

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0005-9889

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

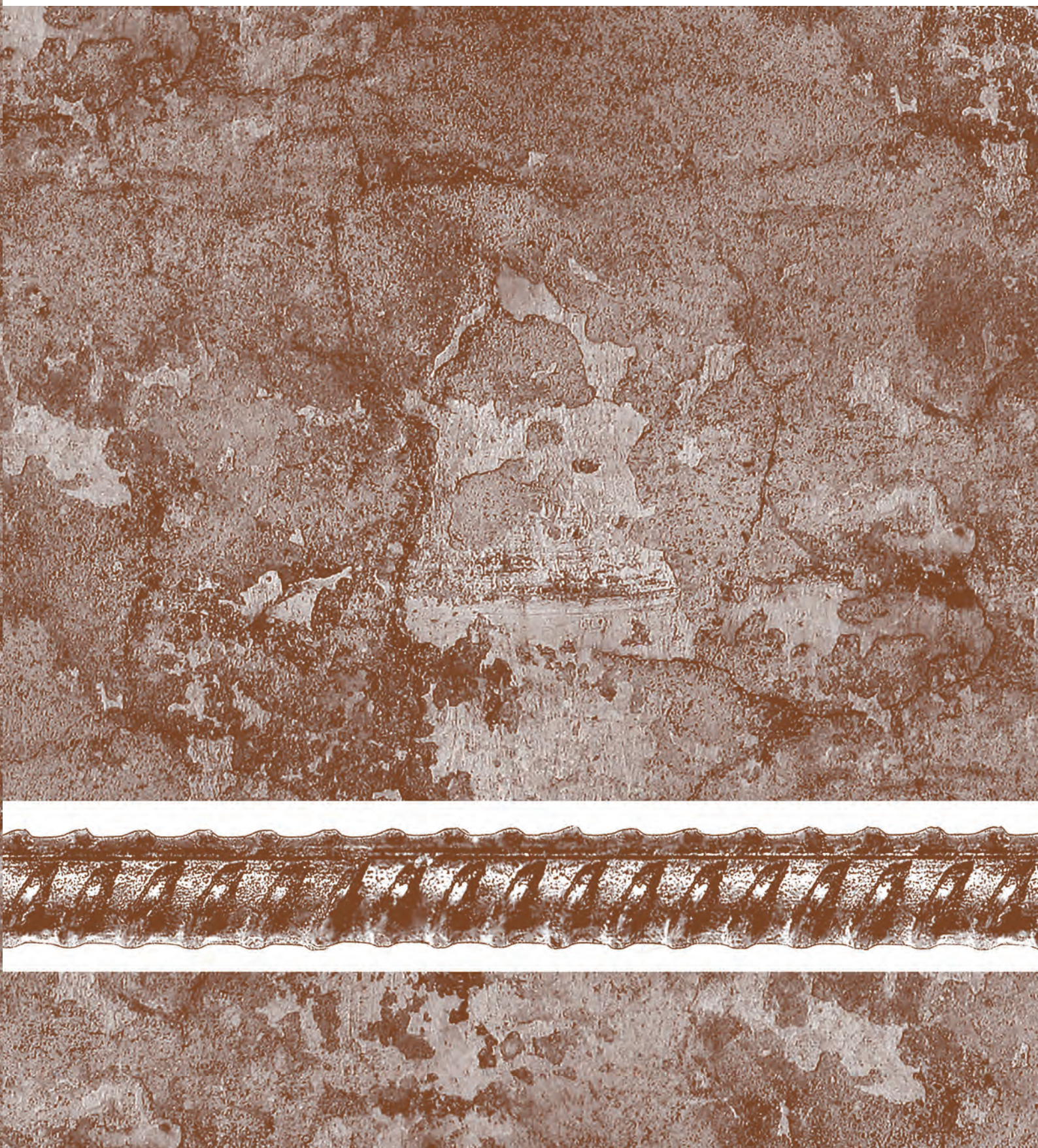
6

614

2022

WWW.RIFSM.RU

ИЗДАЕТСЯ С 1955 ГОДА



Главная выставка строительной техники
и технологий в России

23—26 мая 2023

Крокус Экспо, Москва

СТТ
EXPO



www.ctt-expo.ru

При поддержке

 **Крокус Экспо**
Международный выставочный центр

ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

- Строительная техника и транспорт
- Производство строительных материалов
- Добыча, обогащение и транспортировка полезных ископаемых
- Запчасти и комплектующие для машин и механизмов. Смазочные материалы

Учредитель: Ассоциация «Железобетон»
Адрес: 109428, г. Москва, Рязанский просп., д. 22, корп. 2
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского, д. 9, корп. 1, кв. 1
 Зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ
 Пер. ПИ № ФС 77-76959 от 09.10.2019
 ISSN 0005-9889 (Print)
 Основан: Институт НИИЖБ Госстроя СССР и ВНИИЖелезобетон Минстройматериалов СССР

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

**6 (614)
Ноябрь–декабрь 2022**

В.Р. ФАЛИКМАН, А.В. АНЦИБОР

Развитие методов контроля в прочности бетонов и растворов в новом ГОСТ Р 70307–2022

«Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности

в тонкостенных и тонкослойных конструкциях» 3

И.С. КУЗНЕЦОВА, В.Г. РЯБЧЕНКОВА, Ю.С. РЯЗНИНА

Новый государственный стандарт на методы испытаний бетонов при температурных воздействиях 8

Р.О. РЕЗАЕВ, А.А. ДМИТРИЕВ, Д.В. ЧЕРНЯВСКИЙ

Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Ч. II (Практика) 12

В.В. ДЬЯЧКОВ, С.О. СЛЫШЕНКОВ

Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Злы-Дабба» 25

М.Ю. ТИТОВ, Л.А. ТИТОВА, М.И. БЕЙЛИНА

Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов 33

Международный строительный форум и выставка 100+ TechnoBuild (Информация). 38

Международная научно-практическая конференция BetONconf'2022 (Информация) 39

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, Е.Е. ШАЛЫЙ, Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ,

А.В. СТЕПАНОВА, В.В. МАЛЮК, А.В. КОЛОДЕЙ

Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии:

анализ методологии и приложений 40

Указатель статей, опубликованных в журнале «БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН» в 2022 г. 51

Редакционная коллегия

ЗВЕЗДОВ А.И., главный редактор, д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, АО НИЦ «Строительство» (Москва)

АРХИПКИН А.А., зам. главного редактора, Ассоциация «Железобетон» (Москва)

ГРАНЕВ В.В., д-р техн. наук, заместитель генерального директора – научный руководитель, АО «ЦНИИПромзданий» (Москва)

ГУСЕВ Б.В., д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии», РУТ/МИИТ (Москва)

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

КУЗЕВАНОВ Д.В., канд. техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)

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

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

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

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

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

СТЕПАНОВА В.Ф., д-р техн. наук, заведующая лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)

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

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

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

ФАЛИКМАН В.Р., канд. хим. наук, д-р материаловедения, руководитель Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)

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

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: Россия, 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3
Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36
E-mail: mail@rifsm.ru
http://azhb.ru/ **http://www.rifsm.ru**

Founder of the journal:

«Reinforced concrete» Association

Address: 22, building 2, Ryazansky prospect,
Moscow, 109428, Russian Federation**Publisher:** «STROYMATERIALY»

Advertising-Publishing Firm, OOO

Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian FederationThe journal is registered by the RF
Ministry of Press, Broadcasting and Mass
Communications PI № FS 77-76959
dated 09.10.2019 (Russia)

ISSN 0005-9889 (Print)

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

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

**6 (614)
November–December 2022**

V.R. FALIKMAN, A.V. ANTIBOR

Development of Methods for Strength Control of Concretes and Mortars in the New GOST R 70307–2022**«Fine-Grained Concretes and Mortars for Construction. Methods for Determination of Strength****in Thin-Walled and Thin-Walled Structures» 3**

I.S. KUZNETSOVA, V.G. RYABCHENKOVA, Yu.S. RYANZINA

New State Standard for Concrete Testing Methods Under Temperature Effects 8

R.O. REZAEV, A.A. DMITRIEV, D.V. CHERNIAVSKY

Application of Probabilistic Approaches for the Construction of «Composition–Property» Models.**Part II (Practice). 12**

V.V. DYACHKOV, S.O. SLYSHENKOV

Assessment of Compliance of the Properties of Rebar Rolled Products**with the Technical Requirements of the EI-Dabaa NPP Project 25**

M.Yu. TITOV, L.A. TITOVA, M.I. BEYLINA

Application of Industrial Waste for the Production of Expansion Components 33**International Construction Forum and Expo100+ TechnoBuild (Information). 38****International Scientific and Practical Conference BetONconf'2022 (Information) 39**

