования допускам система позволяет оценивать реальные резервы надежности каждой конструкции в режиме реального времени.

Особого внимания заслуживает сопоставление трудозатрат. Весь процесс интеграции усилий из расчетного комплекса в BIM-модель и последующий анализ 33 колонн по алгоритму НДМ занял около 10 минут. В условиях использования традиционного инструментария (черчение в AutoCAD и ручной пересчет каждого сечения) аналогичный объем аналитической работы потребовал бы до 3 рабочих дней у квалифицированного специалиста. Столь значительное (в 12 раз) сокращение камерального цикла доказывает высокую технологическую эффективность предложенного подхода.

Выводы

Проведенное исследование и его практическая реализация на объекте в Калининграде позволяют сделать следующие выводы:

1. Внедрение технологий наземного лазерного сканирования в сочетании с информационным моделированием обеспечивает переход от выборочного и дискретного контроля к сплошному мониторингу

фактической геометрии ЖБК. Это позволяет формировать достоверные цифровые двойники объектов на этапе возведения ("As-Built").

2. Разработанный метод извлечения «области интереса» доказал свою эффективность для автоматизации обработки облаков точек. Прямое сопоставление координат проектной модели и данных сканирования исключает ошибки ручного позиционирования и накопление итерационных погрешностей.

3. Гибридный алгоритм взаимодействия расчетных систем и BIM-среды через атрибутивное наполнение моделей позволяет проводить оперативную верификацию несущей способности конструкций. Наличие актуальных данных об усилиях (N, M) и фактических эксцентриситетах в свойствах элементов Revit дает возможность использовать методы нелинейного анализа для подтверждения эксплуатационной надежности конструкций даже при превышении нормативных допусков СП 70.13330.2012 [11].

4. Технологическое преимущество автоматизированного подхода выражается в кратном (до 12 раз) снижении трудозатрат на формирование исполнительной документации и проведение поверочных расчетов. Это минимизирует простои на строительной площадке и позволяет избежать необоснованных затрат на исправление дефектов, не влияющих на общую безопасность здания.

5. Предложенная методика соответствует целям цифровой трансформации строительной отрасли РФ и может быть интегрирована в регламенты технического надзора для объектов повышенного

уровня ответственности, обеспечивая прозрачность и объективность процедур приемки железобетонных конструкций.

Список литературы / References

1. Maalek R., Lichti D.D., Ruwanpura J.Y. Automatic Recognition of Common Structural Elements from Point Clouds for Automated Progress Monitoring and Dimensional Quality Control in Reinforced Concrete Construction. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 9, art. 1102. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11091102>.
2. Shu J., Li W., Zhang C., et al. Point cloud-based dimensional quality assessment of precast concrete components using deep learning. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 70, no. 1, art. 106391. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106391>.
3. Wang R., Zhang J., Qiu H., Sun J. Intelligent Inspection Method for Rebar Installation Quality of Reinforced Concrete Slab Based on Point Cloud Processing and Semantic Segmentation. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 11, art. 3693. <https://doi.org/10.3390/buildings14113693>.
4. Liu Z., Liu Z., Sun Z. Massive Point Cloud Processing for Efficient Construction Quality Inspection and Control. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 21, art. 6806. <https://doi.org/10.3390/s24216806>.
5. Choi Y., Park H.W., Mi Y., Song S. Crack Detection and Analysis of Concrete Structures Based on Neural Network and Clustering. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 6, art. 1725. <https://doi.org/10.3390/s24061725>.
6. Chen X., Li J., Huang S., et al. An Automatic Concrete Crack-Detection Method Fusing Point Clouds and Images Based on Improved Otsu's Algorithm. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 5, art. 1581. <https://doi.org/10.3390/s21051581>.
7. Постановление Правительства РФ от 05 марта 2021 г. № 331. Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства // *Собрание законодательства РФ*. 2021. № 11. Ст. 1433. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/133174/>.
8. ГОСТ Р 58944-2020. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Функциональные допуски. Москва: Стандартинформ, 2020.
8. State Standard R 58944-2020. System of ensuring geometrical parameters accuracy in construction. Functional tolerances. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
9. Кузеванов Д.В. Надежность внецентренно сжатых железобетонных элементов при расчете по прочности нормальных сечений [автореф. диссертации]. Москва, 2012.
9. Kuzevanov, D.V. Reliability of out-of-center compressed reinforced concrete elements instrength calculation of normal sections [abstract of dissertation]. Moscow, 2012. (In Russian).
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Минстрой России, 2018.
10. 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, 2018. (In Russian).
11. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. Москва: Минстрой России, 2012.
11. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87. Moscow: The Ministry of Construction of Russia, 2012. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Владимирович Сумароков✉, начальник отдела информационных технологий, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sumarokov.evgeni@yandex.ru

Evgeny V. Sumarokov✉, Head of the Information Technology Department, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sumarokov.evgeni@yandex.ru

Анастасия Владимировна Обрядина, магистр, СПбГАСУ, Санкт-Петербург
e-mail: nusha-pusha@yandex.ru

Anastasia V. Obryadina, master, SPbGASU, St. Petersburg
e-mail: nusha-pusha@yandex.ru

Дмитрий Владимирович Кузеванов, канд. техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry V. Kuzevanov, Cand. Sci. (Engineering), Director, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Елизавета Вячеславовна Волохова, заместитель начальника отдела информационных технологий, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Elizabeth V. Volokhova, Deputy Head of the Information Technology Department, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.53

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61)**Д.К.-С. БАТАЕВ, Р.С. ДЖАМБУЛАТОВ[✉]**

ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, ул. Вахи Алиева, д. 21а, г. Грозный, 364020, Российская Федерация

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ДОБАВОК ДЛЯ РЕМОНТНЫХ И РЕСТАВРАЦИОННЫХ СОСТАВОВ

Аннотация

Введение. В работе представлены результаты исследования гранулометрического состава и удельной поверхности природных и техногенных материалов, применяемых в качестве компонентов ремонтно-реставрационных составов для восстановления памятников архитектуры и истории Юга России.

Цель. Изучение дисперсности и распределения частиц восьми типов минеральных материалов из местного сырья (доломита, известняка, мергеля, сланца, гипса, ангидрита, бентонита и цемянки) с целью дальнейшего изучения влияния гранулометрических показателей на реакционную способность, гидратацию и формирование микроструктуры вяжущих систем.

Материалы и методы. На основе седиментационного анализа водных суспензий перечисленных минералов по закону Стокса определены диапазоны размеров частиц и рассчитаны значения удельной поверхности.

Результаты. Установлено, что ангидрит и доломит характеризуются наибольшей дисперсностью (средний размер 14–15 мкм), обеспечивающей высокую реакционную активность и плотную микроструктуру, в то время как гипс и бентонит обладают более крупными частицами (17–25 мкм), влияющими на водопотребность смесей. Наибольшая удельная поверхность отмечена у гипса (153,1 м²/кг), а минимальная – у бентонита (86,7 м²/кг).

Выводы. Полученные данные, опираясь на теоретическую основу материаловедения (предоставляет понимание связи между структурой, составом, технологией получения и эксплуатационными свойствами материалов) и коллоидной химии (поведение дисперсных систем, включая процессы на границе раздела фаз – адгезия, капиллярные явления), позволяют обосновать рекомендации по целенаправленному подбору компонентов ремонтно-реставрационных составов для обеспечения требуемого баланса между прочностью, адгезией, водопоглощением и совместимостью с оригинальными материалами памятников

и формируют научно-практическую основу для создания аутентичных, экономичных и экологических составов на основе местного минерального сырья.

Ключевые слова: гранулометрический состав, удельная поверхность, ремонтно-реставрационные составы, природные минеральные материалы, дисперсность, микроструктура вяжущих, адгезия, памятники истории и культуры

Для цитирования: Батаев Д.К.-С., Джамбулатов Р.С. Гранулометрический состав и удельная поверхность наполнителей и добавок для ремонтных и реставрационных составов // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 50–61. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61). EDN: OYQTHI.

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

В рамках выполнения государственного задания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.10.2025

Поступила после рецензирования 18.12.2025

Принята к публикации 25.12.2025

D.K.–S. BATAYEV, R.S. DZHAMBULATOV✉

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Vahi Aliyev Street, 21a, Grozny, 364020, Russian Federation

GRANULOMETRIC DISPOSITION AND SPECIFIC SURFACE AREA OF FILLERS AND ADDITIVES FOR REPAIR AND RESTORATION COMPOUNDS

Abstract

Introduction. This paper presents the results of a study of the particle size distribution and specific surface area of natural and manmade materials used as components of repair and restoration mortars for architectural and historical monuments in southern Russia.

The aim of the study was to investigate the particle size distribution of eight types of locally sourced mineral materials (dolomite, limestone, marl, shale, gypsum, anhydrite, bentonite, crushed burnt brick) to further elucidate the influence of particle size distribution on the reactivity, hydration, and microstructure of binder systems.

Materials and methods. Based on sedimentation analysis of aqueous suspensions of these minerals using Stokes' law, particle size ranges were determined and specific surface areas were calculated.

Results. It was found that anhydrite and dolomite are characterized by the highest dispersion (average size 14–15 μm), ensuring high reactivity and a dense microstructure, while gypsum and bentonite have larger particles (17–25 μm), affecting the water demand of the mixtures. Gypsum has the highest specific surface area (153.1 m^2/kg), while bentonite has the lowest (86.7 m^2/kg).

Conclusions. The obtained data, based on the theoretical basis of materials science (provides an understanding of the relationship between the structure, composition, production technology and operational properties of materials) and colloidal chemistry (the behavior of dispersed systems, including processes at the phase boundary – adhesion, capillary phenomena), make it possible to substantiate recommendations for the targeted selection of components of repair and restoration compositions to ensure the required balance between strength, adhesion, water absorption and compatibility with the original materials of monuments and form a scientific and practical basis for the creation of authentic, economical and environmentally friendly compositions based on local mineral raw materials.

Keywords: granulometric composition, specific surface area, repair and restoration compositions, natural mineral materials, dispersion, microstructure of binders, adhesion, historical and cultural monuments

For citation: Batayev D.K.–S., Dzhambulatov R.S. Granulometric disposition and specific surface area of fillers and additives for repair and restoration compounds. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 50–61. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-50-61](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-50-61). EDN: OYQTHI.

Authors contribution statement

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

Funding

Within the framework of fulfilling the state assignment.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.10.2025

Revised 18.12.2025

Accepted 25.12.2025

Введение

Юг России славится множеством памятников истории и культуры [1]. Задача их реставрации, а также поддержания в функциональном состоянии является приоритетной для государства. В этой связи особое внимание уделяется поиску новых и совершенствованию существующих технологий для разработки качественных и экономичных ремонтно-реставрационных составов (PPC) на основе местного сырья [2, 3].

Природные материалы, такие как гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), известняк (CaSO_4), мергель (смесь карбонатов и глин), сланец (богатый силикатами), ангидрит (CaSO_4), доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) и бентонит (монтмориллонитовая глина), использовавшиеся в строительстве древних памятников, имеют различные минералогические характеристики и текстурную неоднородность. Это сильно влияет на их поведение при дроблении и диспергировании. Например, пластинчатая морфология бентонита контрастирует с равноосными кристаллами гипса, что приводит к различным профилям распределения частиц и может оказать влияние на использование этих материалов в процессах формирования структуры, набора прочности и т. д. [4]. Аномалии в распределении частиц, такие как избыток мелких фракций или крупнозернистые хвосты, могут ухудшить гидравлические свойства, увеличить энергозатраты на измельчение и способствовать пылеобразованию [5].

Тем не менее работы, посвященные использованию природных материалов Юга России для создания аутентичных составов для ремонта и реставрации памятников истории и культуры, не отвечают потребностям в подобных исследованиях несмотря на актуальность.

Учитывая важность учета удельной поверхности частиц в процессах массопереноса и формирования физико-механических свойств, предпринята попытка комплексного изучения межфазных свойств компонентов PPC. Первым этапом исследования стало изучение гранулометрического состава уникальных природных материалов для создания реставрационных составов. Основной целью исследования является создание экспериментально-теоретической базы для разработки и тестирования новых аутентичных PPC, предназначенных для реконструкции памятников на Юге России.

Известно, что минералогический состав природных материалов зависит от условий их формирования, таких как тектоническая активность, химический состав материнской породы, гидрологические и климатические условия. Это подчеркивает актуальность изучения влияния этих факторов на физико-химические свойства материалов для их использования в качестве составных частей PPC. Без комплексного исследования минералогического состава, гранулометрии и межфазных процессов невозможно избежать рисков, связанных с образованием трещин,

отслоением или изменением цвета поверхностей вследствие различий в коэффициентах теплового расширения и влагопоглощения [6].

Эффективность этих материалов как составных частей PPC зависит и от их степени дисперсности, выраженной в размере частиц и удельной поверхности. Все указанные факторы подчеркивают необходимость научно обоснованного подхода к каждому компоненту в составе моделируемого PPC, учитывающего его состав и размерные характеристики для достижения оптимальных характеристик [7].

Таким образом, цель исследования – изучение удельной поверхности и распределения частиц в водных суспензиях восьми типов природных и искусственных материалов с использованием метода количественной оценки объемных фракций в диапазоне от субмикронного до миллиметрового масштаба. Установленные закономерности между гранулометрическим составом, удельной поверхностью и реакционной способностью минеральных компонентов позволят целенаправленно подбирать и сочетать материалы для достижения оптимальных технологических и эксплуатационных свойств PPC: скорость твердения, адгезия, водопотребность, устойчивость к усадке и т. д. [6–8].

Основной раздел

Известно, что дисперсность порошков напрямую влияет на их реакционную способность, поскольку уменьшение размера частиц приводит к увеличению числа активных центров на границе раздела фаз, что ускоряет многие физико-химические процессы в системе [8, 9]. Например, частицы известняка размером менее 5 мкм демонстрируют более высокую скорость растворения в кислых средах или при взаимодействии с гидроксидом кальция по сравнению с частицами размером 50 мкм, что объясняется увеличением числа доступных поверхностных молекул, участвующих в реакциях [9–12].

Кинетика реакций описывается уравнением:

$$R = kSC,$$

где R – скорость реакции;

k – константа скорости;

S – удельная поверхность;

C – концентрация частиц твердой фазы, соответственно уменьшение размера частиц увеличивает S и R .

Поэтому удельная поверхность частиц как мера дисперсности является определяющим фактором их реакционной способности. Повышение удельной поверхности усиливает адсорбционные свойства материала, способствуя более интенсивному взаимодействию с вяжущими компонентами, что приводит к ускорению процессов гидратации и карбонизации, особенно важных для реставрационных составов, где

требуется высокая совместимость с историческими материалами. Для доломита и мергеля наблюдается аналогичная зависимость, однако их реакционная способность может быть ниже из-за присутствия магния или глинистых примесей, которые замедляют кинетику реакций [13, 14].

В перечень исследуемых объектов входят:

1. Доломит (карбонатная порода, состоящая преимущественно из минерала доломита – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) применяется как наполнитель и вяжущий в составах для фасадов и штукатурок благодаря своей химической стабильности и низкой растворимости в воде. Материал добыт из карьера Галанчожского района Чеченской Республики (содержание доломита > 70 %).

2. Известняк (осадочная порода, в основном кальцит – CaCO_3) служит основой для воздушных известей и используется в смесях для обеспечения паропроницаемости и совместимости с каменными субстратами. Образец взят из месторождений Чирри-Юртовского цементного завода, где известняк обладает мелкозернистой структурой, подходящей для измельчения.

3. Мергель (смесь глины и карбонатов, промежуточный материал между известняком и глиной) является естественным гидравлическим вяжущим, обжигаемым для получения цемента. Материал получен из осадочных отложений месторождений Чирри-Юртовского цементного завода.

4. Сланец (метаморфическая порода с преобладанием слюды и кварца) используется как минеральный наполнитель в составах для повышения прочности и устойчивости к эрозии. Образец из сланцевых формаций Галанчожского района Чеченской Республики (ЧР), характеризующихся слоистой текстурой, что облегчает измельчение.

5. Природный гипс (сульфат кальция дигидрат – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) применяется в быстротвердею-

щих составах для внутренних работ благодаря своей низкой растворимости и высокой белизне. Материал добыт из месторождений ЧР в окрестностях селения Чинаха ЧР.

6. Ангидрит (безводный сульфат кальция – CaSO_4) служит вяжущим в составах для влажных сред, обладая более высокой прочностью по сравнению с гипсом. Образец отобран из ангидритовых залежей гипсового месторождения, расположенного в окрестностях села Шарой (ЧР).

7. Бентонит (глинистый минерал на основе монтмориллонита) используется как пластификатор и стабилизатор суспензий в строительных смесях. Образец получен из месторождения «Катаяма» в окрестностях города Грозного [15].

8. Цемянка – порошок на основе толченого жженного кирпича. Исторически в смеси с другими вяжущими (известь) использовался для повышения прочности и водостойкости строительных растворов: применялся как при строительстве Софийского собора в Киеве в XI веке, так и Санкт-Петербурга [16].

Все материалы были предварительно измельчены в шаровой мельнице до порошкообразного состояния (фракции в пределах 9–27 мкм).