S.N. LEONOVICH, E.E. SHALY, D.A. LITVINOVSKII, A.V. STEPANOVA, V.V. MALYUK, A.V. KOLODEY

Reliability Algorithms for Calculating and Predicting the Durability of Reinforced Concrete**under Chloride Aggression: Analysis of Methodology and Applications 40****Index of Articles Published in the Journal "BETON I ZHELEZOBETON" in 2022 51****Editorial team:****ZVEZDOV A.I.**, Editor-in-Chief, Doctor of Sciences (Engineering), Deputy Director General for Research, Research Center «Stroitel'stvo» JSC (Moscow)**ARKHIPKIN A.A.**, Deputy Editor-in-Chief, Structural Concrete Association (Moscow)**GRANYOV V.V.**, Doctor of Sciences (Engineering), Deputy Director General – Scientific Supervisor, «TsNIPromzdaniy» JSC (Moscow)**GUSEV B.V.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Building Materials and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT) (Moscow)**JENSEN O.M.**, Dr. Sci., Professor, Danish Technical University (Denmark)**KUZEVANOV D.V.**, Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)**MAILYAN D.R.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don)**MOROZOV V.I.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)**MÜLLER H.S.**, Dr. Sci., Professor of the Karlsruhe University, Institute of Technology – KIT (Germany)**NESVETAIEV G.V.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Construction Technology Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don)**RAKHMANOV V.A.**, Candidate of Sciences, Professor, Corresponding Member of RAACS, Chairman of the Board of Directors LLC «Institute VNIIZhelezbeton» (Moscow)**STEPANOVA V.F.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Laboratory for Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, of the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)**TAMRAZYAN A.G.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)**TRAVUSH V.I.**, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Designer, Deputy Director General for Research, «GORPROEKT» CJSC, Vice-President of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow)**USHEROV-MARSHAK A.V.**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv State Technical University of Construction and Architecture (Ukraine)**FALIKMAN V.R.**, Candidate of Sciences (Chemistry), Doctor of Materials Science, Head Center for scientific and technical assistance at complex facilities construction in the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)**KHOZIN V.G.**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Building Materials, Products and Structures Technology Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan)**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:** 9/3 Dmitrovskoye Hwy,
127434, Moscow, Russian Federation**Tel.:** (499) 976-22-08, (499) 976-20-36**E-mail:** mail@rifsm.ru**http://azhb.ru/****http://www.rifsm.ru**

В.Р. ФАЛИКМАН, д-р материаловедения (vfalikman@yandex.ru), руководитель центра НТС технически сложных объектов строительства,

А.В. АНЦИБОР, специалист по качеству центра НТС технически сложных объектов (niigb7@mail.ru)

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

Развитие методов контроля прочности бетонов и растворов в новом ГОСТ Р 70307–2022 «Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности в тонкостенных и тонкослойных конструкциях»

Изложены особенности положений разработанного в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» и введенного в действие нового национального стандарта ГОСТ Р 70307–2022 «Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности в тонкостенных и тонкослойных конструкциях». Приведены решаемые в ходе разработки задачи, возможности и область применения положений стандарта на практике. Приводятся ссылки на первоисточники использованных в стандарте методик испытаний, особенности предъявляемых требований к испытательному оборудованию, общие принципиальные аспекты введенного в действие документа, предложения перспективного совершенствования поддерживающих стандартов.

Ключевые слова: испытания, бетон, раствор, тонкослойные покрытия, тонкостенные изделия и конструкции, контроль качества, контрольные образцы из конструкций, испытания штампом.

Для цитирования: Фаликман В.Р., Анцибор А.В. Развитие методов контроля прочности бетонов и растворов в новом ГОСТ Р 70307–2022 «Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности в тонкостенных и тонкослойных конструкциях» // *Бетон и железобетон*. 2022. № 6 (614). С. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-3-7>

V.R. FALIKMAN, Doctor of materials science, Head of the NTS Center for Technically Complex Construction Projects (vfalikman@yandex.ru),
A.V. ANTIBOR, Engineer, quality specialist of the NTS center for technically complex objects (niigb7@mail.ru)
Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZhB named after A.A. Gvozdev
JSC «Research Center «Construction» (6, bul. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Development of Methods for Strength Control of Concretes and Mortars in the New GOST R 70307–2022 «Fine-Grained Concretes and Mortars for Construction. Methods for Determination of Strength in Thin-Walled and Thin-Walled Structures»

The article describes the peculiarities of the provisions of the new national standard GOST R 70307–2022 “Fine-grained concretes and mortars for construction. Methods for determination of strength in thin-walled and thin-layer structures”, developed in the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) named after A.A. Gvozdev – subdivision of JSC “SRC “CONSTRUCTION”. The tasks solved during standard’s development, opportunities and scope of application of the standard in practice are outlined. References to the primary sources of the test procedures used in the standard, peculiarities of the requirements to the test equipment, general principle aspects of the document put into effect, and proposals for prospective improvement of the supporting standards are given.

Keywords: tests, concrete, mortar, thin-layer coatings, thin-walled products and structures, quality control, test specimens from structures, stamping tests.

For citation: Falikman V.R., Antsibor A.V. Development of methods for strength control of concretes and mortars in the new GOST R 70307–2022 «Fine-grained concretes and mortars for construction. Methods for determination of strength in thin-walled and thin-walled structures». *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 3–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-3-7>

В 2022 г. введен в действие новый стандарт ГОСТ Р 70307–2022 на методы определения прочности мелкозернистых бетонов и строительных растворов в тонкостенных и тонкослойных элементах конструкций. Разработка этого документа выполнялась в 2020–2021 гг., а экспериментальная база, положенная в основу стандарта, накапливалась

на протяжении 15 лет. Обширный блок предварительных экспериментальных работ, а также предшествующая стандарту научно-исследовательская работа реализовывались при непосредственном активном участии одного из ведущих специалистов по стандартизации в области бетоноведения, ведущим научным сотрудником НИИЖБ им. А.А. Гвоздева

канд. техн. наук Марком Израилевичем Бруссером (1932–2020 гг.).

ГОСТ Р 70307–2022 «Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности в тонкостенных и тонкослойных конструкциях», разработанный с учетом требований Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», распространяется на мелкозернистые бетоны по ГОСТ 26633, строительные растворы по ГОСТ 28013 и сухие смеси на цементном вяжущем по ГОСТ 31357 и ставит своей целью развитие нормативной технической базы в области строительного контроля. При соответствующем экспериментальном обосновании методика стандарта может быть применима и для тяжелых бетонов. В стандарте установлены методы определения прочности в тонкослойных и тонкостенных элементах сборных и монолитных бетонных и железобетонных изделий и конструкций на сжатие, осевое растяжение, растяжение при раскалывании и изгибе при разрушающих кратковременных статических испытаниях образцов, изготовленных из выбуренных, вырубленных или выпиленных из конструкций проб материала, правила отбора и подготовки проб, а также неразрушающими методами контроля при условии экспериментального установления переходных коэффициентов (для косвенных разрушающих методов испытаний) и градуировочных зависимостей (для косвенных разрушающих и неразрушающих методов). Для методов испытания образцов-пластин методом штампа (штампов) приведены усредненные универсальные коэффициенты, которые можно применять при соблюдении требований к методике испытания.

Разработка стандарта выполнялась для решения следующих задач:

- внедрение в практику строительного контроля методик определения качества мелкозернистых бетонов и строительных растворов, где проверка качества материалов возведенных конструкций существующими методами ограничена или невозможна;
- внедрение в практику инновационных методик испытаний, направленных на диагностику и контроль качества строительных конструкций с меньшими материальными и трудовыми ресурсами.

В практике строительного контроля в части производства тонкостенных и тонкослойных элементов конструкций из мелкозернистых бетонов и строительных растворов (стяжки пола, растворные швы каменных конструкций, монтажные стыки панелей сборного домостроения, тонкослойные ремонтные покрытия и участки монолитных конструкций и т. п.), а также конструкций, где проектом предусмотрена высокая степень армирования, возникают

ситуации, когда традиционные методики контроля не позволяют осуществить контроль качества материала в конструкции. Такое ограничение вынуждает переходить на альтернативные методики диагностики, что сопряжено, как правило, с переходом на испытания образцов меньших размеров, а это, в свою очередь, требует уточнения и внимательного учета влияния масштабного фактора на получаемый результат.

Недостатки используемых ранее методических подходов к определению и оценке прочности примененных материалов в отдельных видах строительных конструкций провоцировали субъективную и вольную адаптацию и трактовку существующих методик испытания под нестандартные условия их применения, что приводило к неоднозначным спорным решениям о приемке или отбраковке возводимых конструкций. Получаемые результаты нередко становились причиной арбитражных споров, претензий и штрафных санкций к производителям работ со стороны технических надзорных служб заказчика и инспекционных органов.

Положения разработанного стандарта значительно расширили возможности методических подходов к проведению контроля качества строительных материалов и должны позволить контролировать и обеспечивать на требуемом проектном уровне качество возводимых конструкций, а также снижение дополнительных расходов при сокращении межремонтных сроков в период их эксплуатации.

В стандарте впервые представлены новые методики испытаний малогабаритных образцов бетона и раствора, отобранных из конструкций, основанные на переходах между разрушающими испытаниями образцов при разных напряженных состояниях «растяжение при раскалывании – прочность при сжатии», разработаны правила и требования при выполнении испытаний, правила обработки результатов и коэффициенты перехода к нормируемым показателям качества бетонов и растворов.

Несмотря на кажущуюся новизну предложенных методов для бетонов и растворов, применение подобных схем испытаний известно сравнительно давно. С 70–80-х гг. прошлого столетия близкий метод успешно применяется для определения свойств горных пород (серия стандартов ГОСТ 21153), а методика испытания штампом в довольно общем виде неоднократно приводилась в разработанных примерно в тот же период нормативных и ведомственных документах разного уровня, например в СН 290-74 «Инструкция по приготовлению и применению строительных растворов» [1].

Одним из главных преимуществ предложенного метода испытаний на растяжение при раскалыва-



Рис. 1. Пример испытанного образца на растяжение при раскалывании по предлагаемой схеме двухточечного приложения нагрузки
Fig. 1. Example of a split tensile test specimen using the proposed two-point load application scheme

нии поперек образующей цилиндра является практически полное отсутствие механической обработки образца на этапе подготовки к испытаниям, минимальные требования к длине фрагментов пробы при отборе из конструкции, и как следствие, минимизация влияния человеческого фактора на результат испытания, что крайне характерно для традиционных испытаний [2]. При использовании одной цилиндрической пробы диаметром около 25 мм и длиной около 200 мм можно получить до 27 единичных результатов определения, при этом имея возможность сопоставления полученных результатов к глубине сечения отобранной пробы (и сечению конструкции соответственно).

Стоит отметить, что сам подход к реализации способа нагружения до раскалывания цилиндрических образцов по предложенной схеме имеет свою специфику и проявляет эффективность на образцах малых размеров (интервал от 17 до 30 мм), это объясняется тем, что энергия разрушения передается через точечные контактные зоны испытательной оснастки и контрольного образца (двухточечные (рис. 2) и трехточечные (рис. 3) контакты), а площадь рабочего сечения образца увеличивается пропорционально квадрату диаметра цилиндра. Это вызывает нелинейное увеличение точечных напряжений в месте передачи разрушающих усилий, что может приводить к нарастанию смятия материала образца в местах передачи усилия и являться источником искажения создаваемой схемы напряженного состояния, что наверняка приведет к нарастанию погрешности получаемых результатов.

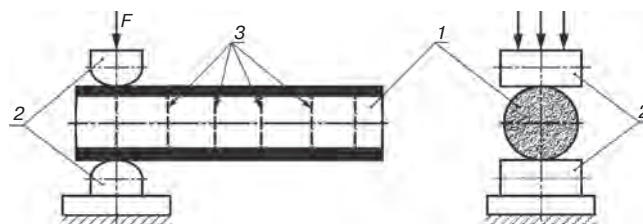


Рис. 2. Двухточечная схема приложения нагрузки
Fig. 2. Two-point load application scheme

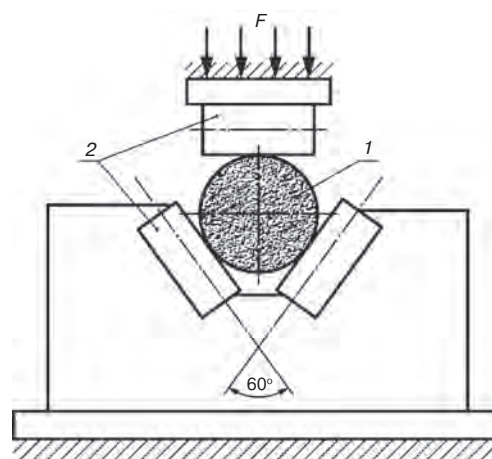


Рис. 3. Трехточечная схема приложения нагрузки: 1 – образец-цилиндр; 2 – колющие прокладки с цилиндрической рабочей поверхностью; 3 – места приложения раскалывающей нагрузки на образец-цилиндр
Fig. 3. Three-point load application scheme: 1 – cylindrical specimen; 2 – stabbing spacers with a cylindrical working surface; 3 – locations where the splitting load is applied to the cylindrical specimen

Таким образом, становится очевидным, что применение трехточечной схемы нагружения является более предпочтительной, но ее реализация технически несколько сложнее в отличие от сравнительно более простой двухточечной схемы нагружения. В то же время плоскость раскалывания цилиндра при двухточечной схеме нагружения имеет степень свободы в отклонении от перпендикулярности к продольной оси образца, что будет повышать влияние естественных дефектов структуры бетона в зоне создаваемых напряжений в месте испытания и может стать дополнительным источником неоднородности результатов в серии испытаний, создавать необходимость увеличивать их количество в каждой серии.

Кроме того, шаг приложения нагрузки вдоль образующей цилиндра соотносится с диаметром испытуемого образца, что с увеличением диаметра будет сокращать возможное количество получаемых единичных испытаний на единицу длины отобранного образца и в конечном итоге сделает подобные испытания нецелесообразными, так как появится возможность перейти на прямые испытания образцов цилиндров с приложением разрушающей нагрузки на осевое сжатие, тем самым снижая

неопределенность результата за счет исключения переходного фактора между разными видами прочности материала.

Предложенные в стандарте способы испытаний также включают в себя нагружение до разрушения образцов-пластин с односторонним и двухсторонним приложением нагрузки через штамп (штампы) круглого или квадратного сечения, соразмерного с толщиной образца-пластины. Номинальный размер штампов (диаметр или минимальный размер основания рабочего сечения штампа) принимают из ряда: 8; 10; 12; 15; 20; 25 мм. Согласно требованиям стандарта для каждого типоразмера штампа предусмотрен диапазон толщин образцов-пластин (соотношение минимального поперечного размера рабочего сечения штампа и толщины образца-пластины от 0,9 до 1,1). Предусмотрена возможность отступать от указанного параметрического ряда, если для иного типоразмера штампа и/или образца будут установлены экспериментальные переходные коэффициенты или зависимости для конкретного цикла испытаний.

Схемы нагружения образца предполагают использование маломощного испытательного оборудования, что, с одной стороны позволяет обходиться сравнительно низким по материалоемкости (и, как правило, стоимости) силовым оборудованием, а с другой – требует увеличения числа самих испытательных машин, поскольку с уменьшением значения максимального усилия оборудования сокращается и сам диапазон развиваемых усилий конкретного оборудования при изменении уровня ожидаемой прочности самого образца. Учитывая этот факт, требования к допустимому диапазону прилагаемого усилия от общего номинального уровня для каждой силовой установки расширены с традиционно устанавливаемого интервала 20–80% до 10–90%.

В то же время сформулированы дополнительные требования к шарнирам опорных плит пресса, которые не имеют четкого отражения в ГОСТ 10180–2012, но иногда не соблюдаются в представленных на рынке испытательных установках. Стоит отметить, что данному фактору в зарубежных нормах (American Standard ASTM C39 [3], European Standard EN 12390–3 [4], Brazilian Standard NBR ABNT 5739 [5], Chinese Standard GB/T 50081 [6] и Australian Standard AS 1012.14 [7]) уделено большее внимание.

При всей кажущейся простоте предложенных схем испытаний их реализация сопряжена с повышенными требованиями к метрологическим аспектам, так как размеры образцов заметно уменьшены относительно традиционно применяемых в испытательных лабораториях. Стремление к высоким стандартам ис-

пытательной практики является залогом получения стабильных и достоверных результатов для любой материаловедческой лаборатории.

Использование разрушающих методов по отобраным контрольным образцам в тонкостенных и тонкослойных элементах конструкций сделало возможным установление привязанных к фактическим свойствам материала в конструкциях градуировочных зависимостей для ряда неразрушающих методов диагностики, основанных на разных физических принципах. Одновременно появляется возможность без заметного повышения себестоимости контроля увеличивать объемы контролируемых участков в конструкциях, сокращать трудоемкость и время диагностики, обеспечивая достоверность выводов о техническом состоянии материала и конструкции в целом. Для отдельных случаев (особые методы нанесения и уплотнения бетона и раствора, условия твердения, различие свойств бетона в разных зонах сечения конструкций и изделий и др.) применение методов испытаний в образцах малых размеров представляет значительный интерес или, выражаясь иначе, является в ряде случаев практически единственным возможным способом контроля и оценки прочностных свойств при приемосдаточном контроле или технических обследованиях.

Примечательным в стандарте также является группировка, а по сути – ранжирование разных методов определения прочности и порядок установления их взаимной корреляционной взаимосвязи.

Предусмотрена следующая градация:

- базового уровня – А1;
- косвенного разрушающего уровня – А2;
- косвенного неразрушающего уровня – Б.

К методам испытаний групп А1 относят определение прочности материалов в образцах базового размера и формы либо приравненных к ним через масштабные и переходные коэффициенты по ГОСТ 10180–2012 (за исключением испытания образцов с коэффициентами, установленными по приложению Л), ГОСТ 31914, ГОСТ 28570–2019 (за исключением испытания образцов с коэффициентами, установленными по приложению А), ГОСТ 5802–86 (за исключением испытания по приложению 1)

К методам испытаний группы А2 относят определение прочности материалов в образцах небазового размера, формы и/или схемы испытаний, для которых установлены переходные коэффициенты или зависимости к методам испытаний группы А1 в соответствии с ГОСТ 28570–2019 (приложение А)

К методам испытаний группы Б относят испытания, для которых установлены градуировочные зависимости в соответствии с ГОСТ 22690 или

ГОСТ 17624 через параллельные испытания материала методом группы A1 или A2.

При расчете и оценке класса бетона учитывается вклад неопределенности разных методов в полученный результат фактического класса ($B_{ф}$). Для группы методов A2 это реализуется в виде дополнительно учитываемого показателя S_5 .

Изложенный в стандарте подход является пилотной попыткой ранжирования применяемых методик испытаний и взаимного статуса полученных результатов, в частности при арбитражных спорах с привлечением двух и более испытательных лабораторий. Вместе с тем схожее (порой негласное) ранжирование методик по приоритету полученных результатов испытания бетона уже давно реализуется в практике строительного контроля [8, 9].

По мнению авторов, примененный подход с учетом показателя неопределенности полученного результата при переходе между прочностями при разных схемах напряженного состояния следует применять в приложении Л ГОСТ 10180–2012 при использовании коэффициентов по табл. Л.1.

Стандарт имеет взаимосвязь с основными действующими нормативными документами на методы контроля и оценки прочности бетона и раствора, методы испытаний (ГОСТ 18105, ГОСТ 10180, ГОСТ 28570, ГОСТ 31914, ГОСТ 5802, ГОСТ 31357). Он может использоваться при пересмотре ряда СП, ГОСТ, ГОСТ Р, связанных с выполнением бетонных работ в транспортном строительстве, изоляционных и отделочных покрытиях, полах, каменных и армокаменных конструкциях и других узкопрофильных областях применения бетонов и строительных растворов.