Седиментационный анализ проводился по классической методике, основанной на законе Стокса, для определения распределения частиц по размерам в диапазоне 1–50 мкм. Подготовка суспензий осуществлялась в лабораторных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ с соблюдением всех процедур пробоподготовки в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003 [17] и ОСТ 41-08-249-85 [18].

На основе экспериментальных данных сначала рассчитаны диаметры частиц, осевших к каждому моменту времени, с помощью уравнения Стокса получено дифференциальное распределение, показывающее долю каждой фракции. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость размеров частиц от времени осаждения

Table 1

Dependence of particle size on deposition time

Время седиментации фракций, с	Цемянка, диаметр, мкм	Доломит, диаметр, мкм	Известняк, диаметр, мкм	Мергель, диаметр, мкм	Сланец, диаметр, мкм	Гипс, диаметр, мкм	Ангидрит, диаметр, мкм	Бентонит
60	25,15	22,4	23,5	23,4	23,6	26,3	22,0	25,0
120	17,79	15,8	16,6	16,6	16,7	18,6	15,6	17,7
180	14,52	12,9	13,6	13,5	13,6	15,2	12,7	14,4
240	12,58	11,2	11,8	11,7	11,8	13,1	11,0	12,5
300	11,25	10,0	10,5	10,5	10,6	11,8	9,8	11,2
Средний размер частиц	16,27	14,46	15,14	15,13	15,26	17,02	14,22	25,01

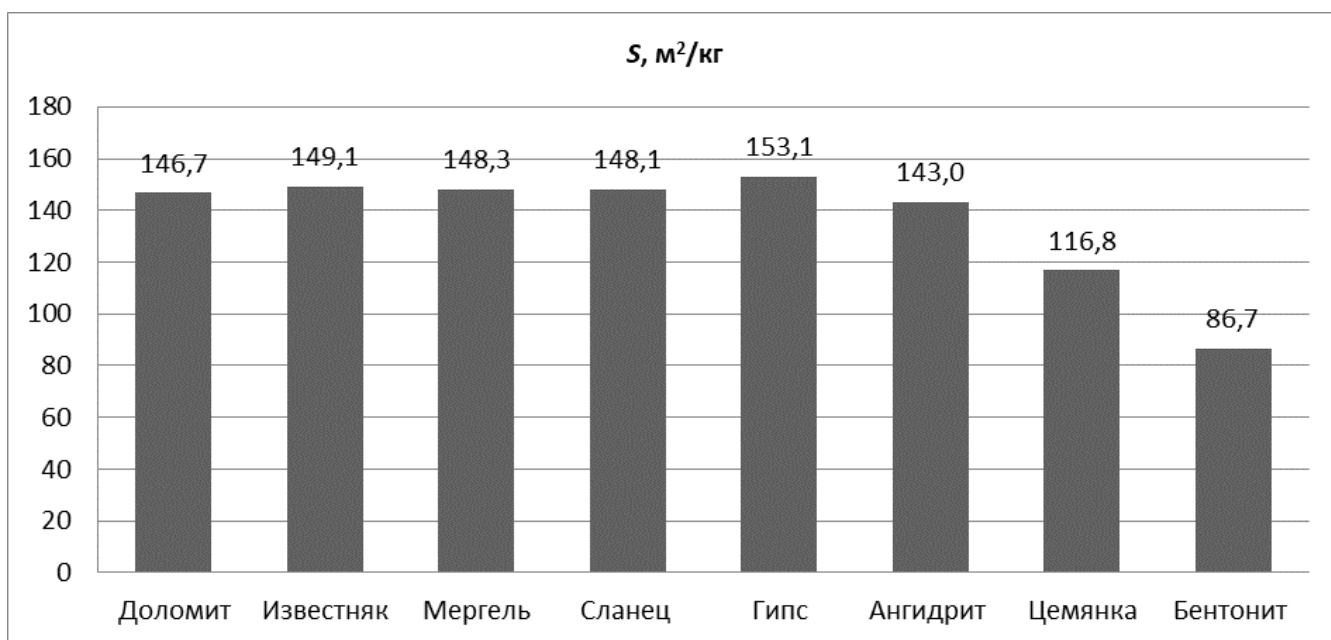


Рис. 1. Гистограмма удельной поверхности исследуемых образцов
Fig. 1. Histogram of the specific surface area of the studied samples

На основе данных (табл. 1) рассчитана удельная поверхность исследованных суспензий (рис. 1). Как видно из данных, значения удельной поверхности частиц доломита, известняка, мергеля и сланца находятся в диапазоне 146–149 $\text{м}^2/\text{кг}$, что указывает на схожую дисперсность частиц. В водных суспензиях этот диапазон указывает на умеренную реакционную способность, что позволяет обеспечить сбалансированную гидратацию без чрезмерной потребности в воде. Например, известняк и мергель с удельной поверхностью частиц 149,1 и 148,3 $\text{м}^2/\text{кг}$ соответственно немного мельче, чем доломит (146,7 $\text{м}^2/\text{кг}$), что потенциально увеличивает их вклад в образование гидрата силиката кальция (C–S–H) в системах портландцемента.

Гипс демонстрирует самую высокую удельную поверхность – 153,1 $\text{м}^2/\text{кг}$. В связующих составах мелкие частицы гипса способствуют быстрому растворению сульфатных ионов, которые регулируют гидратацию алюминатной фазы и предотвращают быстрое схватывание. Такое повышение удельной поверхности способствует достижению контролируемого времени схватывания (обычно 2–4 часа в стандартных цементах), но может увеличить потребность в воде, что потребует добавления примесей для обеспечения необходимых показателей [19].

Ангидрит с более низкой удельной поверхностью (143,0 $\text{м}^2/\text{кг}$) представляет собой менее подходящую альтернативу: его значение дисперсности выгодно в условиях высокой температуры или для продления удобоукладываемости штукатурок, хотя существует риск неполной гидратации, если не измельчить достаточно тонко [20].

Удельная поверхность цемянки, равная 116,8 $\text{м}^2/\text{кг}$, является промежуточной, что делает ее пригодной

для составов, где допустимо замедленное нарастание прочности, например для смягчения термического растрескивания материала [21].

Бентонит, с самой низкой степенью дисперсности – 86,7 $\text{м}^2/\text{кг}$, выделяется благодаря своей глинистой минеральной природе [22]. Хотя бентонит известен высокой внутренней степенью дисперсности (> 500 $\text{м}^2/\text{г}$ по методу ВЕТ из-за межслойных поверхностей), измеренное значение удельной поверхности, вероятно, отражает эффективную внешнюю поверхность в водной суспензии, поскольку набухание и расслоение могут не полностью проявиться в методе измерения.

Анализ гранулометрического состава позволяет сделать некоторые предположения, основанные на их использовании в качестве активных добавок в РРС. Близкая по величине удельная поверхность известковых (известняк, доломит) и глинистых (мергель, сланец) компонентов (в среднем $\approx 148 \text{ м}^2/\text{кг}$) способствует равномерному образованию структуры вяжущего. Смешивание с гипсом с более высокой удельной поверхностью способно обеспечить улучшение схватывания, а добавление бентонита с более высокой удельной поверхностью может улучшить реологические свойства растворов из них [23].

Добавки с удельной поверхностью > 148 $\text{м}^2/\text{кг}$ (например, гипс, известняк) могут повысить соотношение вода/вяжущее на 5–10 % по сравнению с более крупными аналогами, исходя из эмпирических корреляций в составах растворов: для этого можно использовать пластификаторы для поддержания осадки без ущерба для прочности.

Более высокая степень дисперсности коррелирует с ускоренным ранним упрочнением: например, удельная поверхность гипса 153,1 $\text{м}^2/\text{кг}$ может повысить

прочность на сжатие цементных паст через один день до 20 %, поскольку более мелкие частицы ускоряют образование этtringита. Сбалансированное распределение удельной поверхности минимизирует такие риски, как чрезмерная усадка (от компонентов высокой тонкости) или плохая укладка (от грубых компонентов) [24].

На основе представленных результатов получены детальные характеристики распределения частиц по размерам в водных суспензиях изученных минералов.

Для каждого графика (рис. 2–9) описаны ключевые параметры: медианный размер (D_{50}), размеры 10 и 90 % кумулятивного распределения (D_{10} и D_{90}), ширина распределения (S) и модальные значения. Эти параметры играют ключевую роль в таких характеристиках материала, как текстура, реакционная способность и взаимодействие с другими компонентами в РРС. Например, более узкое распределение размеров важно при его применении в различных технологических процессах. Ширина распределения (S) влияет на свойства текучести суспензии, ее реакционную способность и эффективность в различных процессах, таких как фильтрация, осаждение. В совокупности эти параметры дают целостное представление о дисперсном состоянии материала.

Распределение размеров частиц в суспензии природного гипса (рис. 2) характеризуется однородным распределением с максимальной концентрацией частиц в диапазоне около 51,2 мкм, что соответствует пиковой доле в 46 %.

Медианный размер (D_{50}) составляет 51,2 мкм. Размеры кумулятивного распределения D_{10} и D_{90} равны соответственно 3,5 и 22,5 мкм. Эти значения показывают диапазон, в котором располагается основная масса частиц. Ширина распределения (S) составляет 19 мкм, что свидетельствует о довольно широком распределении размеров. Такое распределение частиц подходит для использования в качестве активатора вяжущего компонента в строительных смесях, поскольку оно поддерживает нормальный уровень гидратации и способствует развитию прочности. Тем не менее для предотвращения избыточной седиментации и обеспечения агрегативной и кинетической стабильности суспензии может потребоваться использование стабилизаторов и диспергаторов.

График распределения частиц суспензии известняка (рис. 3) по размерам показывает, что D_{50} составляет 38,7 мкм. D_{10} и D_{90} равны 0,7 и 34,5 мкм соответственно.

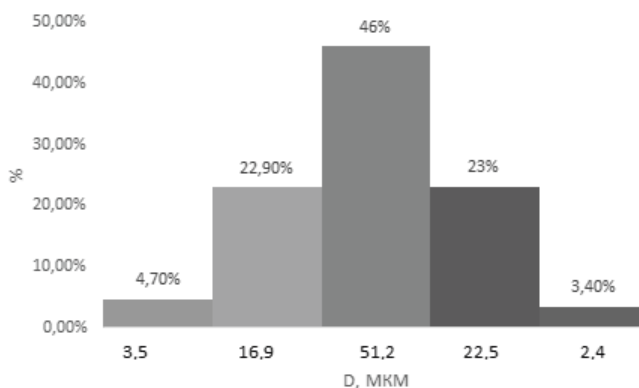


Рис. 2. Распределение частиц по размерам в суспензии природного гипса
 Fig. 2. Particle size distribution in a suspension of natural gypsum

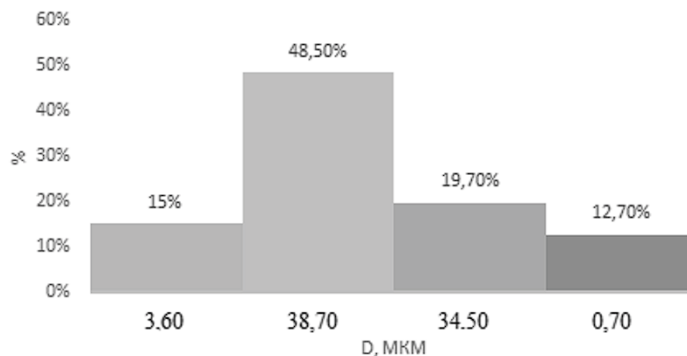


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в суспензии известняка
 Fig. 3. Particle size distribution in limestone suspension

Ширина распределения (S) в суспензии асимметричная и составляет 33,8 мкм, с одним выраженным пиком в области 38,7 мкм, что свидетельствует о том, что основная масса частиц сосредоточена в диапазоне средних размеров, с меньшими долями более мелких и крупных частиц.

Учитывая характеристики частиц в данной суспензии, можно ожидать значительное влияние на реологические свойства смеси, где частицы среднего размера (38,7 мкм) могут играть важную роль в механизме взаимодействия частиц и стабильности суспензии. Присутствие мелких частиц (3,6 и 0,7 мкм) может оказывать влияние на стабилизацию системы и ее поведение при добавлении химических добавок.

Указанное распределение частиц делает суспензию известняка подходящей для различных промышленных и строительных целей, где требуется стабильность и контролируемое поведение смеси при изменении условий.

На основе графика распределения частиц в суспензии мергеля (рис. 4) установлено, что D_{50} составляет 48,2 мкм, в то время как размеры D_{10} и D_{90} равны 12,5 и 14,9 мкм соответственно.

Ширина распределения (S) составляет 2,4 мкм, что указывает на относительно узкое распределение. Это свидетельствует о том, что в суспензии мергеля преобладают частицы среднего размера, с их концентрацией вблизи медианного значения, что придает материалу гомогенную структуру. Узкое распределение частиц и преобладание среднего размера указывают на высокую степень однородности, что делает суспензии мергеля потенциально подходящими для применения в различных технологических процессах, где важна стабильность и контроль размеров частиц.

Из-за преобладания частиц среднего размера (48,2 мкм) можно ожидать, что суспензия мергеля будет проявлять устойчивость в различных технологических процессах, таких как использование в строительно-реставрационных смесях и других применениях, где важна стабильность и равномерное распределение частиц. Меньшие фракции (14,9 и 12,5 мкм) могут оказывать влияние на реологию системы и ее поведение при добавлении стабилизаторов.

График распределения частиц в суспензии сланца (рис. 5) показывает, что D_{50} составляет 48,6 мкм.

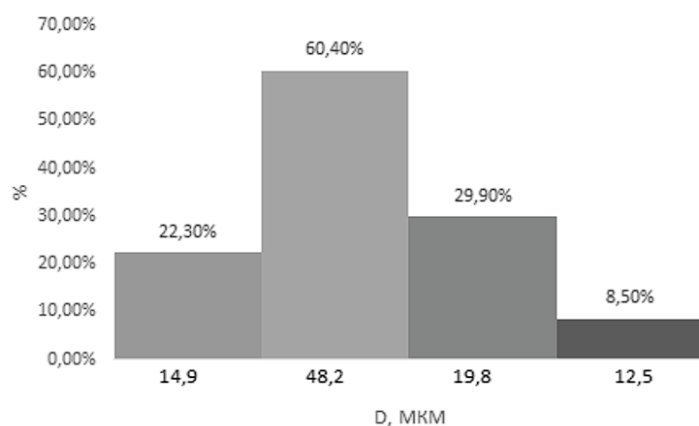


Рис. 4. Распределение частиц по размерам в суспензии мергеля
Fig. 4. Particle size distribution in marl suspension

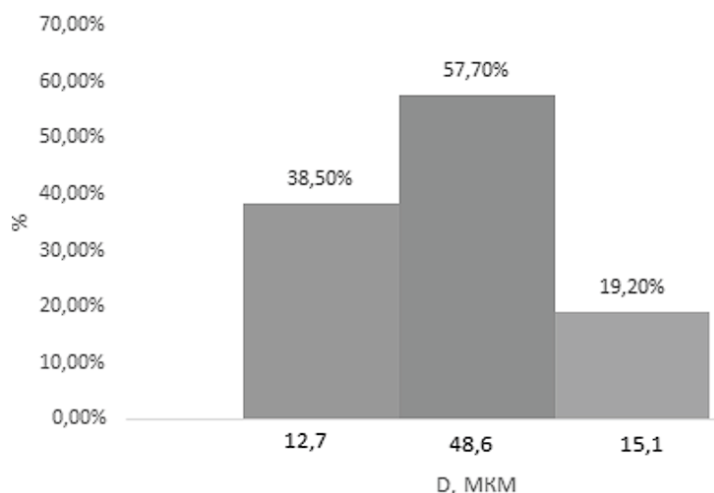


Рис. 5. Распределение частиц по размерам в суспензии сланца
Fig. 5. Particle size distribution in the shale suspension

Размеры D_{10} и D_{90} равны 12,7 и 15,1 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 2,4 мкм, что указывает на узкое распределение частиц.

Суспензия сланца обладает довольно однородной структурой, поскольку более 57 % частиц сосредоточено вокруг медианного размера. Узкое распределение и преобладание частиц среднего размера подтверждают гомогенность материала, что делает его подходящим для процессов, требующих стабильности и контроля размеров частиц.

Характер распределения частиц в суспензии ангидрита (рис. 6) показывает, что медианный размер D_{50} составляет 46,9 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,8 и 14,0 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 2,2 мкм, что свидетельствует о довольно узком распределении частиц. Суспензия ангидрита имеет достаточно высокую степень однородности, с преобладанием частиц среднего размера, что составляет около 30 % от общего количества частиц. Узкое распределение размеров указывает на стабильную структуру материала, что делает его приемлемым для процессов, где необходим контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

График распределения частиц в суспензии цемянки (рис. 7) показывает, что величина D_{50} составляет 50,1 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,9 и 16,0 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 4,1 мкм, что указывает на умеренно узкое распределение частиц. Модальное значение сосредоточено вблизи медианного размера 50,1 мкм.