Проведение контроля и оценки качества бетонов и строительных растворов в конструкциях по новому стандарту в тех областях строительства, где контроль ранее традиционно осуществлялся только по формованным контрольным образцам, позволяет обеспечивать эксплуатационную надежность и долговечность возводимых конструкций, заложенную проектом, решать нестандартные задачи диагностики при выполнении технических обследований эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкций, а также дает возможность новых подходов при материаловедческих научных исследованиях свойств разрабатываемых строительных материалов.

Накапливаемый опыт практического применения стандарта, а также анализ обратной связи от непосредственных пользователей при реализации предложенных методов испытаний для широкого спектра условий строительства позволит совершенствовать и

дополнять его положения на пути эволюционного развития с учетом развития отрасли строительных материалов, как подобное происходит по подавляющему большинству нормативных документов строительной сферы.

Авторы выражают надежду на конструктивные и обоснованные замечания и предложения от непосредственных пользователей по конкретным положениям стандарта. Со своей стороны, разработчиками формируются планы по проведению просветительской работы с целью разъяснения представленных положений и методов в рамках тематических семинаров и программ повышения квалификации для заинтересованных специалистов строительных лабораторий.

Список литературы / References

1. СН 290-74 «Инструкция по приготовлению и применению строительных растворов». М.: Стройиздат, 1975. 74 с.
1. SN 290-74 «Instructions for the preparation and use of mortars». М.: Stroyizdat. 1975. 74 p. (In Russian).
2. Cangussu N., Costa I., Júnior Á., Silveira M., Aslani F. Influence of the preparation of the cylindrical specimen surface and approach analysis on the test value of compressive strength. *Structural Concrete*. 2022. DOI:10.1002/suco.202100761.
3. ASTM C 39/C 39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2009.
4. EN 12390-3. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. 2019.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.
6. GB/T 50081. Test method of mechanical properties on ordinary concrete. China, 2019.
7. AS 1012.14. Methods of testing concrete – Method for securing and testing cores from hardened concrete for compressive strength. Australia, 2018.
8. Five methods for on-site evaluation of concrete strength. FPrimeC Solutions. January 9, 2020.
9. Руководство по определению и оценке прочности бетона в конструкциях зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1979. 32 с.
9. Guidelines for determining and evaluating the strength of concrete in the structures of buildings and structures. Moscow: Stroyizdat. 1979. 32 p.

И.С. КУЗНЕЦОВА, канд. техн. наук, почетный строитель Москвы (1747139@mail.ru),
В.Г. РЯБЧЕНКОВА, инженер, Ю.С. РЯНЗИНА, инженер

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Новый государственный стандарт на методы испытаний бетонов при температурных воздействиях

В 2022 г. подготовлен к изданию новый стандарт ГОСТ Р «Бетоны. Методы определения механических, деформативных характеристик и выносливости при температурных воздействиях». Стандарт распространяется на лабораторные испытания изменчивости свойств бетонов при температурных воздействиях, устанавливает методы определения прочностных и деформативных характеристик при нагреве и в охлажденном состоянии после нагрева, а также характеристик выносливости при нагреве.

Ключевые слова: бетон, испытания, температура, кубиковая прочность, призмочная прочность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, выносливость.

Для цитирования: Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Рянзина Ю.С. Новый государственный стандарт на методы испытаний бетонов при температурных воздействиях // Бетон и железобетон. 2022. № 6 (614). С. 8–11. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-8-11>

I.S. KUZNETSOVA, Candidate of Sciences (Engineering), Honorary Builder of Moscow, (1747139@mail.ru),
V.G. RYABCHENKOVA, Engineer, Yu.S. RYANZINA, Engineer
Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) named after A.A. Gvozdev JSC «Research Center «Construction»
(6, bul. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

New State Standard for Concrete Testing Methods Under Temperature Effects

In 2022, a new GOST R standard "Concrete. Methods for determining mechanical, deformative characteristics and endurance under temperature effects" was prepared. The standard applies to laboratory tests of the variability of the properties of concrete under temperature effects, establishes methods for determining the strength and deformation characteristics when heated and in a cooled state after heating, as well as endurance characteristics when heated.

Keywords: concrete, tests, temperature, cube strength, prismatic strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, endurance.

For citation: Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Ryznina Yu.S. New state standard for concrete testing methods under temperature effects. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 8–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-8-11>

В настоящее время разработан и подготовлен к изданию новый национальный стандарт Российской Федерации – ГОСТ Р «Бетоны. Методы определения механических, деформативных характеристик и выносливости при температурных воздействиях». Стандарт разработан по приоритетным направлениям единства измерений и обеспечения достоверных справочных данных.

Изучение влияния воздействий температуры на изменение прочностных и деформативных свойств бетонов необходимо для решения задач проектирования строительных конструкций, испытывающих температурные воздействия разного рода.

Изучение изменчивости физико-механических свойств бетонов при высокотемпературных воздействиях необходимо для проектирования железобетонных конструкций с обеспечением требуемых

пределов огнестойкости [1]. При расчетной оценке огнестойкости железобетонных конструкций важно знать, как изменяются свойства тех или иных видов бетонов при кратковременных температурных воздействиях [2]. При проектировании железобетонных конструкций с позиций обеспечения огнесохранности необходимы данные об изменениях свойств бетонов в охлажденном состоянии после высокотемпературного нагрева [3]. В расчетах огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций используются коэффициенты условий работы бетонов, характеризующие изменение прочности и модуля упругости бетона при кратковременном нагреве.

Поверочные расчеты несущей способности железобетонных конструкций, подвергавшихся воздействию пожара, также выполняются с учетом изменчивости свойств бетонов после пожара с использованием ко-

эффициентов условий работы бетона в охлажденном состоянии после кратковременного нагрева.

Проектирование специфических конструкций из жаростойких бетонов для тепловых агрегатов также требует исследований физико-механических свойств этих бетонов в условиях кратковременного и длительного нагрева при заданных эксплуатационных температурах [4].

Испытания на выносливость железобетонных конструкций при нагреве довольно специфичны, и потребность в них в строительной практике возникает довольно редко, но тем не менее этот вид испытаний может быть востребован для создания железобетонных конструкций под определенный вид технологических процессов.

Широкая номенклатура современных видов бетонов и процессы создания новых видов жаростойких бетонов требуют проведения исследований изменчивости их свойств в условиях различного рода температурных воздействий по единым методикам.

В новом стандарте приведены методы испытания бетонов при нагреве до заданной температуры и в охлажденном состоянии после нагрева с определением следующих прочностных и деформативных характеристик бетонов: кубиковой прочности, призмочной прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона, а также характеристик выносливости.

Идея разработки этого государственного стандарта была основана на стремлении собрать в единый документ методы и методики испытаний физико-механических свойств бетонов при температурных воздействиях.

Большинство методов испытаний механических и деформативных свойств бетонов в условиях температурных воздействий, приведенные в новом стандарте, по сути, не являются новыми, они давно апробированы и применяются в практике исследований [5–8].

До разработки нового стандарта некоторые методы испытаний бетонов на температурные воздействия были приведены в виде частных приложений в разных государственных стандартах, что вызывало неудобство для пользователей.

Так, например, до разработки нового стандарта методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона ранее были приведены в Приложении 2 «Дополнительные требования к методам определения призмочной прочности и модуля упругости бетона при нагреве» ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». При актуализации ГОСТ 24452–80 Приложение 2 с методикой испытаний упомянутых характеристик бетонов при температурных воздействиях было исключено из содержания документа.

Аналогичная ситуация сложилась с методом испытаний бетонов на выносливость при температурных воздействиях, который ранее был приведен в Приложении 1 «Дополнительные требования к методике испытаний бетона на выносливость при нагреве» ГОСТ 24545–81 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость». После актуализации этого стандарта Приложение 1, содержащее методику испытаний бетонов при температурных воздействиях на выносливость, было также исключено из документа.

Метод определения кубиковой прочности бетона при нагреве и в охлажденном состоянии после нагрева отсутствовал в нормативной базе.

В указанных стандартах отсутствовали методики испытаний характеристик бетонов в охлажденном состоянии после нагрева.

Кроме того, в нормативной базе отсутствовал метод экспериментального построения диаграмм «напряжение–деформация» бетона при температурных воздействиях [5].

Новый стандарт на методы испытаний физико-механических свойств бетонов при температурных воздействиях разработан с учетом потребностей и уровня развития отечественной научно-исследовательской базы, широко применяющейся в практике исследований.

Разработчиком нового стандарта является коллектив специалистов лаборатории «Температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций» (№ 6) НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». Тематическая деятельность лаборатории непосредственно связана с исследованиями физико-механических свойств разных видов бетонов при нагреве.

Методики определения механических и деформативных свойств бетонов с установлением коэффициентов условий работы при нагреве и в охлажденном состоянии после нагрева применялись в научных исследованиях НИИЖБ и ВНИИПО с 1970-х гг. и используются исследователями при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее – НИОКР) по настоящее время. Результаты НИОКР (Отчет по научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Исследование бетонных конструкций, армированных фиброй композитной полимерной и арматурой композитной полимерной (АКП), на воздействие пожара»: В 2 т. Т. 1. УДК 691.3. ОКПД 2 М 71.2. М.: АО «НИЦ «Строительство», 2019. 127 с.) и установленные коэффициенты условий работы для новых видов бетонов вводятся в тематические своды правил [5–7].

Разработка нового стандарта позволяет урегулировать и обеспечить единую методологическую базу испытаний физико-механических свойств бетонов при специфических температурных воздействиях.