Суспензия цемянки имеет высокую степень однородности с преобладанием частиц среднего размера, что составляет около 60,3 % от общего количества частиц. Ширина распределения и преобладание частиц около медианы указывают на стабильную структуру материала, что делает его подходящим для применения в процессах, где требуется контроль за размерами частиц и их гомогенностью.

Распределение частиц в суспензии доломита (рис. 8) показывает, что D_{50} составляет 51,1 мкм. Размеры D_{10} и D_{90} равны 2,3 и 12,0 мкм соответственно. Ширина распределения (S) составляет 9,7 мкм, что указывает на довольно широкое распределение частиц.

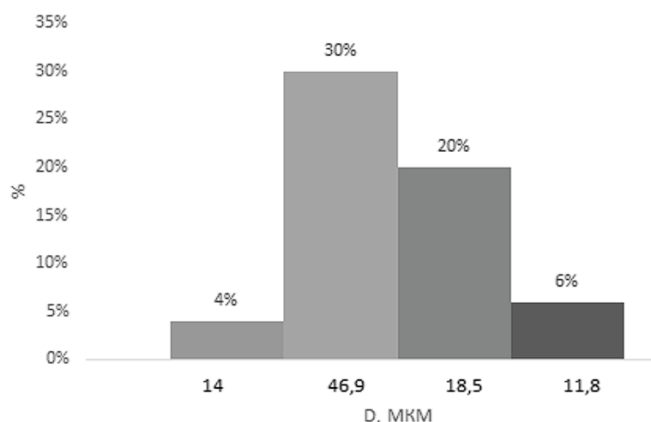


Рис. 6. Распределение частиц по размерам в суспензии ангидрита
 Fig. 6. Particle size distribution in anhydrite suspension

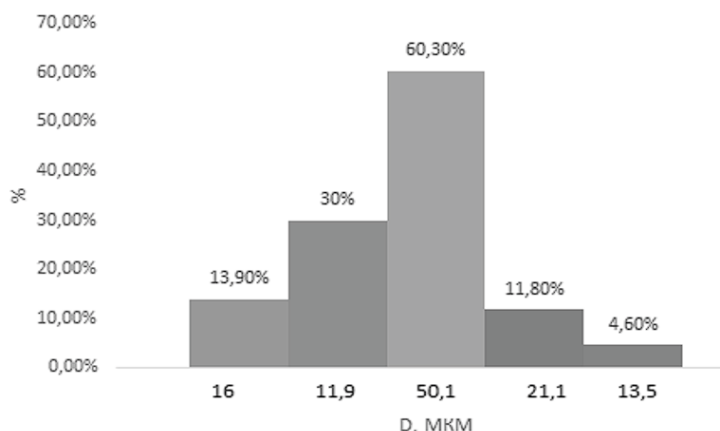


Рис. 7. Распределение частиц по размерам в суспензии цемянки
 Fig. 7. Particle size distribution in crushed burnt brick suspension

Суспензия доломита имеет преобладание частиц среднего размера, что составляет 75,8 % от общего количества частиц. Несмотря на широкое распределение, высокая концентрация частиц около медианного размера говорит о стабильности и однородности материала, что делает его пригодным для использования в процессах, где важно поддерживать стабильную структуру и контроль за размерами частиц. Следовательно, распределение частиц можно охарактеризовать как асимметричное, с преобладанием крупных частиц в диапазоне 51,1 мкм.

График распределения частиц в суспензии бентонита (рис. 9) показывает, что D_{50} составляет 25,0 мкм.

Размеры D_{10} и D_{90} равны 11,2 и 17,7 мкм соответственно. Ширина распределения составляет 6,5 мкм, что свидетельствует о достаточно узком распределении частиц. Модальное значение сосредоточено около медианного размера 25,0 мкм. Суспензия бентонита характеризуется преобладанием частиц среднего размера, что составляет 75,7 % от общего количества частиц. Узкое распределение и высокая концентрация частиц около медианы свидетельствуют о структуре материала, делающего его подходящим для условий, где важен контроль за размерами частиц и их однородность.

Заключение

На основе представленных данных можно сформулировать следующие выводы:

1. Изученные образцы существенно различаются по среднему размеру частиц и ширине распределения фракций:

– наиболее дисперсными (мелкими) оказались ангидрит (14,22 мкм) и доломит (14,46 мкм), что способствует их высокой реакционной активности и плотной микроструктуре вяжущего;

– наиболее крупнодисперсными – гипс (17,02 мкм) и особенно бентонит (25,01 мкм), что связано с агрегацией частиц и спецификой их морфологии.

Эти различия позволяют целенаправленно подбирать компоненты в зависимости от требуемых свойств PPC:

– для ускорения схватывания использовать более мелкие фракции (например, гипс с высокой удельной поверхностью 153,1 м²/кг);

– для улучшения удобоукладываемости и снижения усадки вводить более грубые или глинистые компоненты (например, бентонит).

2. Значения удельной поверхности выявили следующие особенности исследованных объектов. Установлено, что гипс обладает наибольшей удельной поверхностью (153,1 м²/кг), что делает его эффективным регулятором схватывания и ускорителем ранней прочности. Бентонит имеет наименьшую эффективную удельную поверхность в водной среде (86,7 м²/кг), что объясняется агрегацией частиц, однако его ценность заключается в тиксотропных и стабилизирующих свойствах, улучшающих реологию суспензий. Известняк, мергель, сланец и доломит демонстрируют близкие значения удельной поверхности (~146–149 м²/кг), что обеспечивает однородность микроструктуры и сбалансированную гидратацию в составах.

3. Комбинирование компонентов с разной дисперсностью и минералогией позволяет достичь оптимального баланса между прочностью, адгезией, водопотребностью и усадкой, а также обеспечить совместимость с оригинальными строительными материалами памятников (известняк, доломит, мергель), улучшить реологические свойства за счет добавок типа бентонита или цемянки, обеспечить постепенное нарастание прочности и снижение риска термического растрескивания.

4. Все исследованные материалы (доломит, известняк, мергель, сланец, гипс, ангидрит, бентонит, цемянка) являются локальными для Юга России, что снижает логистические издержки, повышает экологичность и аутентичность PPC.

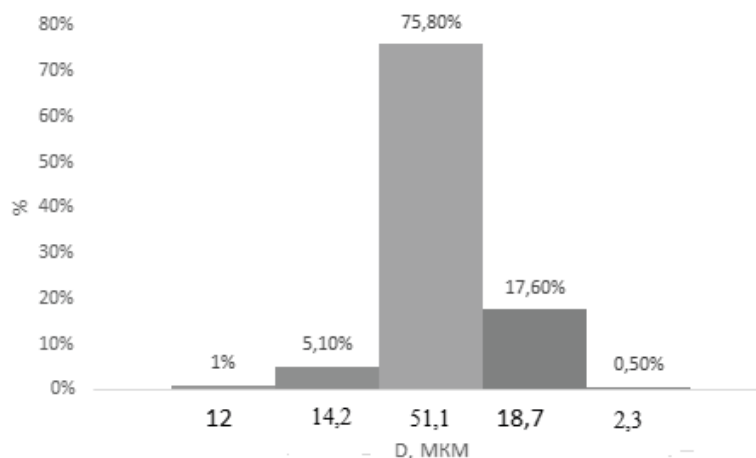


Рис. 8. Распределение частиц по размерам в суспензии доломита
 Fig. 8. Particle size distribution in dolomite suspension

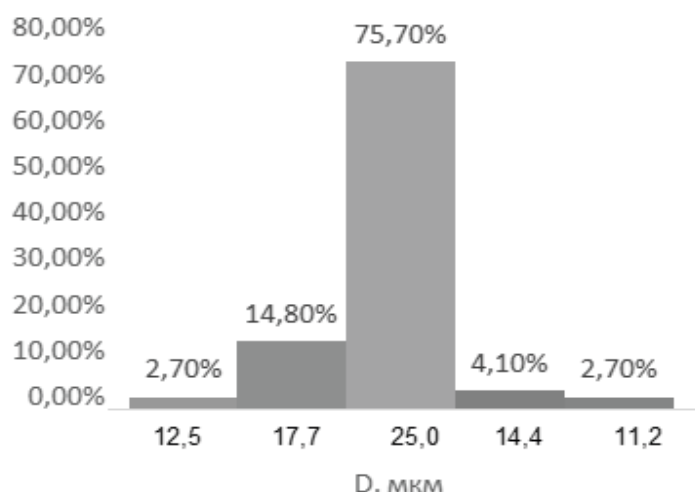


Рис. 9. Распределение частиц по размерам в суспензии бентонита
Fig. 9. Particle size distribution in bentonite suspension

5. На основании полученных результатов планируется создание образцов, включающих сочетания минеральных компонентов (известняк, доломит, мергель, гипс, ангидрит, бентонит и цемянка) с последующей оценкой физико-механических свойств – прочности, водопоглощения, адгезии и трещиностойкости, а также выявление оптимальных пропорций компонентов для конкретных практических задач и условий.

Список литературы

1. Савченко И.А., Батаев Д.К.-С., Даукаев А.А., Батаева П.Д. Восстановление городских памятников: ресурсный потенциал Северного Кавказа // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023. Т. 15. № 2 (56). С. 431–441. DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-431-441>. EDN: BGCYJY.
2. Батаева П.Д. Теория, технологии и организационные основы ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия [диссертация]. Москва, 2025. 456 с.
3. Шеина С.Г., Батаев Д.К.-С., Батаева П.Д., Батаева Я.Д. Технологии и материалы для повышения устойчивости жизненного цикла памятников истории и культуры: монография. Грозный; Махачкала: АЛЕФ, 2025. 182 с.
4. Саламанова М.Ш. Исследование влияния добавки активного кремнезема на свойства вяжущих щелочной активации // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30>. EDN: VOETRC.
5. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
6. Lawrence M. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. Bath: University of Bath, 2006, 345 p.
7. Xu X., Zhao Y., Gu X., Zhu Z., Wang F., Zhang Z. Effect of Particle Size and Morphology of Siliceous Supplementary Cementitious Material on the Hydration and Autogenous Shrinkage of Blended Cement. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 4, 1638. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041638>.
8. Тейлор Х.Ф.У. Химия цемента. Пер. с англ. Москва: Мир, 1996. 560 с. ISBN: 5-03-002731-9.
9. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклнкерных композитов на вяжущем щелочной активации // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. EDN: ARDTXT.
10. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003, 682 p. ISBN: 978-0-444-51564-3.
11. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi Sh., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 114, pp. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
12. Jameson G.J. Advances in fine and coarse particle flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.2010.49.4.325>.
13. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 3. С. 10–14. EDN: PATBOZ.
14. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 8. С. 1241–1250. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250>. EDN: VJFNFX.
15. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Влияние активированного бентонита на свойства щелочных вяжущих материалов // *Строительные*

- материалы. 2023. № 8. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>. EDN: VDLOFI.
16. Батаева П.Д., Аларханова З.З., Батаева Х.М., Батаев А.Д. К вопросу о формировании свойств реставрационных составов на основе воздушных и гидравлических вяжущих веществ // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024. Т. 51. № 4. С. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190>. EDN: LQDWSL.
 17. ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. Москва: Госстрой России, 2004.
 18. ОСТ 41-08-249-85. Управление качеством аналитической работы. Подготовка проб и организация выполнения количественного анализа в лабораториях Мингео СССР. Общие требования. Москва, 1985.
 19. Ферронская А.В., Коряков В.Ф., Баранов И.М. Гипс в малоэтажном строительстве: монография. Москва: АСВ, 2008. 240 с.
 20. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве строительных материалов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2017. № 1 (12). С. 68–79. EDN: YINMZR.
 21. Кулуа К.А., Гуржи Н.Л. Перспективы применения композиционных материалов в строительной отрасли // *Передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность*: сб. науч. тр. Армавир, 26–27 апр. 2024 г., Тамбов, 2024. С. 129–132. EDN: TUIMNK.
 22. Эйриш М.В., Власов В.В., Гревцев В.А., Шляпкина Е.Н., Аухадеев Ф.Л. Кристаллохимические разновидности монтмориллонита и их диагностика в бентонитах. В: *Спектроскопия, рентгенография и кристаллохимия минералов*. Казань: КГУ, 1997. С. 154–160.
 23. Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Минеральные композиты на основе техногенного и природного сырья // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 6 (798). С. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-73-85>. EDN: ZCETEO.
 24. Саламанова М.Ш. Получение щелочного связующего из кремнеземистых добавок по упрощенной технологии // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 3. С. 341–351. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.3.341-351>. EDN: PYEYEC.
- References**
1. Savchenko I.A., Bataev D.K.-S., Daukaev A.A., Bataeva P.D. Restoration of urban monuments: the resource potential of the Northern Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15, no. 2 (56), pp. 431–441. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-431-441>. EDN: BGCYJY.
 2. Bataeva P.D. Theory, technologies and organizational bases of repair, restoration and reconstruction of cultural heritage sites [dissertation]. Moscow, 2025, 456 p. (In Russian).
 3. Sheina S.G., Bataev D.K.-S., Bataeva P.D., Bataeva Ya.D. Technologies and Materials for Enhancing the Life Cycle Resilience of Historical and Cultural Monuments: Monograph. Grozny; Makhachkala: ALEF, 2025, 182 p. (In Russian).
 4. Salamanova M.Sh. The influence of active microsilica additive on binding properties of alkaline activation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2022, no. 1, pp. 23–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30>. EDN: VOETRC.
 5. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
 6. Lawrence M. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. Bath: University of Bath, 2006, 345 p.
 7. Xu X., Zhao Y., Gu X., Zhu Z., Wang F., Zhang Z. Effect of Particle Size and Morphology of Siliceous Supplementary Cementitious Material on the Hydration and Autogenous Shrinkage of Blended Cement. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 4, 1638. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041638>.
 8. Taylor H.F.W. Chemistry of Cement. Translated from English. Moscow: Mir Publ., 1996, 560 p. (In Russian). ISBN: 5-03-002731-9.
 9. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Determination of the specific free surface energy of clinker-free composites on an alkaline activation binder. *Construction Materials*, 2022, no. 1–2, pp. 30–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. EDN: ARDXTX.
 10. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, 2003, 682 p. ISBN: 978-0-444-51564-3.
 11. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi Sh., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 114, pp. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
 12. Jameson G.J. Advances in fine and coarse particle flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.2010.49.4.325>.
 13. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin Yu.S. Classification of active mineral additives for composite binders based on genesis. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2012, no. 3, pp. 10–14. (In Russian). EDN: PATBOZ.
 14. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Influence of mineral powders on the properties of binding systems. *Vestnik MGSU*, 2023, vol. 18, no. 8, pp. 1241–1250.

- (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250>. EDN: VJFNFX.
15. Murtazaev S.A.Y., Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Influence of activated bentonite on the properties of alkaline binders. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, 2023, no. 8, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>. EDN: VDLOFI.
 16. Bataeva P.D., Alarkhanova Z.Z., Bataeva Kh.M., Bataev A.D. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2024, vol. 51, no. 4, pp. 179–190. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190>. EDN: LQDWSL.
 17. State Standard R 52129-2003. Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004. (In Russian).
 18. OST 41-08-249-85. Quality Management of Analytical Work. Preparation of Samples and Organization of Quantitative Analysis in Laboratories of the USSR Ministry of Geology. General Requirements. Moscow, 1985. (In Russian).
 19. Ferronskaya A.V., Koryakov V.F., Baranov I.M. Gypsum in Low-Rise Construction: Monograph. Moscow: ASV Publ., 2008, 240 p. (In Russian).
 20. Falikman V.R. Nanomaterials and nanotechnology in the production of building materials. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2017, no. 1 (12), pp. 68–79. (In Russian). EDN: YINMZR.
 21. Kulua K.A., Gurzhi N.L. Prospects for the use of composite materials in the construction industry. In: *Advanced Technological Developments: Prospects for Implementation in Production and Efficiency: Collection of Scientific Papers*. Armavir, April 26–27, 2024. Tambov, 2024, pp. 129–132. (In Russian). EDN: TUIMHK.
 22. Airish M.V., Vlasov V.V., Grevtsev V.A., Shlyapkina E.N., Aukhadeev F.L. Crystallochemical varieties of montmorillonite and their identification in bentonites. In: *Spectroscopy, X-ray Diffraction and Crystallochemistry of Minerals*. Kazan: KSU, 1997, pp. 154–160. (In Russian).
 23. Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Mineral composites based on technogenic and natural raw materials. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2025, no. 6 (798), pp. 73–85. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-73-85>. EDN: ZCETEO.
 24. Salamanova M.Sh. Using a simplified technology to make an alkaline binder from silica additives. *Vestnik MGSU*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 341–351. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.3.341-351>. EDN: PYEYEC.

Информация об авторах / Information about the authors

Дена Карим-Султанович Батаев, д-р техн. наук, профессор, директор, ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный

e-mail: denabataev61@mail.ru

Dena K.-S. Batayev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director, Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

e-mail: denabataev61@mail.ru

Роман Суламбекович Джамбулатов✉, канд. ф.-м. наук, заведующим отделом физико-математических исследований, ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный

e-mail: asldzam@mail.ru

Roman S. Dzhambulatov✉, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Mathematical Research, Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

e-mail: asldzam@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 666.972.4:620.1:691.322.2

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70)**А.А. ЗИНОВЬЕВ^{1,2,✉}, Б.И. БУЛГАКОВ¹, О.Б. ЛЯПИДЕВСКАЯ¹**¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация² ООО «Флагман», ул. Советская, д. 47, к. 6, г. Королев, 141069, Российская Федерация

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация

Введение. В статье представлены результаты исследования вибропрессованных бетонных плит, изготовленных с использованием различных технологических добавок. Рассмотрены современные методы оценки их структурных и эксплуатационных характеристик.

Цель. Разработка и апробация методики экспресс-прогнозирования морозостойкости бетонных изделий. Внедрение такого метода позволит существенно сократить время оценки долговечности продукции строительного назначения по сравнению с традиционными длительными циклическими испытаниями.

Материалы и методы. Объектом исследования служили образцы вибропрессованных тротуарных плит, изготовленных в заводских условиях. Номинальные характеристики образцов соответствовали классу бетона по прочности на сжатие В30, марке по морозостойкости F2200 и группе по эксплуатации Б согласно требованиям ГОСТ 17608-2017. Для улучшения свойств бетонной смеси применялись комплексы технологических добавок: пластифицирующих, водоредуцирующих и воздухововлекающих. Были проведены следующие испытания: определение средней плотности разработанных бетонов по ГОСТ 12730.1-2020, их прочности на сжатие по ГОСТ 28570-2012, водопоглощения по массе по ГОСТ 12730.3-2020, морозостойкости в соответствии с Приложением Е к ГОСТ 17608-2017 и ГОСТ 10060-2012, микроструктурный анализ по методике ГОСТ Р 70753-2023.

Результаты. Микроструктурный анализ выявил значительные изменения в структуре затвердевшего бетона, которые напрямую влияют на его морозостойкость. На основании полученных данных выдвинута гипотеза о том, что ключевым фактором долговечности бетонных изделий является наличие и количественное соотношение в них пор двух видов: крупных (диаметром от 1 до 4 мм) и мелких (диаметром до 0,3 мм).

Выводы. Экспериментально подтверждена корреляция между параметрами поровой структуры, формируемой при вибропрессовании бетонных тротуарных плит, и морозостойкостью бетона; предложен комплексный подход, сочетающий стандартные испытания на морозостойкость и количественный микроструктурный анализ, который является перспективной основой для разработки экспресс-метода прогнозирования долговечности бетонных изделий строительного назначения. Установлено, что для успешной реализации предлагаемой методики необходима разработка детальной программы дальнейших исследований, направленных на определение количественных критериев оценки и на валидацию экспресс-метода для различных составов бетонов.

Ключевые слова: вибропрессование, морозостойкость, микроскопический анализ структуры бетона, плиты бетонные тротуарные, камень бетонный бортовой, экспресс-метод оценки морозостойкости, поровая структура

Для цитирования: Зиновьев А.А., Булгаков Б.И., Ляпидевская О.Б. Прогнозирование морозостойкости бетона с помощью микроструктурного анализа на примере вибропрессованных изделий // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 62–70. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70). EDN: QKJGFL.

Вклад авторов
Зиновьев А.А. – проведение испытаний, разработка методики, формулирование научной гипотезы, написание исходного текста.
Булгаков Б.И. – научное руководство, анализ и обобщение экспериментальных результатов, формулирование выводов.
Ляпидевская О.Б. – литературный обзор, редактирование текста, перевод на английский язык.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.10.2025

Поступила после рецензирования 07.11.2025

Принята к публикации 13.11.2025

A.A. ZINOVIEV^{1,2,✉}, B.I. BULGAKOV¹, O.B. LYAPIDEVSKAYA¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

² Flagman LLC, Sovetskaya str., 47, bld. 6, Korolev, 141069, Russian Federation

PREDICTION OF CONCRETE FROST RESISTANCE USING MICROSTRUCTURAL ANALYSIS USING THE EXAMPLE OF VIBROPRESSED PRODUCTS

Abstract

Introduction. The article presents the results of a study on vibrocompressed concrete slabs produced using various technological additives. Modern methods for evaluating their structural and performance characteristics are reviewed.

The aim of the work is the approbation of a method for rapid prediction of the frost resistance of concrete products. The implementation of such a method will significantly reduce the time required for assessing product durability compared to traditional prolonged cyclic tests.

Materials and methods. The objects of the study were samples of vibrocompressed paving slabs manufactured under plant conditions. The nominal characteristics of the samples correspond to concrete strength class B30, frost resistance grade F200, and service group B in accordance with State Standard 17608-2017. Complexes of technological additives were used to modify the properties of the concrete mixture: plasticizing, water-reducing, and air-entraining. The following tests were conducted: determination of frost resistance in accordance with Appendix E of State Standard 17608-2017; Microstructural analysis using the method of State Standard R 70753-2023.

Results. Microstructural analysis revealed significant changes in the structure of the hardened concrete that directly affect its frost resistance. Based on the data obtained, a hypothesis was put forward that the key factor for durability is the presence and quantitative ratio of pores of two fractions: large pores with a diameter from 1 to 4 mm; small pores with a diameter from 0 to 0.3 mm.

Conclusions. The conducted research confirms the relevance and scientific novelty of the topic. The obtained results allow for the following conclusions: a correlation was identified between the parameters of the pore structure formed during vibrocompression and the frost resistance

of the concrete; the proposed comprehensive approach, combining standard frost resistance tests and quantitative microstructural analysis, is a promising basis for developing an express method for predicting durability. For the successful implementation of the methodology, it is necessary to develop a detailed program for further research aimed at establishing quantitative assessment criteria and validating the method for various concrete compositions.

Keywords: vibrocompression, frost resistance, microstructural analysis of concrete structure, concrete paving slabs, concrete curbstones, rapid method for assessing frost resistance, pore structure

For citation: Zinoviev A.A., Bulgakov B.I., Lyapidevskaya O.B. Prediction of concrete frost resistance using microstructural analysis using the example of vibropressed products. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 62–70. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-62-70](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70). EDN: QKJGFL.

Authors contribution statement

Zinoviev A.A. – tests conducting, methodology developing, formulating a scientific hypothesis, source text writing. Bulgakov B.I. – scientific guidance, analysis and generalization of experimental results, conclusions formulation. Lyapidevskaya O.B. – literary review, text editing, English translation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.10.2025

Revised 07.11.2025

Accepted 13.11.2025

Введение

В последние годы большое внимание уделено вопросу развития благоустройства городов и их транспортной инфраструктуры. Преображение облика больших и малых муниципальных образований является одной из стратегий повышения качества и комфорта жизни граждан Российской Федерации. Что касается дорожно-транспортной инфраструктуры населенных пунктов, то подавляющую долю твердых покрытий дорог занимают асфальтобетоны на основе битумных вяжущих. При этом в зоне примыкания тротуаров к проезжей части располагаются бетонные изделия в виде бортовых камней и тротуарных плит, изготовленные методом полусухого вибропрессования с использованием цементного вяжущего [1–4]. На данный вид бетонных изделий распространяются требования ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 6665-91 [6]. Ввиду жестких условий эксплуатации к изделиям предъявляют высокие требования по морозостойкости. Так, в ГОСТ 6665-91 [6] в качестве требуемой марки по морозостойкости к бетонным изделиям предъявляют требование от F100 до F300, а в версии ГОСТ 6665-2023 [7], разработанной для применения на территории Евразийского экономического союза (ЕАЭС), нормируются марки от F₂100 до F₂300. В ГОСТ 17608-2017 [5] для всех групп по эксплуатации плит бетонных тротуарных назначена марка F₂200. При приемке изделий на объектах чаще всего ограничиваются испытаниями по определению фактического класса бетона по прочности на сжатие и определению показателя водопоглощения. Прямого требования об обязательной проверке морозостойкости изделий при их приемке нет. Проведение данного исследования занимает относительно много времени – не менее 20-ти суток согласно Приложению Е и таблице Е.2 ГОСТ 17608-2017 [5] при марке по морозостойкости F₂200. Трудоемкость и стоимость проверки морозостойкости являются факторами, ограничивающими контроль данного параметра.

На основании полученного производственного опыта были выявлены примеры, когда бетонные изделия, изготавливаемые из одних и тех же материалов и имеющие несущественные отличия по характеристикам водопоглощения, плотности и прочности на сжатие, существенно отличаются результатами их испытаний на морозостойкость [8–11].

Целью является разработка и апробация методики экспресс-прогнозирования морозостойкости бетонных вибропрессованных изделий. Внедрение такого метода позволит существенно сократить время оценки долговечности продукции по сравнению с традиционными длительными циклическими испытаниями. Интерес представляет изучение соотношения качественного и количественного распределений пустотности в затвердевшем вибропрессованном бетоне с последующим сопоставлением показателей качественных характеристик бетона с его морозо-

стойкостью, установлением закономерностей и проверки сформулированной гипотезы на практике.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие материалы и составы:

- цемент ЦЕМ 1 42,5Б (ГОСТ 31108-2020 [12]), цементный завод «ХОЛСИМ», г. Ферзиково);
- щебень гравийный фр. 3–8 мм (карьер Богаево), М800;
- щебень гранитный фр. 5–10 мм («Павловск гранит»), М1400;
- песок кварцевый мытый, М_к 2,67 (карьер Богаево);
- технологические добавки: «Реостаб ВП 01» (водоредуцирующая), «Реостаб ВП 77» (водоредуцирующая, воздухововлекающая), «Реостаб ВП 03» (водоредуцирующая), «Мурасан БВА 19» (водоредуцирующая).

Методика проведения испытания включала изготовление и испытание образцов на прочность на сжатие по ГОСТ 28570-2019 [13], определение средней плотности бетонов по ГОСТ 12730.1-2020 [14] и водопоглощения по массе по ГОСТ 12730.3-2020 [15], определение морозостойкости по методикам Приложения Е к ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 10060-2012 [16] и исследование поровой структуры бетонов методом микроскопического количественного анализа по ГОСТ Р 70753-2023 [17].

Результаты

Были приготовлены составы бетонов, приведенные в табл. 1, и проведены испытания изготовленных из них образцов с целью определения показателей средней плотности, прочности на сжатие и водопоглощения по массе полученных бетонов в возрасте 28 суток (табл. 2).

В результате проведенных испытаний были выявлены несущественные отличия в прочности на сжатие бетонных образцов и более существенные отличия в значениях их средней плотности и водопоглощения по массе. С целью дальнейшего исследования характеристик полученных бетонов проведены испытания образцов на соответствие марке по морозостойкости составов № 1, 3 и 4 третьим ускоренным методом по методикам Приложения Е ГОСТ 17608-2017 [5] и ГОСТ 10060-2012 [16]. Испытания на морозостойкость образцов состава № 2 не проводились по причине идентичности действия технологических добавок «Реостаб ВО 01» и «Мурасан БВА 19» и полученных с их использованием характеристик бетонов составов № 2 и 4. Испытания проводились на бетонных образцах в форме кернов, выбуренных по [5] из тротуарных плит, а также на образцах цельной тротуарной плиты размером 100 × 200 × 80 мм, изображенных на рис. 1.

Таблица 1

Составы бетонов

Table 1

Concrete compositions

Добавка	«Реостаб ВП 77»	«Реостаб ВП 01»	«Реостаб ВП 03»	«Мурасан БВА 19»
№ состава	1	2	3	4
Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси				
Цемент, кг	370	370	370	370
Песок, кг	1072	1072	1072	1072
Щебень гравийный, кг	487	487	487	487
Щебень гранитный, кг	393	393	393	393
Добавка, кг	0,14	1,7	1,7	1,7
Вода	111	111	115	111
В/Ц	0,30	0,30	0,31	0,30

Таблица 2

Характеристики образцов бетонных тротуарных плит при испытаниях

Table 2

Characteristics of concrete paving slabs samples during testing

№ состава бетона	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение по массе, %	Прочность на сжатие, МПа
1	2420	2,9	45
2	2390	3,5	46
3	2440	3,1	47
4	2388	3,5	46

В соответствии с Приложением Е [5] образцы считаются прошедшими испытание на морозостойкость при снижении средней прочности на сжатие шести образцов в сравнении с контрольными образцами не более чем на 5 %. В результате проведенных испытаний было установлено, что образцы составов № 3 и 4 утратили сплошность и имели разрушения, не соответствующие стандарту. В отличие от них, образцы из бетонного состава № 1 имели среднее значение снижения прочности на сжатие (4,5 %) относительно контрольных, а также на них отсутствовали шелушение поверхности и трещины (рис. 2).

После испытаний разработанных бетонов на морозостойкость в соответствии с методикой [17] был проведен микроскопический количественный анализ порового пространства их структуры (табл. 3)

В результате выявлено, что воздухововлекающая добавка «Реостаб ВП 77» оказывает положительное влияние на морозостойкость бетона, создавая в его структуре дополнительное количество замкнутых пор диаметром до 0,2 мм и сокращая количество крупных пустот диаметром от 1 до 3 мм.



Рис. 1. Вид образцов перед испытанием на морозостойкость (Зиновьев А.А.©)
 Fig. 1. The appearance of the samples before the frost resistance test (Zinoviev A.A.©)



Рис. 2. Внешний вид образцов после 20 циклов испытаний по третьему ускоренному методу определения морозостойкости (Зиновьев А.А.©)
 Fig. 2. The appearance of the samples after 20 test cycles according to the third accelerated method for frost resistance determination (Zinoviev A.A.©)

Характеристики порового пространства образцов бетонных тротуарных плит

Таблица 3

Characteristics of the pore space of concrete paving slabs samples

Table 3

№ состава бетона	Совокупная доля пор диаметром от 0 до 0,3 мм, %	Совокупная доля пустот диаметром от 1 до 3 мм, %
1	1,1	6,0
3	0,7	8,0
4	0,7	8,5

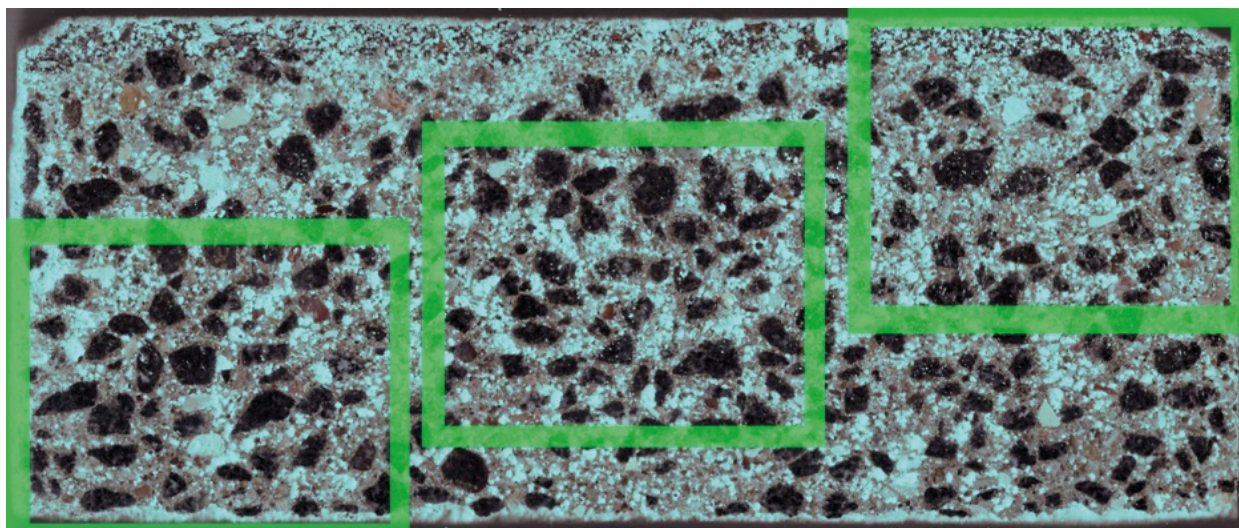


Рис. 3. Микроструктура образца бетона, прошедшего подготовку пробы по ГОСТ Р 70753-2023 [17] (Зиновьев А.А.©)
Fig. 3. The microstructure of the concrete sample, prepared according to State Standard R 70753-2023 [17] (Zinoviev A.A.©)

На основе полученных результатов проведенных экспериментальных исследований была сформулирована научная гипотеза, согласно которой для формирования морозостойкой структуры бетонных изделий, формируемых методом полусухого вибропрессования, определяющим фактором обеспечения требуемой морозостойкости является нормируемое содержание пор и пустот в структуре бетона. При производстве бетонов с низкими В/Ц, менее 0,35, характерным для вибропрессованных изделий, наличие и увеличение доли пор размером до 0,3 мм, описанное ранее Т. Пауэрсом [18–21], позитивно сказывается на их моро-

зостойкости. Однако для вибропрессованных бетонов характерно, что обеспечение требуемой морозостойкости главным образом зависит от доли и распределения крупных дефектных пор.

Следует учитывать, что [17] является первым документом, регламентирующим проведение подобных исследований в отечественной практике, и пока не накоплен опыт подобных работ с применением данной методики. Проведение испытаний требует тщательно отработанной методики подготовки проб и стандартизованного метода оценки полученных результатов.