Рис. 1. Вид образца бетона с установленными выносными удлинителями, подготовленного для испытания на осевое сжатие с построением диаграмм деформирования « σ – ε » при нагреве

Fig. 1. View of a concrete sample with external extensions installed, prepared for axial compression testing with the construction of deformation diagrams « σ – ε » during heating

Структура нового стандарта включает 8 разделов и 3 приложения и отвечает требованиям ГОСТ 1.5–2001 «Межгосударственная система стандартизации (МГСС). Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению (с Изменением № 1)».

В разделе 1 стандарта обозначена область применения нового стандарта.

Разделы 2 и 3 содержат ссылки на нормативные документы, а также специфические термины и определения, примененные по тексту документа.

Раздел 4 стандарта содержит основные положения, регулирующие организационные процессы испытаний.

Раздел 5 стандарта регламентирует процессы изготовления или отбора бетонных образцов, подготовки к испытаниям, определяет требуемые параметры образцов, их количество, форму и размеры в зависи-



Рис. 2. Вид установки для испытаний бетонного образца-призмы на осевое сжатие с построением диаграммы деформирования « σ – ε » при нагреве

Fig. 2. View of the installation for testing a concrete sample-prism for axial compression with the construction of the diagram of deformation « σ – ε » during heating

мости от вида испытаний и измеряемых показателей, а также видов бетона (обычный тяжелый, легкий и мелкозернистый, в том числе жаростойкий, напрягающий и ячеистый).

Раздел 6 содержит методику определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона при температурных воздействиях, включая описание испытательного оборудования и измерительных средств, необходимых для проведения испытаний, требования к оборудованию и средствам измерений, методики подготовки к испытаниям, проведения испытаний при нагреве и в охлажденном состоянии после нагрева, а также порядок обработки результатов испытаний. В разделе также содержатся указания по построению диаграмм деформирования бетона при нагреве (рис. 1, 2).

В разделе 7 приведена методика определения кубиковой прочности бетона при температурных воздействиях, включая описание испытательного оборудования, а также методики подготовки к испытаниям, проведения испытаний и обработки результатов.

Раздел 8 стандарта содержит методику испытания на выносливость бетона при нагреве, включая описание необходимого испытательного оборудования, методики подготовки, проведения и обработки результатов испытаний.

В приложении А к стандарту приведены схемы установки камерной электрической печи для испытаний образцов-призм и образцов-цилиндров при нагреве по показателям призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

В приложениях Б и В к стандарту приведены формы журналов испытаний, которые должны оформ-

ляться при испытаниях призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона при нагреве, в охлажденном состоянии после нагрева и при определении характеристик выносливости бетона.

В новом стандарте впервые приведена методика испытаний кубиковой прочности бетона при нагреве и в охлажденном состоянии после нагрева.

Новизной стандарта являются методики испытаний характеристик бетонов в охлажденном состоянии после нагрева и метод экспериментального построения диаграмм «напряжение–деформация» бетона при температурных воздействиях (рис. 1, 2).

Следует обратить внимание пользователей стандарта на продолжительность времени изотермической выдержки при испытаниях на температурные воздействия. При определении кубиковой прочности бетона, а также призмочной прочности и модуля упругости бетона изотермическая выдержка осуществляется в течение 60 мин. В некоторых научных трудах [9] приведены результаты исследований призмочной прочности бетона при кратковременном нагреве, полученные при изотермической выдержке образцов в течение 4 ч. Такая длительная четырехчасовая изотермическая выдержка характерна для испытаний жаростойких бетонов на длительный нагрев по ГОСТ 20910–2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия», но не соответствует изменчивости свойств бетонов при кратковременном нагреве.

Новый стандарт ГОСТ Р «Бетоны. Методы определения механических, деформативных характеристик

и выносливости при температурных воздействиях» базируется на основных положениях Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и учитывает требования Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Стандарт тематически взаимосвязан со сводами правил: СП 468.13250800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности», СП 27.13330.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур» и СП 329.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила обследования после пожара».

Разработанный стандарт позволяет упорядочить и дополнить существующую методологическую базу испытаний свойств бетонов при специфических температурных воздействиях. Надеемся, что этот документ будет полезен широкому кругу исследователей бетонов, позволит обеспечить единство системы измерений и избежать методических ошибок.

В дальнейшем целесообразно дополнить стандарт методиками испытаний расширенного спектра свойств бетонов при температурных воздействиях (например, методиками определения теплотехнических характеристик бетонов) для обеспечения удобства пользователей единым методическим документом на методы испытаний бетонов в условиях разного рода температурных воздействий.

References

Список литературы

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1986. 225 с.
2. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 304 с.
3. Милованов А.Ф. Железобетонные температуростойкие конструкции. М., 2005. 234 с.
4. Некрасов К.Д., Тарасова А.П. Жаростойкий бетон на портландцементе. М.: Стройиздат, 1969. 192 с.
5. Кузнецова И.С. Диаграммы состояния бетона и арматуры после пожара. Доклады конференции молодых ученых и специалистов. М.: Стройиздат, 1998. С. 186–192.
6. Русанов В.Е. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона для расчета тоннельных обделок // *Вестник МГСУ*. 2010. № 2. С. 189–197.
7. Новиков Н.Н. Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 167 с.
1. Milovanov A.F. Ognestoykost' zhelezobetonnykh konstruktсий [Fire resistance of reinforced concrete structures] Moscow: Stroyizdat. 1986. 225 p.
2. Milovanov A.F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktсий pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat. 1998. 304 p.
3. Milovanov A.F. Zhelezobetonnyye temperaturostoykiye konstruktсий [Reinforced concrete temperature-resistant structures]. Moscow. 2005. 234 p.
4. Nekrasov K.D., Tarasova A.P. Zharostoykiy beton na portlandtsemente [Heat-resistant concrete on Portlandcement]. Moscow: Stroyizdat. 1969. 192 p.
5. Kuznetsova I.S. Diagrams of the state of concrete and reinforcement after a fire. M.: Stroyizdat. 1998, pp. 186–192.
6. Rusanov V.Ye. Determination of the strength and deformation properties of steel fiber concrete for the calculation of tunnel linings // *Vestnik MGSU*. 2010. No. 2, pp. 189–197. (In Russian).
7. Novikov N.N. Fire resistance of fiber-reinforced concrete structures for road tunnels and subways. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2019. 167 p. (In Russian).

Р.О. РЕЗАЕВ^{1,2}, канд. физ.-мат. наук (rezaev.roman@gmail.com);

А.А. ДМИТРИЕВ², инженер;

Д.В. ЧЕРНЯВСКИЙ¹, канд. физ.-мат. наук

¹ IFW Institute for Theoretical Solid State Physics (Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany)
(IFW Институт теоретической физики твердого тела, Гельмгольцштрассе, 20, 01069, Дрезден, Германия)

² Томский политехнический университет (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30)

Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав—свойство». Ч. II (Практика)

Представлены результаты применения на практике идей, рассмотренных в первой части статьи, опубликованной ранее: построены модели прочности, осадки конуса для 4-компонентных бетонных смесей с пластифицирующими добавками, а также построены модели прочности и подвижности для 5-компонентных смесей мелкозернистого бетона, включающего минеральный наполнитель. В частности, на базе последнего примера показывается возможность определения расхода активной золы, максимизирующей прочностные характеристики бетона при фиксированном расходе цемента.

Ключевые слова: бетонные смеси, математическое пространство составов, непрерывность свойств.

Для цитирования: Резаев Р.О., Дмитриев А.А., Чернявский Д.В. Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав—свойство». Ч. II (Практика) // Бетон и железобетон. 2022. № 6 (614). С. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-12-24>

R.O. REZAEV^{1,2}, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) (rezaev.roman@gmail.com);

A.A. DMITRIEV², Engineer;

D.V. CHERNIAVSKY¹, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

¹ IFW Institute for Theoretical Solid State Physics (Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany)

² Tomsk Polytechnic University (30 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation)

Application of Probabilistic Approaches for the Construction of «Composition—Property» Models. Part II (Practice)

The results of the practical application of the ideas presented in the first part of the article published earlier are presented: models of strength, cone slump for 4-component concrete mixtures with plasticizing additives were constructed, also, models of strength and mobility for 5-component mixtures of fine-grained concrete, including mineral filler, were constructed. In particular, on the basis of the last example, the possibility of determining the consumption of active ash, maximizing the strength characteristics of concrete at a fixed consumption of cement, is shown.

Keywords: concrete mixtures, mathematical space of compositions, continuity of properties.

For citation: Rezaev R.O., Dmitriev A.A., Cherniavsky D.V. Application of probabilistic approaches for the construction of «composition—property» models. Part II (Practice). *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 12–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-12-24>

В продолжение тематики исследования вопроса об эффективном применении современных методов анализа экспериментальных данных в настоящей работе представлены практические результаты построения прогнозной модели «состав—свойство», позволяющей получать количественную оценку свойств бетонной смеси/бетона исходя из соотношения между используемыми сырьевыми материалами. Параметры прогнозной модели калибруются по информации о типовых характеристиках используемых материалов: гранулометрический состав, истинные/насыпные плотности и т. д. и по результатам специального экспериментального плана, позволяющего оценить корреляции между значениями свойств раз-

личных составов. Построенная прогнозная модель представляет интерес как с практической стороны, поскольку позволяет быстро решить задачу оптимизации состава бетона по комплексу свойств или найти состав с заданными свойствами, так и с фундаментальной, предлагая новые инструменты для тестирования на правдоподобность физико-химических гипотез о вкладе различных факторов в интересующее свойство. Предлагаемая к обсуждению концепция решает проблемы неоднозначного описания поверхности отклика различными аналитическими функциями и устойчивости модели с помощью введения вероятностного пространства допустимых значений прогнозных свойств бетонной смеси/бетона,

что позволяет в некотором смысле обобщать результаты, полученные на одном классе материалов на более широкие классы. Построение прогнозной модели прочности, осадки конуса на примере бетонных смесей товарного назначения на стандартных материалах [1–3] представлено в разделе «4-компонентные смеси тяжелого бетона с применением пластифицирующих добавок». Возможности для оптимизации содержания активной минеральной добавки на примере золы-уноса [4–6] продемонстрированы в разделе «5-компонентные смеси мелкозернистого бетона с минеральными наполнителями». Статья завершается обсуждением перспектив развития методов построения прогнозных моделей для решений практических и фундаментальных задач.