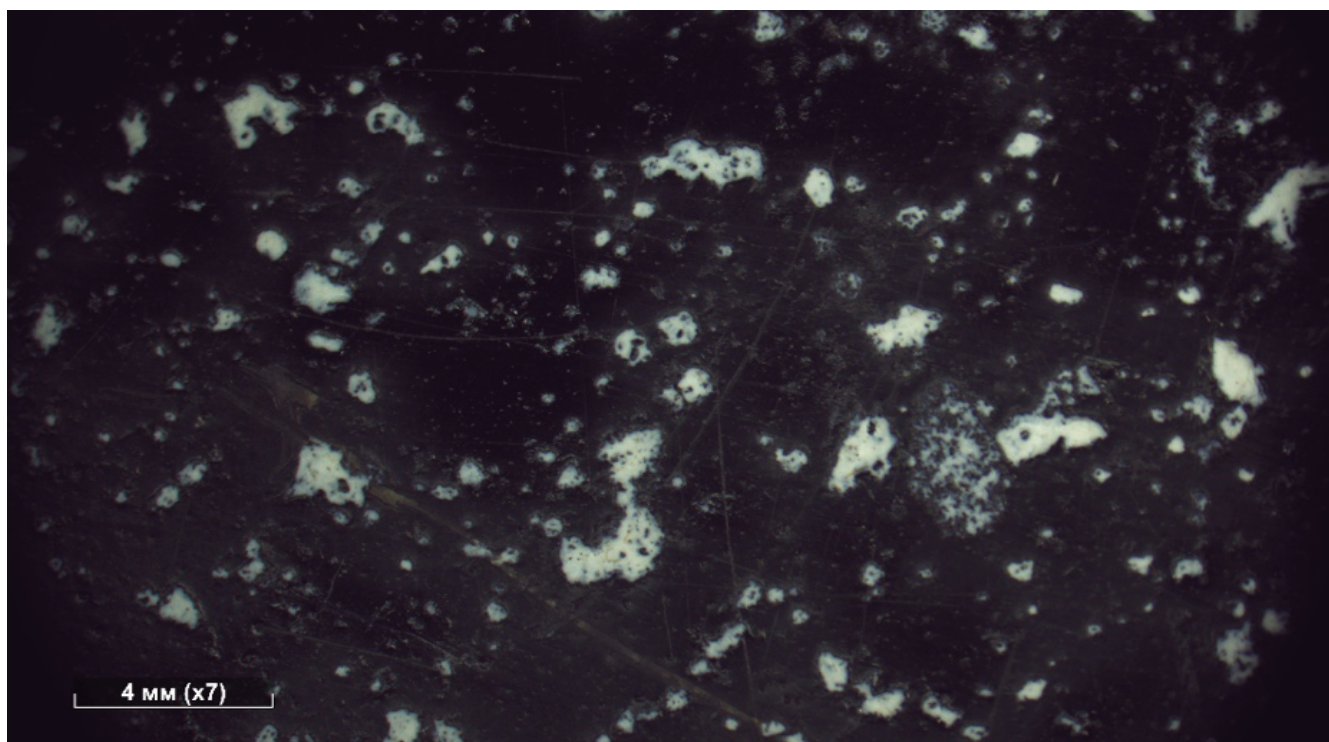


Рис. 4. Микроструктура образца бетона, прошедшего модернизированную подготовку пробы (Зиновьев А.А.©)
Fig. 4. The microstructure of the concrete sample after the upgraded sample preparation (Zinoviev A.A.©)

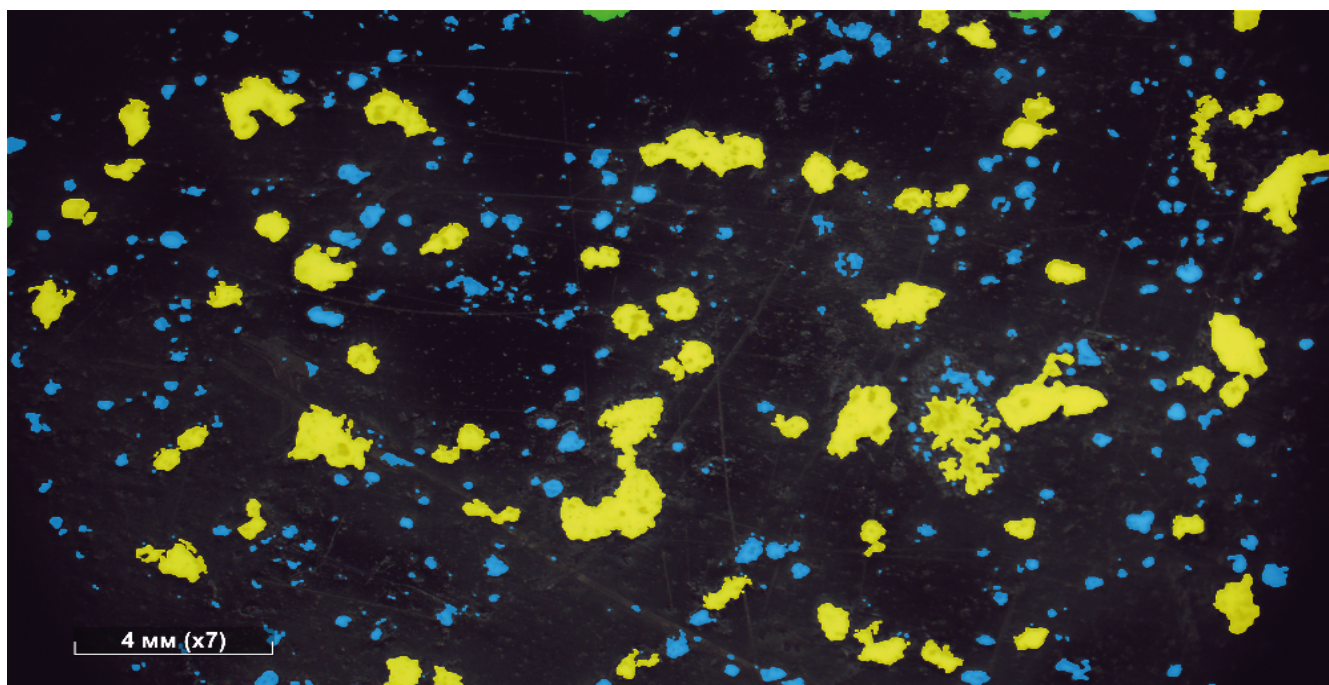


Рис. 5. Определение «полезных» (синих) и «вредных» (желтых) для морозостойкости пустот на образце бетона, прошедшем модернизированную подготовку пробы, методом микроскопического количественного анализа структуры (Зиновьев А.А.©)

Рис. 5. Determination of "useful" (blue) and "harmful" (yellow) for frost resistance voids on a concrete sample after upgraded sample preparation using microscopic quantitative analysis of the structure (Zinoviev A.A.©)

На рис. 3 показано фото бетонного образца, прошедшего подготовку пробы по [17]. Идентификация пор затруднена и требует применения дополнительных флюоресцирующих составов и определенных источников света. Также рис. 4 и 5 – структура образца бетона, прошедшего подготовку пробы по доработанной авторами методике. Методика пробоподготовки дополнена предварительным окрашиванием полированной поверхности образца и последующим заполнением пор контрастным составом. Это позволяет исключить ложноидентифицируемые включения пор и повысить точность обработки результатов. Благодаря наработке практического опыта по предлагаемой методике удастся повысить точность проведения микроструктурного анализа порового пространства бетонов, повысить достоверность результатов для их последующей обработки автоматизированными компьютерными комплексами.

Выводы

Экспериментально подтверждена корреляция между параметрами поровой структуры, формируемой при вибропрессовании бетонных тротуарных плит, и морозостойкостью бетона.

Установлено, что выявляемые предлагаемой улучшенной методикой отличия различных экспериментальных серий в поровой структуре бетонов тротуарных плит в процентном соотношении существенно разнятся. Это позволяет точнее, чем метод оценки водопоглощения, прогнозировать морозостойкость плит, поскольку параметры поровой структуры бетона

оказывают существенное влияние на этот их важный эксплуатационный показатель.

Предложенный комплексный подход, сочетающий стандартные испытания на морозостойкость и количественный микроструктурный анализ, является перспективной основой для разработки экспресс-метода прогнозирования долговечности бетонных изделий. Для успешной реализации предлагаемой методики необходима разработка детальной программы дальнейших исследований, направленных на определение количественных критериев оценки и на валидацию экспресс-метода для различных составов бетона.

Следует отметить, что применительно к технологии вибропрессования оценивать качество уплотнения образцов в лабораторных условиях в сравнении с образцами, изготовленными непосредственно в вибропрессовальном станке, не представляется целесообразным, поскольку усилия и режимы вибрации несопоставимо отличаются.

Список литературы

1. Денисова Ю.В., Дегтев И.А. Вибропрессованные камни бетонные стеновые с различными пластифицирующими добавками // *Университетская наука*. 2021. № 2 (12). С. 21–28. EDN: HUYDMH.
2. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н. Оценка качества тротуарной плитки на основе портландцемента, выпускаемой по технологии вибропрессования // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 2 (62). С. 31. EDN: EXNSAM.

3. Tauyshev O.U. Production of pavement slabs using semi-dry vibration pressing technology. *Bulletin of West Kazakhstan Innovative and Technological University*, 2025, vol. 35, no. 3, pp. 622–629. DOI: <https://doi.org/10.62724/202530707>.
4. Бурцев Д.В., Заргарьян Ю.А. Анализ эффективности вибрационного уплотнения бетонной смеси // *Технологии для разработки информационных систем TRIS-2020*. Материалы X Международной научно-технической конференции. 2020. С. 130–133. EDN: GSNQOD.
5. ГОСТ 17608-2017. Плиты бетонные тротуарные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2017.
6. ГОСТ 6665-91. Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1992.
7. ГОСТ 6665-2023. Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. Бишкек: Кыргызстандарт, 2024.
8. Резникова А.Д. Морозостойкость дорожного бетона для покрытий автомобильных дорог. В: *Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития*. Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Уфа, 2024. С. 72–76. EDN: ESBAWN
9. Панченко А.И., Харченко И.Я., Мурашов А.О. Оперативный контроль морозостойкости бетона // *Строительные материалы*. 2024. № 10. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-20-26>. EDN: ULZOWY.
10. Исаченко С.Л., Кодзоев М.Б.Х. Анализ методов повышения морозостойкости бетона // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 4. С. 291–294. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218428>. EDN: XMFQDV.
11. Баркая Т.Р., Бровкин А.В., Цыбина Р.З. Ускоренная оценка морозостойкости бетона. В: *Строительная наука 2013*. Материалы Международной научно-технической конференции. Владимирский государственный университет. 2013. С. 65–70. EDN: VNEIWV.
12. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
13. ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций. Москва: Стандартинформ, 2019.
14. ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Москва: Стандартинформ, 2021.
15. ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. Москва: Стандартинформ, 2021.
16. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2018.
17. ГОСТ Р 70753-2023. Бетоны. Метод микроскопического количественного анализа структуры. Москва: Российский институт стандартизации, 2023.
18. Powers T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing, research and developments laboratories of the portland cement association. *Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, D.C., January 13–16. 1953, vol. 32, pp. 285–297.
19. Powers T. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Proc. ACI*, 1945, vol. 41, pp. 245–272.
20. Powers T. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. *Jorn. of Am. Concr. Inst.*, 1954, vol. 50, pp. 741–760.
21. Powers T. The mechanism of frost action in concrete. *Cement, Lime and Gravel*, 1966, vol. 41, no. 5, pp. 143–148, 181–185.

References

1. Denisova Yu.V., Degtev I.A. Vibropressed concrete wall stones with various plasticizing additives. *University Science*, 2021, no. 2 (12), pp. 21–28. (In Russian). EDN: HUYDMH.
2. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovina I.N. Quality assessment of paving slabs based on Portland cement produced using vibration pressing technology. *Engineering journal of Don*, 2020, no. 2 (62), p. 31. (In Russian). EDN: EXNSAM.
3. Tauyshev O.U. Production of pavement slabs using semi-dry vibration pressing technology. *Bulletin of West Kazakhstan Innovative and Technological University*, 2025, vol. 35, no. 3, pp. 622–629. DOI: <https://doi.org/10.62724/202530707>.
4. Burtsev D.V., Zargaryan Yu.A. Analysis of the effectiveness of vibration compaction of concrete mixtures. *Technologies for the Development of Information Systems TRIS-2020*. Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference. 2020, pp. 130–133. (In Russian). EDN: GSNQOD.
5. State Standard 17608-2017. Concrete paving slabs. Specifications. Moscow: Standartinform Publ, 2017. (In Russian).
6. State Standard 6665-91. Concrete and reinforced concrete curbs. Specifications. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1992. (In Russian).
7. State Standard 6665-2023. Concrete and reinforced concrete curbs. Specifications. Bishkek: Kyrgyz Standard, 2024. (In Russian).
8. Reznikova A.D. Frost resistance of road concrete for road coverings. In: *New science: history of formation, current state, development prospects*. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. Ufa, 2024, pp. 72–76. (In Russian). EDN: ESBAWN.
9. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Murashov A.O. Operational control of concrete frost resistance.

- Building materials*, 2024, no. 10, pp. 20–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-20-26>. EDN: ULZOWY.
10. Isachenko S., Kodzoev M.B. Analysis of methods to increase frost resistance of concrete. *Bulletin of Science and practice*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 291–294. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218428>. EDN: XMF XD V.
 11. Barkaya T.R., Brovkin A.V., Tsybina R.Z. Accelerated assessment of concrete frost resistance. In: *Construction Science 2013*. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Vladimir State University. 2013, pp. 65–70. (In Russian). EDN: VNEI W V.
 12. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
 13. State Standard 28570-2019. Concretes. Methods of strength determination on cores selected from structures. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
 14. State Standard 12730.1-2020. Concretes. Methods of determination of density. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
 15. State Standard 12730.3-2020. Concretes. Method of determination of water absorption. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
 16. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
 17. State Standard R 70753-2023. Concretes. Method of microscopic quantitative analysis of the structure of air pores. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023. (In Russian).
 18. Powers T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing, research and developments laboratories of the portland cement association. *Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, D.C., January 13–16. 1953, vol. 32, pp. 285–297.
 19. Powers T. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Proc. ACI*, 1945, vol. 41, pp. 245–272.
 20. Powers T. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. *Jorn. of Am. Concr. Inst.*, 1954, vol. 50, pp. 741–760.
 21. Powers T. The mechanism of frost action in concrete. *Cement, Lime and Gravel*, 1966, vol. 41, no. 5, pp. 143–148, 181–185.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Зиновьев[✉], аспирант, НИУ МГСУ, Москва; директор, ООО «Флагман», Королев
e-mail: flagman.Him@gmail.com

Alexander A. Zinoviev[✉], Graduate Student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; Director, Flagman LLC, Korolev
e-mail: flagman.Him@gmail.com

Борис Игоревич Булгаков, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: fakultetst@mail.ru

Boris I. Bulgakov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: fakultetst@mail.ru

Ольга Борисовна Ляпидевская, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва

Olga B. Lyapidevskaya, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32; 691.175.6; 620.197.3

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-71-82](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-71-82)**О.О. КУЗЬМИНОВ^{1,✉}, Н.И. ВАТИН²**

¹ Центр физики университетов Минью и Порту (CF-UM-UP), Университет Минью, кампус Азурем, 4800-058, Гимарайнш, Португалия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29Б, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

МЕТОД ОЦЕНКИ СПОСОБНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ К САМОЗАЛЕЧИВАНИЮ ПУТЕМ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Аннотация

Введение. Разработка цементных композитов, способных к самозалечиванию трещин, представляет собой перспективное направление повышения долговечности железобетонных конструкций и снижения затрат на их ремонт. Ускоренное восстановление водонепроницаемости после образования дефектов в бетоне актуально для гидротехнических и инфраструктурных объектов.

Цель. Оценка способности цементных материалов с гидроизоляционной добавкой к самовосстановлению, а также разработка и апробирование эффективной методики мониторинга проницаемости воды через искусственные дефекты контролируемого размера в бетоне.

Материалы и методы. Эксперименты проведены в лабораторных и полевых условиях в Португалии и России. Оценка проницаемости осуществлялась как экспресс-методами (визуально, по появлению пузырьков), так и с использованием специализированного оборудования (ВВ-2, установка по EN 12390-8, УФ-6). В работе сравнивались составы с наличием и без гидроизоляционной добавки, при величине дефектов в бетоне шириной 0,3–0,5 мм.

Результаты. Разработанная методика обеспечивает высокую точность оценки самозалечивания. Установлено, что добавка ускоряет восстановление водонепроницаемости; особенно выраженный эффект достигается для трещин 0,3 и 0,4 мм и при кислотной обработке поверхности. В полевых условиях наблюдается существенное снижение длины фильтрующих трещин и образование кристаллических отложений, подтверждающих химическое самовосстановление.

Выводы. Метод практичен для оценки самозалечивания цементных материалов. Гидроизоляционная добавка способствует полному восстановлению во-

донепроницаемости даже при наличии дефектов до 0,5 мм, сохраняя при этом паропроницаемость конструкции. Полученные результаты могут быть использованы для стандартизации оценки и повышения ремонтпригодности железобетонных сооружений.

Ключевые слова: бетон, самозалечивание, водонепроницаемость, трещина, гидроизоляционная добавка, цементные композиты, методы испытаний, ремонтпригодность, долговечность

Для цитирования: Кузьминов О.О., Ватин Н.И. Метод оценки способности цементных композитов к самозалечиванию путем оценки изменения проницаемости // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 71–82 DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-71-82](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-71-82). EDN: YXOVAX.

Вклад авторов

Кузьминов О.О. – постановка задачи, проектирование эксперимента, тестирование, лабораторные работы, обработка и анализ данных, подготовка рукописи.

Ватин Н.И. – анализ данных, редакция текста рукописи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.10.2025

Поступила после рецензирования 25.11.2025

Принята к публикации 27.11.2025

O.O. KUZMINOV^{1,✉}, N.I. VATIN²

¹ Centre of Physics of Minho and Porto Universities (CF-UM-UP), University of Minho, Azurém Campus, 4800-058, Guimarães, Portugal

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya str., 29B, St. Petersburg, 195251, Russian Federation

SELF-HEALING ABILITY AND WATERPROOFING OF CEMENTITIOUS MATERIALS WITH CRYSTALLINE ADDITIVE: DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF A PERMEABILITY MONITORING METHOD

Abstract

Introduction. The development of self-healing cementitious composites for cracks represents a promising approach to increasing the durability of reinforced concrete structures and reducing repair costs. Accelerated restoration of water resistance after defects in concrete is important for hydraulic engineering and infrastructure projects.

Aim. The aim of the study was to evaluate the self-healing ability of cementitious materials with a waterproofing additive and to develop and test an effective method for permeability monitoring through artificial defects of controlled size.

Materials and methods. Experiments were conducted in laboratory and field conditions in Portugal and Russia. Permeability was assessed using both rapid methods (visually, by the appearance of bubbles) and specialized equipment (BB-2, installation according to EN 12390-8, UVF-6). The study compared compositions with and without a waterproofing additive, monitoring defects of 0.3–0.5 mm in width.

Results. The developed method ensures highly accurate self-healing assessment. It has been established that the additive accelerates the restoration of water resistance; the effect is particularly pronounced for cracks of 0.3 and 0.4 mm and with acid treatment of the surface. Under field conditions, a significant reduction in the length of filter cracks and the formation of crystalline deposits confirming chemical self-healing are observed.

Conclusions. The method is practical for assessing the self-healing properties of cementitious materials. The waterproofing additive facilitates complete restoration of water resistance even with defects up to 0.5 mm, while maintaining the vapor permeability of the structure. The obtained results can be used to standardize the assessment and improve the maintainability of reinforced concrete structures.

Keywords: concrete, self-healing, water resistance, crack, waterproofing additive, cementitious composites, testing methods, maintainability, durability

For citation: Kuzminov O.O., Vatin N.I. Self-healing ability and waterproofing of cementitious materials with crystalline additive: development and assessment of a permeability monitoring method. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 71–82. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-71-82](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-71-82). EDN: YXOVAX.

Authors contribution statement

Kuzminov O.O. – problem formulation, experimental design, testing, laboratory work, data analysis, manuscript preparation.

Vatin N.I. – data processing and analysis, editing the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.10.2025

Revised 25.11.2025

Accepted 27.11.2025

Введение

Всем известно, что человеческий организм обладает способностью к регенерации. Во многих ситуациях – при незначительных повреждениях или ушибах – тело способно само восстанавливаться, и зачастую ему требуется лишь время. Аналогично появление железобетонных конструкций с подобными способностями к самозалечиванию могло бы значительно снизить затраты на их обслуживание.

Способность бетона самостоятельно залечивать трещины не является новинкой для инженеров. Известны случаи восстановления изгибной прочности цементированных балок [1], а также восстановления прочности бетона на сжатие после циклов замораживания – оттаивания [2, 3]. В данной работе особое внимание уделяется самозалечиванию трещин в бетоне и растворе, связанному с восстановлением водонепроницаемости. Поскольку нормативный способ оценки самозалечивания пока не определен, в статье представлен один из возможных подходов.

Материалы и методы

Данная работа включает эксперименты, проведенные в Португалии и России. Для сопоставления результатов российского и португальского этапов конвертировались классы водостойкости бетона из ГОСТ 12730.5-2018 [4] (обозначение W) в соответствующие классы стандарта EN 12390-8:2019 [5]. По данной корреляции классы W2 и W4 соответствуют глубине проникновения воды более 150 мм, W6 – 60–150 мм, W8 – 35–60 мм, с W10 до W14 – 20–35 мм, а с W16 до W20 – менее 20 мм.

Оценка проницаемости образцов осуществлялась как визуальным методом, так и методами количественной оценки. Визуальное наблюдение позво-

ляло увидеть степень прохождения жидкости через материал, например появление пузырьков воздуха в воде или регистрацию протечек. Количественные измерения проводились с использованием специализированного оборудования: для воздуха применялись прибор ВВ-2 (вакуумный метод), электрический компрессор (до 4 атм) и ручной насос для надувания шариков; для воды использовалась установка УФФ 6 (ГОСТ 12730.5-2018 [4], установка для испытаний по EN 12390-8 [5], а также отдельная система подачи водопроводной воды через редуктор давления. Важно отметить, что в экспериментах 1–3 размеры изготовленных образцов отличались от стандартных параметров, предусмотренных в [4, 5].

Подход комбинировал быструю экспресс-оценку (визуальные тесты – «В.») с точными количественными измерениями («К.»), обеспечивая всестороннюю оценку проницаемости материалов. В экспериментах использовалась водопроводная вода при комнатной температуре. Все методы и проведенные исследования представлены подробно в табл. 1. В столбце «Размер дефекта, мм» для большинства образцов указывается диаметр искусственно созданных каналов фильтрации с помощью лески соответствующего размера. В последней строке приводится измеренная ширина естественных раскрытий трещин, измерения были проведены с помощью линейки для расчета ширины трещин в бетоне. Названия цементным композициям присвоены по правилу: при смешивании цемента с водой получается тесто; добавление песка дает раствор, а введение крупного заполнителя – бетон. Кроме того, исследования проводились на армированной стальной арматурой бетонной стенке резервуара.

Таблица 1

Сводная таблица испытаний

Table 1

Summary test table

№ эксперим.	Вид композита	Размер дефекта, мм	Образцы (Ø (мм) × высота (мм))	Возраст, сутки	Место проведения испытаний	Вид теста (с давлением)			
						воздухом		водой	
						кач.	колич.	кач.	колич.
1	Тесто	0,4	26 × 140	2–65	СПбГУ (Санкт-Петербург)	+	+	–	–
2.1	Раствор	0,3; 0,4; 0,5	90 × 50	10–65	Университет Минью (Брага)	–	–	+	+
2.2	Раствор	0,3; 0,4; 0,5	90 × 50	10–65		–	–	+	+
3.1	Бетон	–	84 × 51	28		+	+	–	–
3.2	Бетон	0,4	84 × 51	132		–	–	+	–
4.1	Бетон	0,4	150 × 150	28	Железобетонные резервуары (Санкт-Петербург)	–	–	+	+
4.2	Бетон	–	150 × 150	218–274		+	–	+	+
4.3	Железобетон	0,1–0,5	–	48–193		–	–	+	+

Таблица 2

Составы цементных композитов, используемых в испытаниях
(расход на 1 м³ в кг)

Table 2

Compositions of cement composites used in tests
(consumption by kg per 1 m³)

№ смеси	Тип цемента	Вид композита	Цемент	Вода	Песок	Щебень	Пластификатор	Гидроизоляционная добавка	В/Ц
1	CEM I 52.5N	Тесто	1240	612	–	–	–	1	0,5
2	CEM I 42.5R	Раствор	313	197	1289	–	–	1	0,6
3	CEM II/B-L 32.5R	Бетон	320	160	890	1000	–	1	0,5
4	CEM I 52.5N	Бетон	280	140	800	1000	3	1	0,5

Для оценки свойств гидроизоляционной добавки Krystaline Add1 были протестированы четыре бетонные смеси (табл. 2). Для каждой из них были изготовлены две группы образцов: с добавкой из расчета 1 кг/м³ и без добавки.

Эксперимент 1

В эксперименте 1 использовалась смесь № 1 из табл. 2. Были изготовлены две серии (эксперимент № 1, табл. 1) по шесть образцов с использованием опалубки с закрепленной леской для создания сквозного канала фильтрации. Размеры и толщины лески указаны в строке 1 (табл. 1). После изготовления, распалубки и удаления лески выполнялась качественная проверка на воздухопроницаемость (рис. 1) путем наблюдения за присутствием или отсутствием образования пузырьков на нижней торцевой поверхности образца, погруженного в воду, при нагнетании воздуха на верхнюю торцевую поверхность с помощью ручного насоса. Образцы выдерживались в воде

в горизонтальном положении в течение 65 суток, после чего выполнялась визуальная проверка на воздухопроницаемость и количественная оценка воздухопроницаемости с помощью прибора ВВ-2.

Эксперимент 2

В эксперименте 2 использовалась смесь № 2 из табл. 2. Две серии образцов 2.1 и 2.2 (табл. 1) с каналами, выполненными леской, были изготовлены (рис. 2) и выдержаны при температуре (20 ± 2) °С и влажности ≥ 95 %. В серии 2.1 каналы не подвергались обработке, а в серии 2.2 они были обработаны 33%-ной соляной кислотой и выдержаны в течение 20 минут, после чего были промыты раствором NaOH и водой. Далее на образцы периодически подавалась вода под давлением 0,475 бар и измерялся расход воды, фильтрующейся через каналы. Измерения проводились через определенные временные интервалы в течение 66 дней. Между измерениями образцы хранились в воде в горизонтальном положении.

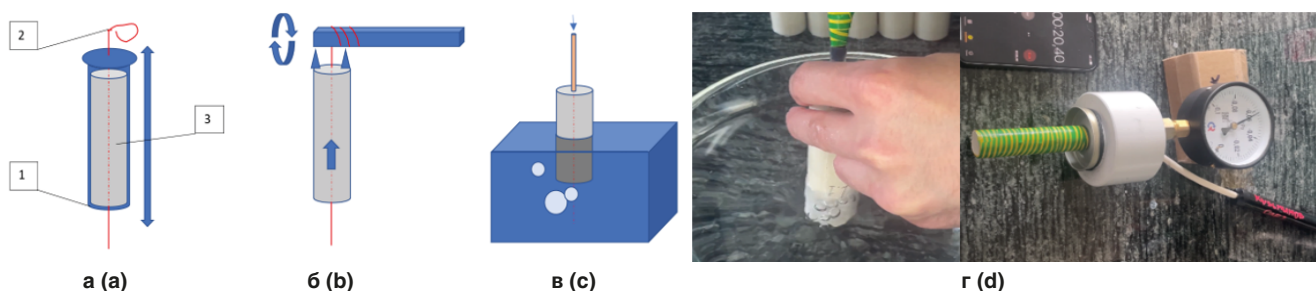


Рис. 1. Эксперимент 1: а – изготовление образца (1 – опалубка, 2 – леска заданной толщины, 3 – раствор цементного композита); б – удаление лески; в – качественная проверка на воздухопроницаемость (схема и фото); г – количественная проверка на воздухопроницаемость

Fig. 1. Experiment 1: a – sample production (1 – formwork, 2 – fishing line of a given thickness, 3 – cement composite mortar); b – removal of the fishing line; c – qualitative check for breathability (diagram and photo); d – quantitative check for breathability

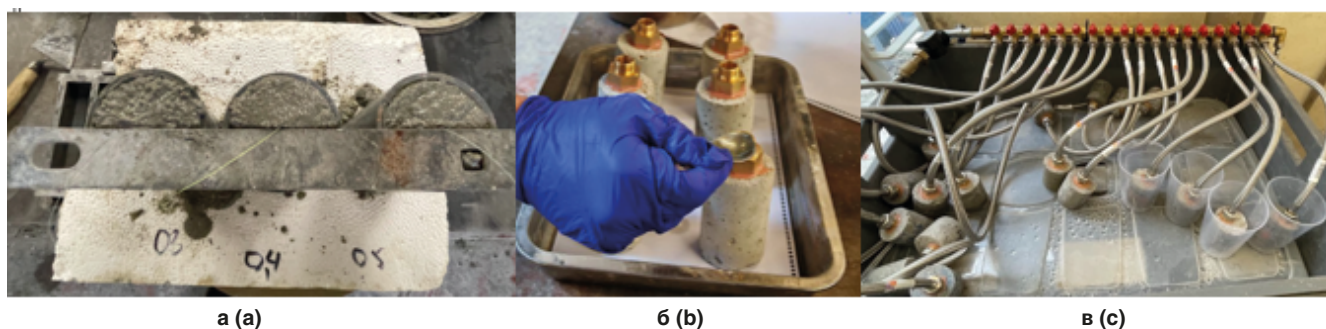


Рис. 2. Эксперимент 2: а – изготовление образцов; б – обработка раствором кислоты; в – измерение расходов воды
Fig. 2. Experiment 2: a – sample production; b – acid solution treatment; c – measurement of water flow

Эксперимент 3

В эксперименте 3 использовалась смесь № 3 из табл. 2. Были изготовлены две серии по шесть образцов: с каналом 0,4 мм и без него (серии 3.1 и 3.2 табл. 1, рис. 3). После удаления лески проверялась воздухопроницаемость. Образцы с каналами выдерживались в воде в течение 112 суток, после чего испытывались на водостойкость под давлением [5]. Образцы без каналов выдерживались в воде в течение 28 суток и испытывались на водонепроницаемость экспресс-методом по [4].

Эксперимент 4

В эксперименте 4 использовалась смесь № 4 из табл. 2. Была выбрана котельная (рис. 4) в Санкт-Петербурге с двумя железобетонными резервуарами (В35W12F200П4, эквивалент С30/37) для проведения полевых испытаний.

Производился отбор контрольных проб бетона, после чего гидроизоляционная добавка вводилась в смесь в бункер автобетоновоза и перемешивалась

не менее 10 минут, производился отбор проб бетона с добавкой. Далее выполнялось бетонирование с помощью бетонного насоса и технологии зимнего бетонирования с электропрогревом. После возведения сооружения и наполнения резервуаров водой наблюдались вертикальные трещины с просачиванием воды. Эксперимент состоял из трех частей: 4.1, 4.2, 4.3. В эксперименте 4.1 (рис. 5) две серии по шесть цилиндрических образцов были испытаны на водонепроницаемость методом «мокрого пятна». В эксперименте 4.2 (рис. 6) образцы с каналом от лески (0,4 мм) были испытаны на воздухопроницаемость на 1-е и 180-е сутки с помощью электрического компрессора давлением 4 бар, затем выдержаны в воде, высушены и исследованы по методу «мокрого пятна». В эксперименте 4.3 (рис. 4, 7) проводился периодический фотоконтроль просачивания воды через трещины в стенах заполненных водой резервуаров. План и разрез конструкции показаны на рис. 7.