4-компонентные смеси тяжелого бетона с применением пластифицирующих добавок

Применение пластифицирующих добавок позволяет снизить количество воды в бетонной смеси при сохранении ее подвижности [7, 8]. Как следствие, снижается водоцементное отношение и повышается прочность, что в итоге позволяет уменьшить расход цемента для смесей с одинаковой подвижностью и прочностью бетона. В случае, когда удельная стоимость цемента в составе смеси наибольшая по сравнению с другими материалами (заполнителями), экономический эффект от введения пластифицирующей добавки будет зависеть только от стоимости самой добавки, и во многих случаях смеси с добавками имеют меньшую себестоимость. Однако в тех случаях, когда удельная себестоимость цемента и заполнителей сравнима, применение пластифицирующей добавки может вызывать удорожание смеси вместо ожидаемого удешевления. Например, для смеси $C=350 \text{ кг/м}^3$, $\Pi=800 \text{ кг/м}^3$ и стоимости материалов – 5500 р./т (Ц), 1350 р./т (Щ) и 550 р./т (П) – удельная стоимость заполнителей 1925 р./м^3 равна удельной стоимости цемента – 1925 р./м^3 . Применение добавки, с одной стороны, снизит расход цемента и воды, но с другой – для сохранения баланса расходов материалов на 1 м^3 смеси это уменьшение будет скомпенсировано дополнительным расходом заполнителей. Как результат, смесь с учетом стоимости добавки станет дороже. Для положительного экономического эффекта в таких случаях наряду с применением добавки необходимо одновременно смещать соотношение заполнителей в сторону песка, и новый расход инертных материалов может быть, например, таким – $\Pi=970 \text{ кг/м}^3$, $C=350 \text{ кг/м}^3$, что удешевит единицу куба объема смеси по заполнителям примерно на 100 р., при этом несколько повысится водопотребность смеси, которую, однако, можно регулировать подбором дозировки добавки. Балансируя между новыми соотношениями

всех исходных компонентов, включая добавку, можно достичь максимального эффекта удешевления. Такая процедура может занять достаточно большое количество человеко-часов, поэтому необходимо иметь метод, позволяющий быстро и комплексно оценивать экономический эффект от использования конкретной добавки. В данном разделе мы покажем потенциал применения на практике метода построения моделей «состав–свойство» с целью выяснения экономической эффективности от введения пластифицирующей добавки в смесь.

В качестве компонентов бетонной смеси были использованы сухие инертные материалы – гравийный щебень фракции 5–20 и песок с гранулометрическим составом, представленным в табл. 1. Цемент, согласно паспортным данным, имел следующие характеристики: портландцемент ЦЕМ I 42,5Б производства АО «Мордовцемент», НГЦТ–26,7%, истинная плотность – $3,11 \text{ г/см}^3$. Для построения модели осадки конуса бетонных смесей и прочности бетона без пластифицирующей добавки был составлен и реализован экспериментальный план, представленный в табл. 2. Далее похожий план был составлен для смесей с применением пластифицирующей добавки на основе лигносульфоната (ЛСТ), дозировка которой по товарному продукту составила 1,3% от расхода цемента. При такой дозировке среднее количество воды для получения подвижности смеси класса П1 составило 168 л/м^3 , в то время как для смесей без применения добавки – 184 л/м^3 . Таким образом, можно считать, что применение пластифицирующей добавки обеспечивает водоредуцирующий эффект от 8 до 10%. Формальное среднее значение прочности на 28-е сут, вычисленное по различным классам подвижности, отличается между составами с использованием добавки и без добавки не более 5% (для смесей с одинаковым классом подвижности), что находится в пределах лабораторного коэффициента вариации, при этом темп набора прочности для малоподвижных составов с применением добавки выше: на 7-е сут прочность образцов с добавкой превышает в среднем на 15% прочность образцов без добавки.

Обработка результатов измерений осадки конуса и прочности, представленных в табл. 2, 3, позволила получить поверхность отклика этих свойств в координатах (Щ, П, Ц). Используя несложные алгоритмы, можно пересчитать эту поверхность в любых других координатах, например (В/Ц, r, В), и тем самым изучить, какие из факторов, связанных со взаимным соотношением материалов, имеют наиболее сильное влияние. Однако для решения задачи определения экономической эффективности от применения добавки будет полезным реализация такой идеи. В силу монотонного характера поверхности отклика как осад-

Таблица 1
Table 1Анализ отсева инертных материалов
Sieving analysis of inert materials

Щебень гравийный							
Размер сит, мм	25	20	12,5	5	Дно	Насыпная плотность, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³
Содержание, %	1,6	16,3	75,2	6,2	0,7	1,45	2,65
Песок							
Размер сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Дно	Насыпная плотность, г/см ³
Содержание, %	7,9	7,3	22,4	32,8	23,9	5,7	1,6
							2,65

ки конуса, так и прочности при фиксированном значении соотношения заполнителей $r = \Pi / (\Pi + \Psi)$ будет существовать не более одной рецептуры, обладающей заданными значениями осадки конуса и прочности (либо 0 рецептур, либо 1). Поэтому можно построить зависимость стоимости S единицы объема бетонной смеси как функции осадки конуса и прочности, т. е. в координатах R , ОК и далее вычислить разницу ΔS между функциями для составов без добавок и с добавкой:

$$\Delta S = S(R, ОК) - S(R, ОК; D).$$

Переход к координатам R , ОК связан с тем, что на практике необходимо сравнивать стоимость именно тех составов, которые обладают одинаковыми свой-

ствами, а не составов с одинаковым расходом материалов.

Анализ данных на рис. 1 показывает, во-первых, что при наблюдаемом соотношении стоимости материалов применение добавки имеет экономическую целесообразность для высокоподвижных бетонных смесей со значением прочности до 35–40 МПа, что примерно будет соответствовать классам В25–30. Чем выше стоимость добавки, тем больше граница эффективности смещается в сторону меньших значений прочности. Например, снижение стоимости добавки с 25 до 15 р./кг, согласно данным на рис. 1, может поднять верхнюю границу по прочности до 45 МПа. При этом, однако, попытка варьировать соотношение между песком и щебнем относительно

Таблица 2
Table 2Экспериментальный план бездобавочных смесей
Experimental plan for additive-free mixtures

Щ, кг/м ³	П, кг/м ³	Ц, кг/м ³	В, кг/м ³	R_1 (ТВО), МПа	R_7 , МПа	R_{28} , МПа	ОК, см
1140	642	428	190	41	42,7	57,7	8,5
700	831	573	238	39	43,3	58,5	18,5
1110	691	437	180	40,9	42,8	57,8	3,5
908	835	412	210	32,7	33,6	45,4	17,5
888	845	346	235	16,1	20,3	27,4	25,5
976	933	357	165	35,3	42,6	57,5	0,5
1154	838	181	190	8,8	11,2	15,6	9
729	1061	403	195	34,2	33,8	44,9	4
716	915	590	195	52,4	54,1	61,5	0,5
699	1119	250	234	8,1	10,7	15,1	23,5
952	911	349	185	27,3	29,1	38,6	7
700	1207	250	200	13,8	17,2	25,6	2
1150	866	200	175	13	16,8	24,2	2,5
1126	600	400	220	26,6	28,9	34,8	22,5
1126	765	300	190	22,6	25,4	34	12
928	766	500	200	36	46,1	57,6	7
928	1010	260	185	15,5	20,5	25,2	2,5
928	945	359	178	33,5	43	52,2	2

Таблица 3
Table 3Экспериментальный план смесей с добавкой на основе ЛСТ – 1,3% от расхода цемента
Experimental plan for mixtures with an additive based on lignosulfonate – 1.3% of the cement consumption

Щ, кг/м ³	П, кг/м ³	Ц, кг/м ³	В, кг/м ³	R_1 (ТВО), МПа	R_7 , МПа	R_{28} , МПа	ОК, см
689	1223	306	180	23	27,5	32,8	0,5
689	989	581	180	43	50,9	60,4	0
1166	879	213	160	17,6	23,9	32,2	0,5
1166	701	421	160	39	52,5	56,8	3
938	967	376	160	34,7	41,2	47,1	2
938	928	361	180	24,8	36,7	43,2	7,5
938	888	345	200	23,9	29,4	40,3	20
938	868	337	210	18,9	27,2	39,5	26
702	1138	285	214	13,6	17,7	24,6	8,5
702	920	540	214	30,7	42,5	54,4	17
1140	830	221	186	11,7	17,9	25	8
1140	666	400	190	26,6	39,8	42,7	18
702	1092	273	235	7,9	11,8	18,1	23,8
702	904	531	223	29,5	39,1	47,6	22,5
1140	786	209	206	8,2	10,6	15,9	23
1140	644	386	203	27,8	34	39,7	23