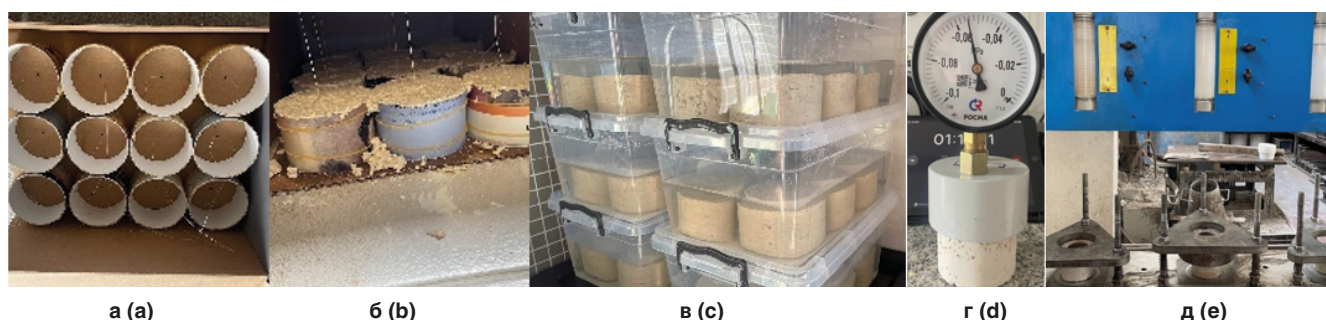


Рис. 3. Эксперимент 3: а – опалубка; б – изготовление образцов; в – хранение образцов; г – испытание на водонепроницаемость прибором ВВ-2; д – образцы в установке по [5]

Fig. 3. Experiment 3: a – formwork; b – sample production; c – sample storage; d – waterproofness test with the BB-2 device; e – samples in the device according to [5]



Рис. 4. Эксперимент 4. Фотография сооружения в процессе возведения
Fig. 4. Experiment 4. Photograph of the structure in the process of construction

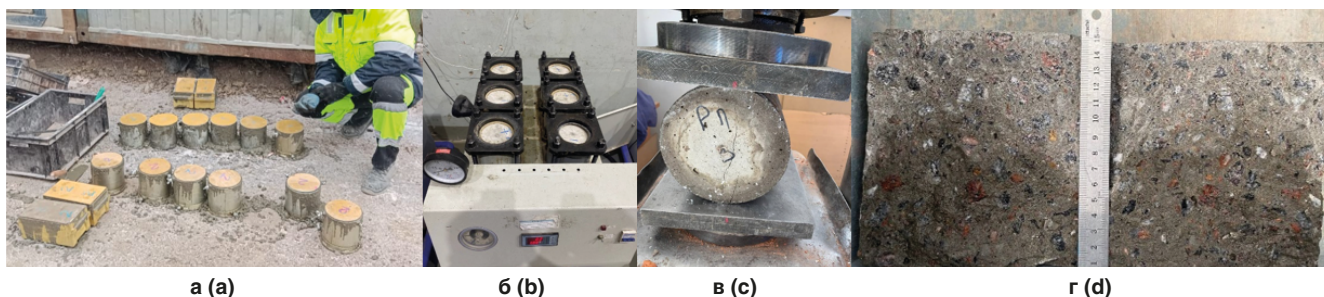


Рис. 5. Эксперимент 4.1: а – изготовление образцов; б – проведение испытаний на водонепроницаемость; в – раскол образца; г – измерение глубины проникновения воды
Fig. 5. Experiment 4.1: a – sample production; b – waterproofness test conducting; c – example splitting; d – the depth of water penetration measurement

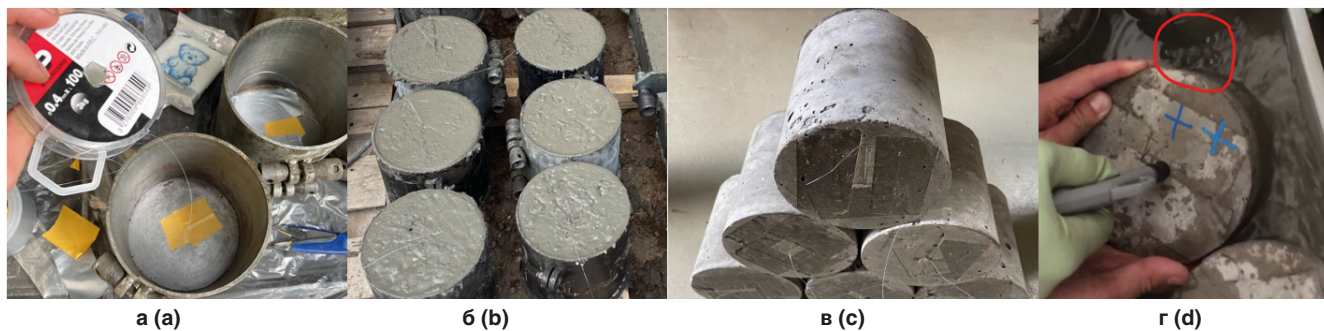


Рис. 6. Эксперимент 4.2: а – подготовка опалубки; б – изготовление образцов; в – внешний вид образцов; г – визуальный тест на воздухопроницаемость образца (пузырьки выделены красным)
Fig. 6. Experiment 4.2: a – formwork preparation; b – samples production; c – appearance of the samples; d – visual test for breathability of the sample (bubbles are highlighted in red)

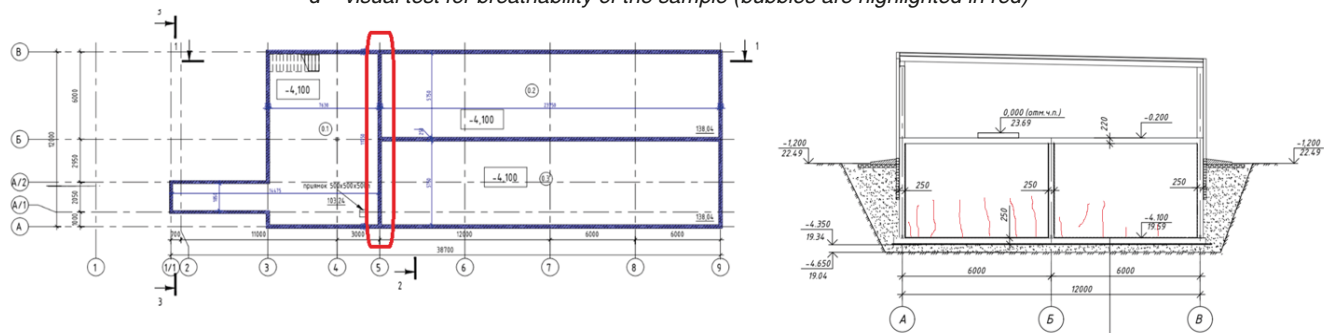


Рис. 7. Эксперимент 4.3: план и разрез сооружения с выделенной стеной, на которой образовались трещины
Fig. 7. Experiment 4.3: structure plan and section with a highlighted wall on which cracks have formed

Результаты

Результаты эксперимента 1

Испытания теста по методике [4] на вакуумном приборе (ВВ-2) показали:

– Состав 1 сохранял полную воздухопроницаемость в течение всего срока испытаний (6 из 6 образцов с пузырьками), что соответствует марке по водонепроницаемости W0.

– 3 из 6 образцов из состава 2 через 65 суток перестали пропускать воздух, повысив марку по водонепроницаемости до W8.

Результаты эксперимента 2

Для наглядной и компактной визуализации данных обе экспериментальные серии – без кислотной обработки и с обработкой 33%-ной HCl – объединены на одном графике (рис. 8). На графике показано снижение фильтрации воды через образцы во времени

для различных составов и ширины трещин: контрольные образцы С1 («1_ширина канала в мм») и образцы с гидроизоляционной добавкой С2 («2_ширина канала в мм»).

Результаты эксперимента 3

В эксперименте 3.1 среднее время поддержания вакуума для состава С1 составило 160 секунд, что соответствует марке по водонепроницаемости W8 и глубине проникновения воды 35–60 мм по стандарту [5] (табл. 3). Для состава С2 среднее время поддержания вакуума составило 373 секунды, что соответствует марке по водонепроницаемости W14 и глубине проникновения воды 20–35 мм. Максимальное значение было зафиксировано для образца 5 состава С2 и достигло 638 секунд.

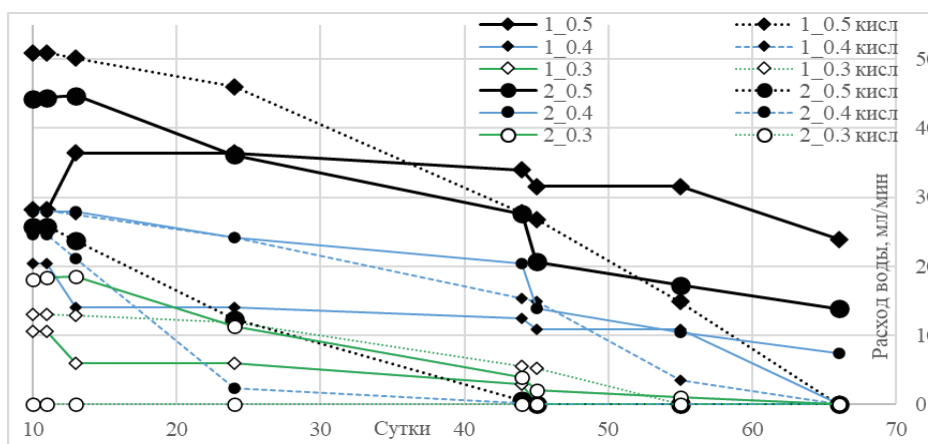


Рис. 8. Результаты эксперимента 2. График изменения расходов воды
Fig. 8. Experiment 2 results. Graph of changes in water consumption

Эксперимент 3. Результаты хронометрических измерений части образцов

Таблица 3

Experiment 3. Results of chronometric measurements of the part of samples

Table 3

Образец	Время поддержания вакуума, с	Рассчитанная марка по [4], W	Глубина проникновения воды по [5], мм
1.1	92	W8	35–60
1.2	127		
1.3	219		
1.4	160		
1.5	184		
1.6	179		
2.1	479	W14	20–35
2.2	422		
2.3	39		
2.4	107		
2.5	638		
2.6	356		

В эксперименте 3.2 при испытании образцов с каналами фильтрации диаметром 0,4 мм под давлением воды 0,5 МПа в течение 72 часов фильтрация воды наблюдалась у 5 из 6 образцов состава С1, тогда как для состава С2 фильтрация наблюдалась только у 2 из 6 образцов (табл. 4). Примеры проверки наличия или отсутствия воды в отверстии от лески при давлении представлены на рис. 9.

Результаты эксперимента 4

В части 4.1 водонепроницаемость контрольного состава по [4] соответствовала марке W12, а водонепроницаемость состава с гидроизоляционной добавкой достигла W20.

В части 4.2 (табл. 5) для контрольных образцов без добавки пузырьки наблюдались в 5 из 6 образцов

при начальном испытании на воздухопроницаемость, а после окончательного испытания – только в одном образце. При испытании на водонепроницаемость признаки фильтрации отсутствовали в 3 из 6 образцов на всех ступенях, проявились при низком давлении в двух образцах и в одном образце только при максимальном давлении. Средняя прочность на разрыв при раскалывании равна 2,56 МПа при классе водонепроницаемости W0.

В серии с добавкой (табл. 6) пузырьки наблюдались во всех 6 образцах при начальном испытании и в 4 из 6 после окончательного испытания. Средняя прочность на разрыв при раскалывании – 2,87 МПа, класс водонепроницаемости – W8.

Эксперимент 3. Наличие или отсутствие фильтрации воды при давлении воды 0,5 МПа в течение 72 часов

Таблица 4

Table 4

Experiment 3. Presence or absence of water filtration at a water pressure of 0.5 MPa for 72 hours

Номер образца	1	2	3	4	5	6
Состав 1	–	+	+	+	+	+
Состав 2	–	–	–	+	–	+



Рис. 9. Эксперимент 3. Примеры проверки наличия или отсутствия воды в отверстии от лески при давлении 0,5 МПа. Слева отсутствует «–», справа присутствует «+»

Fig. 9. Experiment 3. An example of checking of the presence or absence of water in the hole from the fishing line at a pressure of 0.5 MPa. On the left there is no “–”, there is a “+” on the right

Эксперимент 4. Часть 4.2. Результаты образцов контрольного состава без гидроизоляционной добавки

Таблица 5

Table 5

Experiment 4. Part 4.2. Results of control composition samples without waterproofing additive

Параметр	Результаты					
	1	2	3	4	5	6
Проверка воздухопроницаемости начальная: «+» – есть пузырьки, «–» – нет пузырьков	+	+	+	–	+	+

Продолжение таблицы 5

Параметр	Результаты					
	1	2	3	4	5	6
Проверка воздухопроницаемости образцов конечная: «+» – есть пузырьки, «-» – нет пузырьков	-	+	-	-	-	-
Испытание на водонепроницаемость. Появление признаков фильтрации при заданном давлении воды в МПа в течение 16 часов: «+» – есть, «-» – нет	- (0,2)	+ (0,2)	+ (0,2)	- (0,2)	- (0,2)	- (0,2)
	- (0,4)	+ (0,4)	+ (0,4)	- (0,4)	- (0,4)	- (0,4)
	- (0,6)	+ (0,6)	+ (0,6)	- (0,6)	- (0,6)	- (0,6)
	- (0,8)	+ (0,8)	+ (0,8)	- (0,8)	- (0,8)	- (0,8)
	- (1,0)	+ (1,0)	+ (1,0)	- (1,0)	- (1,0)	- (1,0)
	- (1,2)	+ (1,2)	+ (1,2)	- (1,2)	- (1,2)	- (1,2)
	- (1,4)	+ (1,4)	+ (1,4)	- (1,4)	- (1,4)	- (1,4)
	- (1,6)	+ (1,6)	+ (1,6)	- (1,6)	- (1,6)	- (1,6)
	- (1,8)	+ (1,8)	+ (1,8)	- (1,8)	- (1,8)	- (1,8)
	- (2,0)	+ (2,0)	+ (2,0)	- (2,0)	+ (2,0)	- (2,0)
Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	3,02	2,31	1,41	3,21	3,25	2,17

Таблица 6

Эксперимент 4. Часть 4.2. Результаты образцов состава с гидроизоляционной добавкой

Table 6

Experiment 4. Part 4.2. Results of samples of the composition with a waterproofing additive

Параметр	Результаты					
	1	2	3	4	5	6
Проверка воздухопроницаемости начальная: «+» – есть пузырьки, «-» – нет пузырьков	+	+	+	+	+	+
Проверка воздухопроницаемости образцов конечная: «+» – есть пузырьки, «-» – нет пузырьков	-	-	+	+	+	+
Испытание на водонепроницаемость. Появление признаков фильтрации при заданном давлении воды в МПа в течение 16 часов: «+» – есть, «-» – нет	- (0,2)	- (0,2)	- (0,2)	- (0,2)	- (0,2)	- (0,2)
	- (0,4)	+ (0,4)	- (0,2)	- (0,4)	- (0,4)	- (0,4)
	- (0,6)	+ (0,6)	- (0,4)	- (0,6)	- (0,6)	- (0,6)
	- (0,8)	+ (0,8)	- (0,6)	- (0,8)	- (0,8)	- (0,8)
	- (1,0)	+ (1,0)	- (0,8)	+ (1,0)	- (1,0)	- (1,0)
	- (1,2)	+ (1,2)	- (1,0)	+ (1,2)	- (1,2)	- (1,2)
	- (1,4)	+ (1,4)	- (1,2)	+ (1,4)	- (1,4)	- (1,4)
	- (1,6)	+ (1,6)	- (1,4)	+ (1,6)	- (1,6)	- (1,6)
	+ (1,8)	+ (1,8)	+ (1,6)	+ (1,8)	- (1,8)	- (1,8)
	+ (2,0)	+ (2,0)		+ (2,0)	- (2,0)	- (2,0)
Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	3,00	3,05	3,05	3,19	1,85	3,05

В части 4.3, на 1-е сутки после заполнения резервуара, было зафиксировано 11 трещин длиной до 1,8 метра, все с визуальными признаками фильтрации (влажные пятна, подтекание). К 7-м суткам количество трещин увеличилось до 13, в устьях большинства трещин появились новые белые образования, фильтрация снизилась в трещинах 5 и 6 и уве-

личилась в трещине 9 (рис. 10–12). На 56-е сутки фильтрация во всех трещинах снизилась в среднем на 87 %, а количество белых образований заметно увеличилось. Эти изменения хорошо видны на рис. 10–12 и более подробно на масштабных изображениях выбранных трещин на рис. 13 и 14.

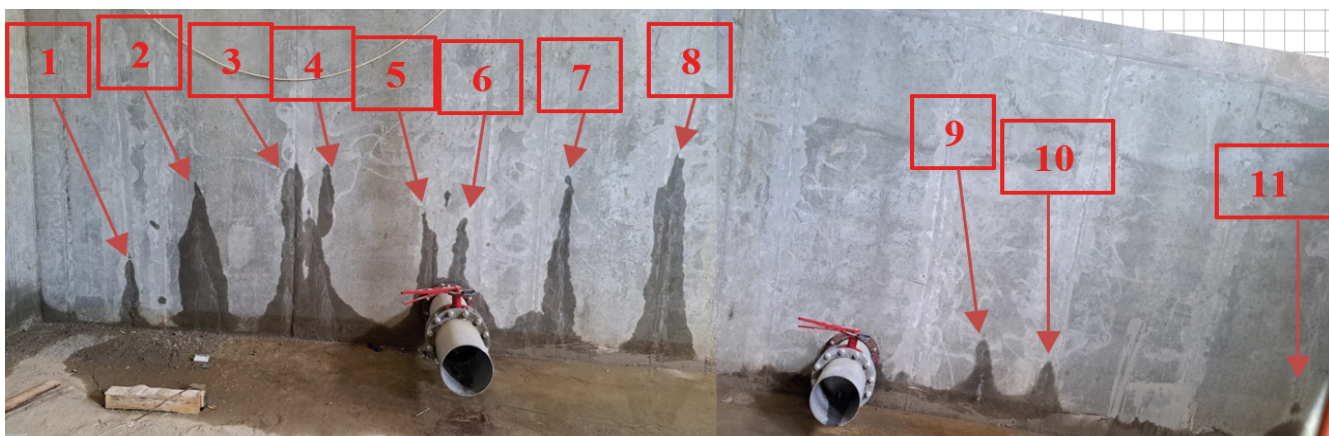


Рис. 10. Фотографии состояния трещин через 1 день после заполнения резервуара
 Fig. 10. Photos of the condition of cracks 1 day after filling the tank

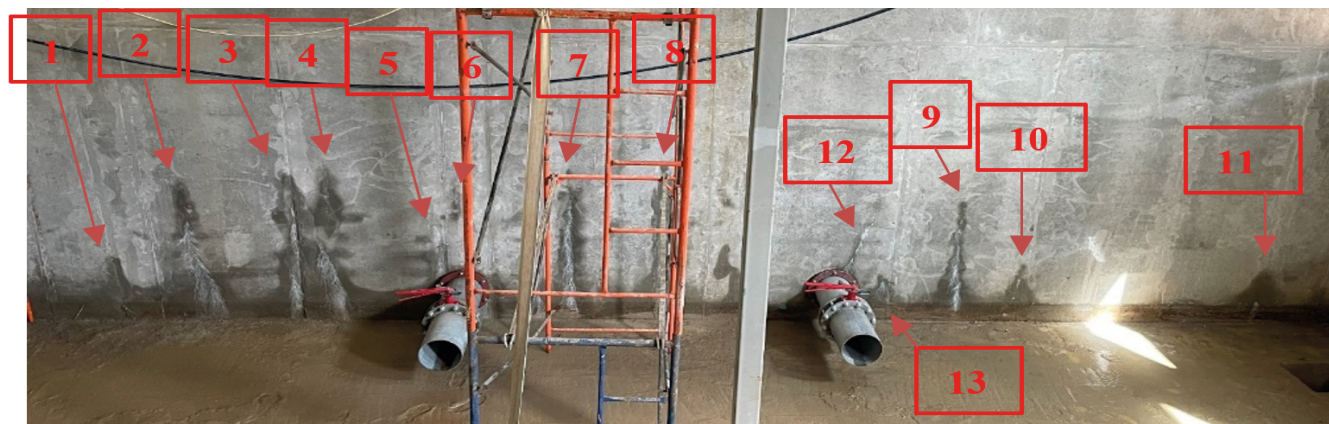


Рис. 11. Фотографии состояния трещин на 7-й день после заполнения резервуара
 Fig. 11. Photos of the condition of cracks on the 7th day after the tank filling



Рис. 12. Фотографии состояния трещин через 56 дней после заполнения резервуара
 Fig. 12. Photos of the condition of cracks 56 days after the tank filling



Рис. 13. Масштабированные фотографии состояния трещины № 2
 Fig. 13. Scaled photographs of the condition of crack No. 2



Рис. 14. Масштабированные фотографии состояния трещины № 2
 Fig. 14. Scaled photographs of the condition of crack No. 2

Количественные результаты показаны в табл. 7, где измерялась длина каждой трещины со следами фильтрации воды (мокрая поверхность), начиная от пере-

сечения трещины с уровнем пола до того места, где фильтрация уже не наблюдалась и трещина была сухая.

Таблица 7

Количественные результаты по 1 части раздела А

Table 7

Quantitative results for part 1 of section A

№ трещины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Длина фильтрации на 0 сутки, см	62	129	149	145	75	54	156	180	62	54	50	0	0
Длина фильтрации на 7 сутки, см	70	153	156	154	33	22	172	188	150	73	65	53	53
Длина фильтрации на 56 сутки, см	16	17	16	15	0	0	15	15	15	16	26	0	15
Уменьшение длины фильтрации на 56 день к макс знач. 1 и 7 дней, %	77	89	90	90	100	100	91	92	90	78	60	100	72

Выводы

Предложен и апробирован новый метод оценки способности цементных материалов к самозалечиванию, основанный на мониторинге изменения проницаемости через искусственно созданные отверстия контролируемого диаметра. Метод обеспечивает высокую точность, воспроизводимость и применимость как в лабораторных, так и в полевых условиях, позволяя комплексно оценивать восстановительные свойства различных цементных композитов.

1. Методика обеспечивает стандартизированное формирование модельных трещин, что повышает эффективность сравнения результатов.

2. Добавление гидроизоляционной добавки значительно ускоряет процесс восстановления водонепроницаемости, особенно для трещин шириной 0,3–0,4 мм, а также при применении кислотной обработки поверхности.

3. Восстановление водонепроницаемости в цементных композитах достигается не ранее 10–66 суток от начала контакта с водой в зависимости от размеров дефекта и условий испытаний.

4. Наличие пузырьков воздуха под давлением не всегда означает отсутствие герметизации, так как воздух и пар могут проходить через микроканалы при прекращении фильтрации воды.

5. Сохранение паропроницаемости после восстановления водонепроницаемости важно для конструкций, подверженных влагообмену.

6. Кислотная обработка способствует частичной герметизации отверстий и может быть использована в конструкциях при условии введения в цементный композит капсул, высвобождающих кислоту при образовании дефекта.

Таким образом, разработанный метод может являться практичным и надежным инструментом для стандартизированной оценки способности цементных материалов к самозалечиванию. Его внедрение может способствовать повышению долговечности и ремонтпригодности конструкций из цементных композитов.

Список литературы / References

1. Ferrara L., Krelani V., Carsana M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 68, pp. 535–551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008>.
2. Jacobsen S., Gran H.C., Sellevold E.J., Bakke J.A. High strength concrete-freeze thaw testing and cracking. *Cement and Concrete Research*, 1995, vol. 25, pp. 1775–1780. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00173-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00173-5).
3. Jacobsen S., Marchand J., Boisvert L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete. *Cement and Concrete Research*, 1996, vol. 26, pp. 869–881. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00072-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00072-5).

4. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
4. State Standard 12730.5-2018. Concretes. Methods for determination of water tightness. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
5. EN 12390-8:2019. Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure. 2019.

Информация об авторах / Information about the authors

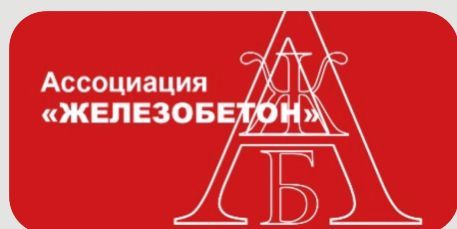
Олег Олегович Кузьминов[✉], PhD студент, центр физики университетов Минью и Порту (CF-UM-UP), Университет Минью, Гимарайнш
e-mail: ge.shicht@gmail.com

Oleg O. Kuzminov[✉], PhD student, Center for Physics at the Universities of Minho and Porto (CF-UM-UP), University of Minho, Guimarães
e-mail: ge.shicht@gmail.com

Николай Иванович Ватин, директор НТЦ, передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
e-mail: vatin@mail.ru

Nikolay I. Vatin, Director of the Scientific and Technical Center, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
e-mail: vatin@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



АССОЦИАЦИЯ «ЖЕЛЕЗОБЕТОН»
 ASSOCIATION FOR STRUCTURAL CONCRETE
 ИНН 7721262164, КПП 772101001, ОГРН 1037721030390
 109428, Россия, г. Москва, Рязанский проспект, д. 22
 web: azhb.ru
 email: info@azhb.ru
 +7 (499) 170-60-13

ИТОГИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АЖБ В 2025 ГОДУ RESULTS OF ASC ACTIVITIES IN 2025

ЯНВАРЬ

- Для решения задач технического инжиниринга при реконструкции индустрии бетона и железобетона современным технологическим оборудованием и потребности в высококомпетентной команде специалистов-практиков создан **ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ Ассоциации «Железобетон» (ИЦК АЖБ)**.
- В соответствии с планом мероприятий по развитию промышленности стройматериалов № МД-П9-16495 разработан и представлен в департамент станкостроения и тяжелого машиностроения Минпромторга РФ перечень критического оборудования для производства строительных материалов.
- Ассоциацией «Железобетон» совместно с департаментом станкостроения и тяжелого машиностроения Минпромторга РФ проведен опрос заводов ЖБИ и ДСК о критическом состоянии их технологического оборудования и потребности производства в ремонте и реконструкции. Выявлены проблемы с отказами импортного оборудования, поддержка которого прекращена в связи с введением санкций.
- Состоялось общее собрание членов Ассоциации, на котором были подведены итоги 2024 года. Собрание прошло в комбинированном формате (очно и ВКС). На собрании была утверждена новая Стратегия развития АЖБ на ближайшие пять лет, которая направлена на укрепление позиций Ассоциации в отрасли, повышение уровня компетенций и внедрение инновационных решений. Также был утвержден план работ и бюджет на предстоящий период.

МАРТ

- Разработаны рекомендации АЖБ к техническому заданию **на автоматизированную систему управления бетоносмесительным узлом (АСУ ТП БСУ)**.
- Ассоциация «Железобетон» выпустила отчет по техрегулированию 2024 г.

АПРЕЛЬ

- В рамках реализации плана работ Ассоциации 2025 года разработан и представлен информационный буклет по существующим мерам поддержки для предприятий индустрии.

ИЮНЬ

- Подтверждено партнерское соглашение между РИЛЕМ и Ассоциацией «Железобетон», предложено открыть совместный чат на русском языке. Для членов Ассоциации предоставлен доступ к материалам международной Федерации железобетона *fib* после запроса на получение ключей доступа через специальную форму.
- По запросу Минпромторга РФ в департаменте металлургии и материалов Минпромторга РФ разработан и представлен перечень критической продукции подотрасли бетона и железобетона.
- Индустриальный центр компетенций АЖБ запускает пилотный проект с поддержкой ФРП с целью отработки алгоритмов взаимодействия участников проекта и ФОИВов.
- Ассоциацией «Железобетон» подготовлено и выпущено ежегодное аналитическое исследование о состоянии индустрии бетона и железобетона.

- Ассоциацией «Железобетон» организована и проведена I Всероссийская конференция «От импорта технологий к технологическому суверенитету»
- Конференция стала площадкой для диалога между бизнесом, наукой и государством и позволила наметить конкретные шаги для снижения импортозависимости. Участники конференции отметили важность, актуальность и необходимость проведения таких мероприятий.

ИЮЛЬ

- Для решения проблем кадрового потенциала Ассоциация «Железобетон» вошла в отраслевой консорциум среднего профессионального образования в сфере строительства НОСТРОЙ. Сформирована дорожная карта совместной деятельности.

АВГУСТ

- Начата работа с ТПП РФ, в частности с комитетом по предпринимательству в сфере строительства (Е.В. Басин), по вопросу совместного сотрудничества в сфере производства бетона и ЖБИ
- По приглашению председателя комитета ТПП РФ по предпринимательству в сфере строительства Е.В. Басина президент Ассоциации «Железобетон» Д.В. Кузеванов и генеральный директор АО «СТМ» С.П. Копша приняли участие в совещании по подготовке заседания по вопросам выработки системных инструментов по решению задач регулирования и управления рынком производителей оборудования и железобетона, ориентированного на середину октября. Обсудили меры государственной поддержки для предприятия в сфере бетона и железобетона, представленные Д.В. Кузевановым. С.П. Копша доложил, что, хотя формально есть возможность воспользоваться данными мерами, многие предприятия – как производители оборудования, так и производители ЖБИ – фактически отрезаны от возможности получить финансирование от государства. Среди наиболее важных причин – предприятия должны доказать высокий уровень «российскости» (85%) оборудования и пройти верификацию, есть вопросы по отнесению машиностроительной деятельности и продукции машиностроения к классификаторам ОКПД 2 и ОКВЭД. В итоге сформирована рабочая группа по подготовке заседания, посвященного озвученным проблемам.

СЕНТЯБРЬ

- По инициативе Ассоциации «Железобетон» в ТК 400 Росстандарта создана профильная рабо-

чая группа, которая займется разработкой и актуализацией стандартов для технологического оборудования, используемого в строительной отрасли. Это позволит решить ключевую проблему производителей ЖБИ: отсутствие современных стандартов мешало получению господдержки на модернизацию и импортозамещение оборудования.

- АЖБ совместно с АО «НИЦ «Строительство» проводит авторский курс повышения квалификации «Контроль прочности бетона: методы, стандарты, практика».
- Прошла XIV Международная научно-практическая конференция по технологиям бетонов ВЕТОН CONF 2025. Организатором конференции традиционно выступила компания «Полипласт Новомосковск» – член АЖБ и один из крупнейших производителей промышленной химии Российской Федерации. Ассоциация «Железобетон» выступила партнером конференции
- В конференции приняли участие поставщики оборудования и материалов, а также члены и руководство Ассоциации «Железобетон»
- На конференции был представлен научно-технический журнал АЖБ «Бетон и железобетон». Конференция уже в 14-й раз стала площадкой для обмена опытом между специалистами строительной отрасли, связующим звеном между производителями, НИИ, контролирующими организациями, поставщиками оборудования и материалов.
- В рамках деловой программы XVI Всероссийской конференции «Российский строительный комплекс» на форуме «Устойчивое развитие» прошла тематическая сессия «Интенсификация и индустриализация строительства»
- Ассоциация «Железобетон» приняла участие в дискуссии «Интенсификация и индустриализация строительства». Президент Ассоциации «Железобетон» Д.В. Кузеванов рассказал о мерах государственной поддержки производителей строительных материалов и технологического оборудования для индустрии бетона и железобетона, возможностях для привлечения средств на НИОКР для их совместного проведения, а также поделился аналитикой и опытом подобных работ.
- АЖБ – участник Международного строительного форума и выставки 100+ TechnoBuild в Екатеринбурге и дискуссий на открытом заседании ПК 21 ТК 465 по направлению стандартизации исследований бетона и железобетона, посвященных развитию технологий производства бетона и железобетона.

СЕНТЯБРЬ

- в Краснодаре успешно завершилась конференция, посвященная современным бетонам и инновациям в строительной отрасли
- Итоги конференции двумя словами: два дня, 15 обстоятельных докладов, 120 человек + онлайн слушатели, сборник трудов конференции и два тематических номера в журнале «Бетон и железобетон», а также море общения, профессионализма и экспертизы.

НОЯБРЬ

- Состоялось заседание комитета ТПП РФ по предпринимательству в сфере строительства совместно с Ассоциацией «Железобетон». Участники обсудили вопросы текущей ситуации на рынке производства оборудования, проблемы импортозамещения в секторе железобетонных изделий, в том числе:
 - вопросы стандартизации и сертификации продукции;
 - перспективы развития производственных мощностей;
 - координацию действий участников рынка;
 - разработку механизмов поддержки производителей;
 - совершенствование нормативно-правовой базы;
 - стимулирование инновационных разработок.
- Президент АЖБ Д.В. Кузеванов вошел в состав комитета по предпринимательству в сфере строительства Торгово-промышленной палаты РФ.
- Советом Ассоциации «Железобетон» принято решение о вступлении АЖБ в ТПП РФ. Решением председателя комитета по предпринимательству в сфере строительства Торгово-промышленной палаты РФ Е.В. Басина в составе комитета создается подкомитет по бетону и железобетону во главе с председателем Д.В. Кузевановым. АЖБ начинает формирование состава подкомитета.
- АЖБ принимает участие в круглом столе, проводимом членом АЖБ АО «ЦНИИПЗ» на тему обсуждения ГОСТ Р «Модульные здания и конструкции. Технические условия». В ходе встречи эксперты обсудили целесообразность возвращения к индустриальному домостроению, перспективы восстановления мощностей ДСК и создания новых предприятий по производству блочных конструкций, а также поделились мнениями о том, какие проектные решения сегодня оптимальны для зданий с использованием сборных ЖБК.

ДЕКАБРЬ

- Члены Ассоциации «Железобетон» в течение года принимали активное участие в крупнейших отраслевых международных конференциях и выставках бетонной и строительной отрасли. В конце сентября Ярстройтехника и Си Джи Эм представили свое оборудование и достижения на выставке «ИННОПРОМ. Беларусь» в г. Минске. А в конце ноября компания ВРК демонстрирует высокий уровень, представив свою продукцию на международной строительной выставке в Дубае.

В настоящее время Ассоциация «Железобетон» объединяет **49** участников, занятых в производстве ЖБИ, технологического оборудования, научных и проектных институтов, расположенных в **29** регионах России. В 2025 году новыми членами АЖБ стали **6** представителей индустрии бетона и железобетона, а также технологического оборудования.



АО «НИЦ «Строительство» — это почти 100-летний опыт исследований и достижений в области строительной науки.

Мы – команда единомышленников, способных реализовать самые сложные инженерные проекты.

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВИЧОВА

📍 г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6

☎ +7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80

🌐 www.cstroy.ru

✉ motorina@cstroy.ru | smirnova@cstroy.ru



ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»
ПРЕДЛАГАЕТ ВЕСЬ СПЕКТР
ИНЖИНИРИНГОВЫХ УСЛУГ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА



повысить квалификацию
специалистов и экспертов

пройти обучение в аспирантуре

подготовить диссертацию в докторантуре

защитить диссертацию на соискание ученой
степени **кандидата наук**, на соискание ученой
степени **доктора наук**

Учебный центр
АО «НИЦ «Строительство»
приглашает вас:





АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- — в области инженерных изысканий
- — в области проектирования
- — в области строительства
- — по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- — разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов



Преподавательский состав Учебного центра

- — лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- — учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Обучение в аспирантуре, докторантуре

Прикрепление для подготовки диссертации без освоения образовательных программ



Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению 08.06.01 «Техника и технология строительства» по направлениям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»



В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГВОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА

ЦОК

центр
оценки
квалификации

**НЕЗАВИСИМАЯ
ОЦЕНКА КВАЛИФИКАЦИИ**

*Для успешного прохождения
профессионального экзамена мы
проводим курс обучения
для подготовки к прохождению
независимой оценки квалификации
специалистов*



**Контактная информация для
консультаций и подачи заявок:
тел.: +7 (495) 174-73-80;
+7 (495) 602-00-70 (доб. 1222);
e-mail: cok-info@cstroy.ru**