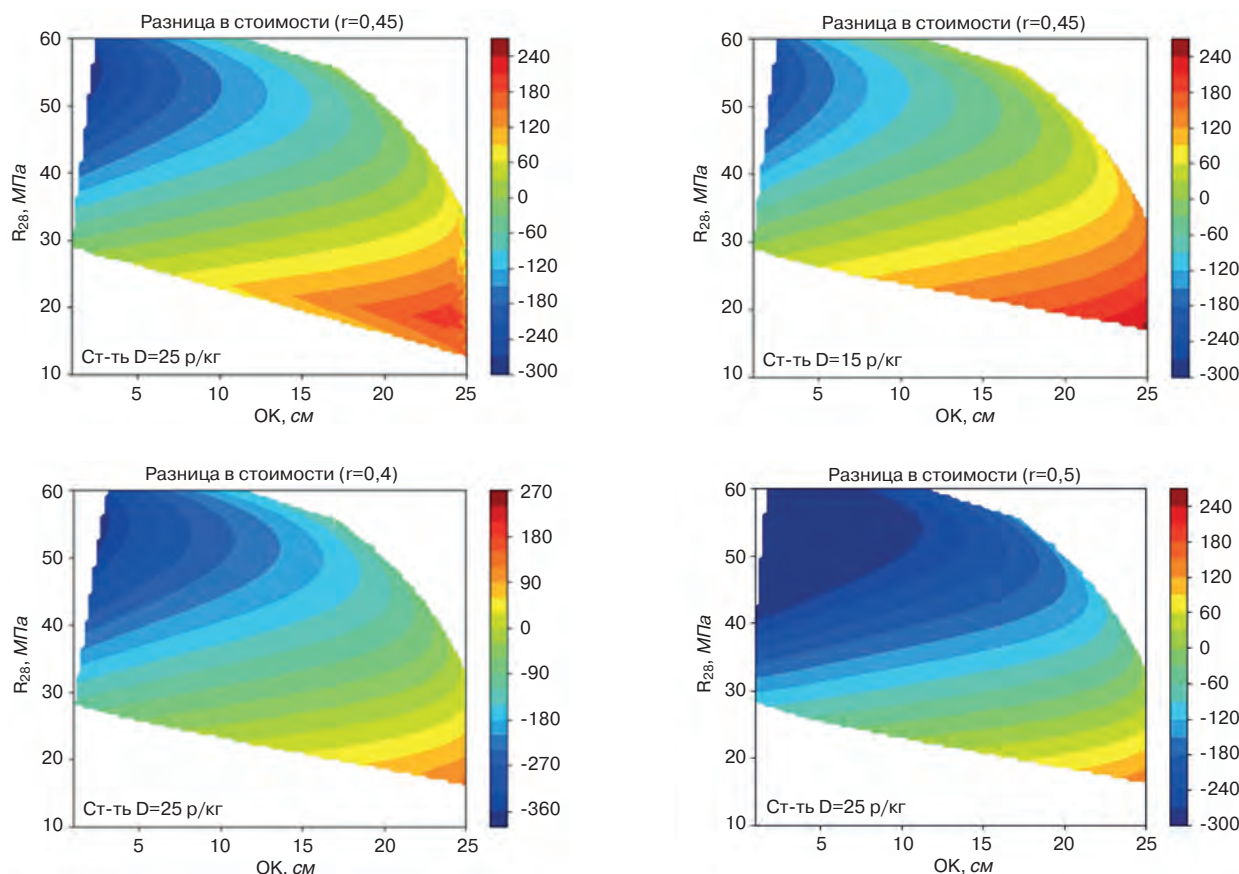


Рис. 1. Влияние стоимости добавки (верхние две панели) и соотношения заполнителей (нижние две панели) на себестоимость бетонной смеси. Стоимость сырьевых материалов: щебень – 1350 р./т, песок – 550 р./т, цемент – 5500 р./т. Стоимость добавки D за кг указана во вставке к панелям; принимаем, что пластифицирующая способность добавок с различной стоимостью одинакова

Fig. 1. Influence of additive cost (upper two panels) and ratio of aggregates (lower two panels) on concrete mix prime cost. The cost of raw materials: crushed stone – 1350 rubles/t, sand – 550 rubles/t, cement – 5500 rubles/t. The cost of additive D per kg is indicated in the insert to the panels; we assume that the plasticizing ability of additives with different costs is the same.

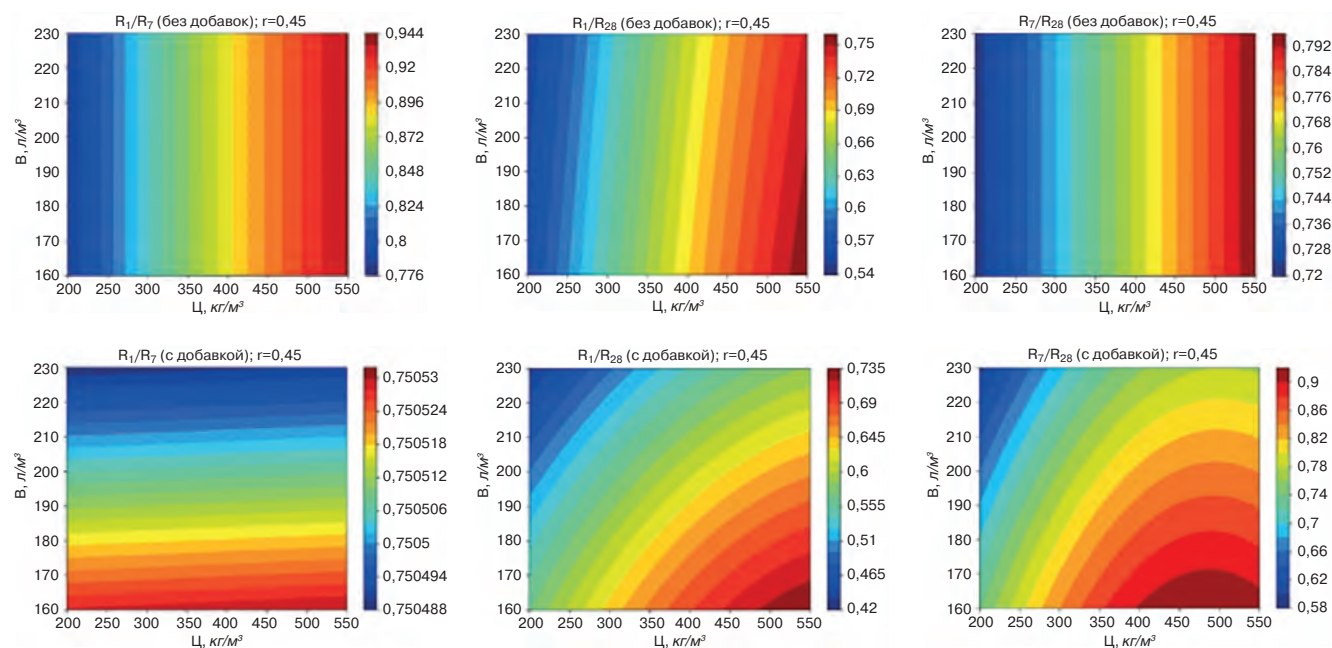


Рис. 2. Относительный темп набора прочности для бетонов без пластифицирующей добавки (верхний ряд панелей) и с пластифицирующей добавкой (нижний ряд панелей)

Fig. 2. Relative rate of strength development for concretes without plasticizer (upper row of panels) and with plasticizer (lower row of panels)

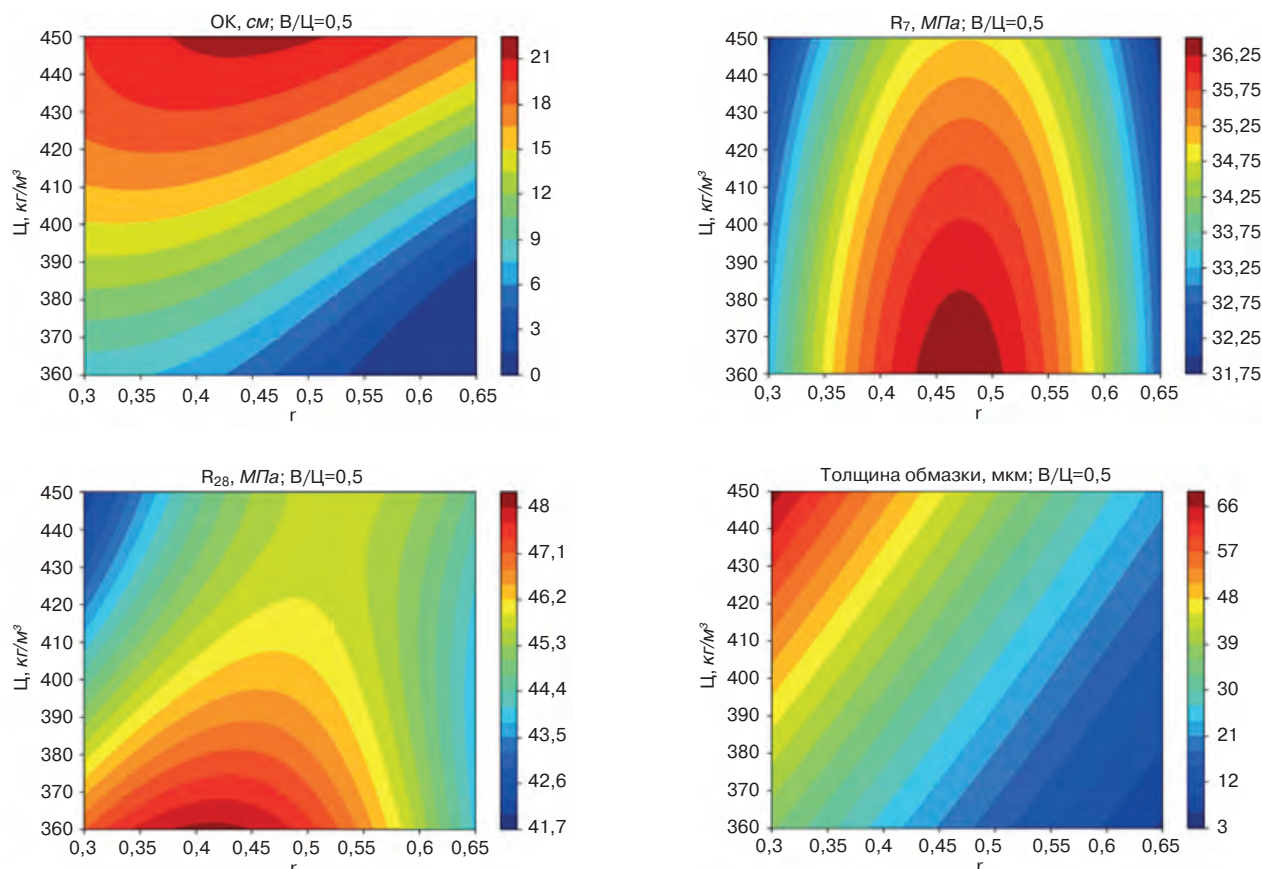


Рис. 3. Структура зависимости осадки конуса, прочностей R_7 и R_{28} и толщины обмазки от соотношения между песком и крупным заполнителем и расхода цемента. Составы без пластифицирующей добавки

Fig. 3. The structure of the dependence of the cone slump, strengths R_7 and R_{28} and the thickness of the mixture on the ratio between sand and coarse aggregate and cement consumption. Compounds without plasticizing additives.

значения $r=0,45$ приводит к удорожанию себестоимости бетонной смеси. На нижних панелях рис. 1 можно наблюдать, что при сдвиге r на $\pm 0,05$ область с голубовато-синим оттенком увеличила свою площадь, при этом максимум желто-красного оттенка уменьшил свое значение, что отражает удорожание единицы объема смеси. Причиной этого является увеличение доли крупного заполнителя при уменьшении r – щебня, который в соответствии с исходной информацией имеет большой удельный вклад в себестоимость смеси. Удешевление за счет уменьшения расхода цементного теста не может в достаточной мере компенсировать удорожание за счет дополнительного вовлечения в смесь крупного заполнителя. Увеличение себестоимости при возрастании r объясняется тем, что увеличивается удельная поверхность смеси заполнителей, повышается их водопотребность и эффект от введения пластифицирующей добавки снижается настолько, что ее водоредуцирующей способности становится недостаточно для того, чтобы обеспечить сохранение подвижности смеси при уменьшении объема цементного теста.

Обработка и представление результатов в виде, подобно рис. 1, обладает тем преимуществом, что

позволяет экономить время в поисках путей удешевления бетонных смесей и определять максимальный потенциал использования конкретной добавки. В производственной практике часто возникает ситуация, когда необходимо тестировать различные типы добавок, от различных производителей и с различной стоимостью. В таких случаях обычно тестируется некоторый состав без добавки; потом, не меняя соотношения заполнителей вводится добавка, определяется необходимое количество воды для достижения заданной подвижности смеси и последовательно задается несколько уменьшающихся значений расходов цемента. Подобная процедура повторяется либо для всей номенклатуры составов, либо для ее части. Информация, полученная с одной серии замесов, редко используется для того, чтобы сократить общее количество лабораторных замесов, что можно осуществить благодаря корреляциям свойств бетона для различных составов. Например, структура данных на рис. 1 показывает, что если выявить эффект удорожания даже для одного любого состава с классом подвижности П1–П2, то нет никакой необходимости проверять далее все остальные составы с этим же классом

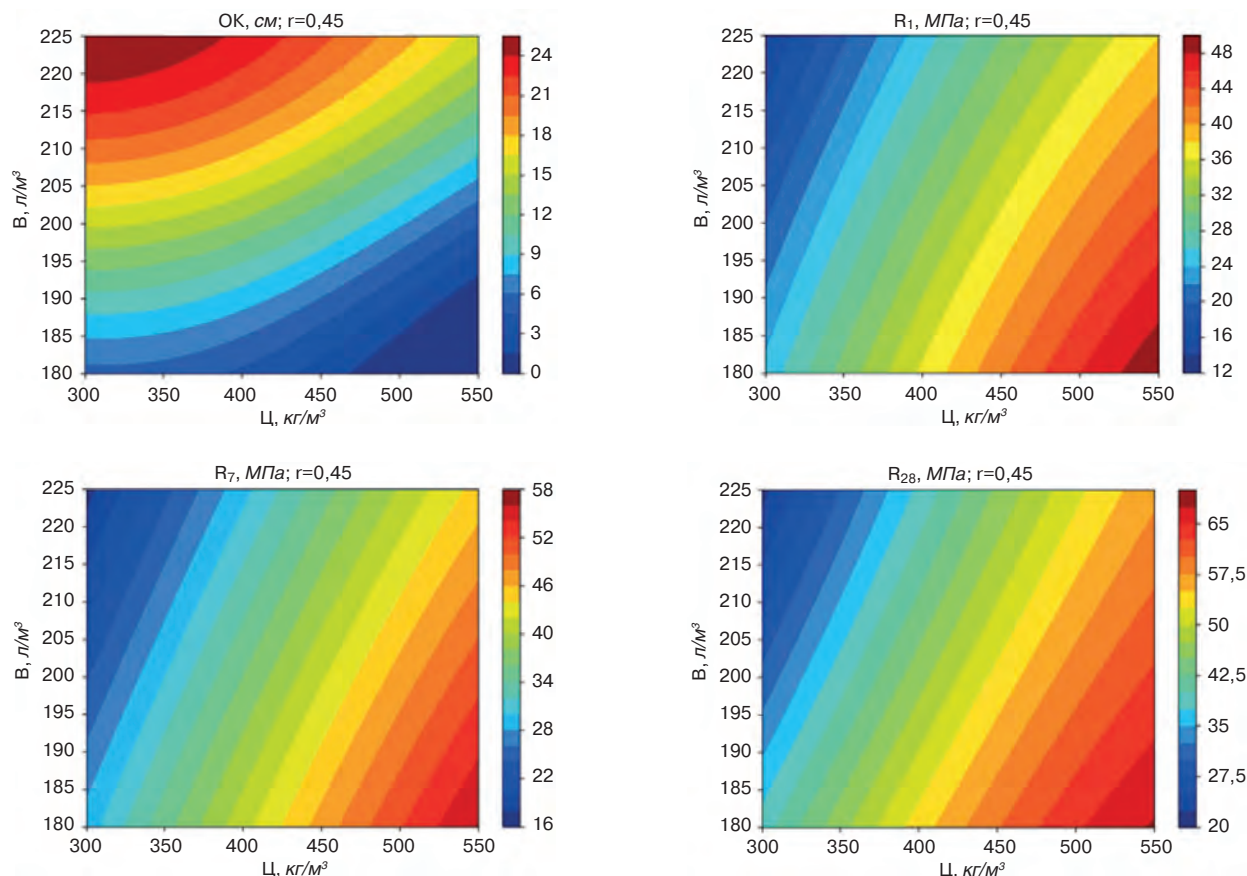


Рис. 4. Структура зависимости осадки конуса, прочностей R_1 , R_7 и R_{28} в координатах (В, Ц). Составы без пластифицирующей добавки
 Fig. 4. Dependence structure of cone slump, strengths R_1 , R_7 and R_{28} in coordinates (V, C). Compounds without plasticizing additives

подвижности, поскольку экономически они будут нецелесообразны. В этом случае для данной добавки можно сосредоточиться на оптимизации высокоподвижных бетонных смесей. Структура данных может выглядеть по-другому, если использовать другие сырьевые материалы, например взять песок с повышенной долей мелкой фракции или цемент с более высокой маркой активности. Совершенно точно можно сказать, что структура данных изменится и при использовании другого типа добавки, например на базе поликарбоксилата, имеющего более сильный водоредуцирующий (по сравнению с лигносульфонатной базой) эффект и, как правило, более высокую стоимость. Проведенный нами анализ для этого случая показал, что экономическая целесообразность будет наблюдаться для малоподвижных смесей с прочностью R_{28} выше 35 МПа. Можно обобщить результаты проведенной работы в том утверждении, что в большинстве практических случаев добавка будет иметь положительную экономическую эффективность только для какого-то определенного диапазона расходов материалов. Одинаково эффективно работающую для всего диапазона расходов материалов одну пластифицирующую добавку, по всей видимости, подобрать не

получится. Следует отметить, что мы оставили за рамками обсуждения вопрос оптимизации расхода самой добавки, поскольку он был зафиксирован по постоянному значению (1,3% от расхода цемента по товарному продукту). Возможно, если ослабить это требование, то можно будет получить структуру данных, отличную от той, что наблюдается на рис. 1. Для исследования вопросов оптимизации составов при варьировании содержания добавки может быть полезным развитие идей, описанных в разделе *Формализация* первой части статьи [9].

При обсуждении вопросов эффективности применения пластифицирующей добавки в производственной практике часто сравнивают результат по прочности на 7-е сут нормального твердения. Однако такой подход может исказить реальность, соответствующую 28-суточным испытаниям ввиду того, что темп набора прочности для бетонов с содержанием добавки может отличаться от такого без добавки. Полезным с практической стороны является количественная оценка того, насколько однородным выглядят отношения прочностей на 1-е, 7-е и 28-е сут для различных составов. Для этих целей определим функцию $k_{ij}^{0,D} = R_i / R_j$ с верхним индексом (0|D), обозначающим составы без добавки (0) и с содержа-

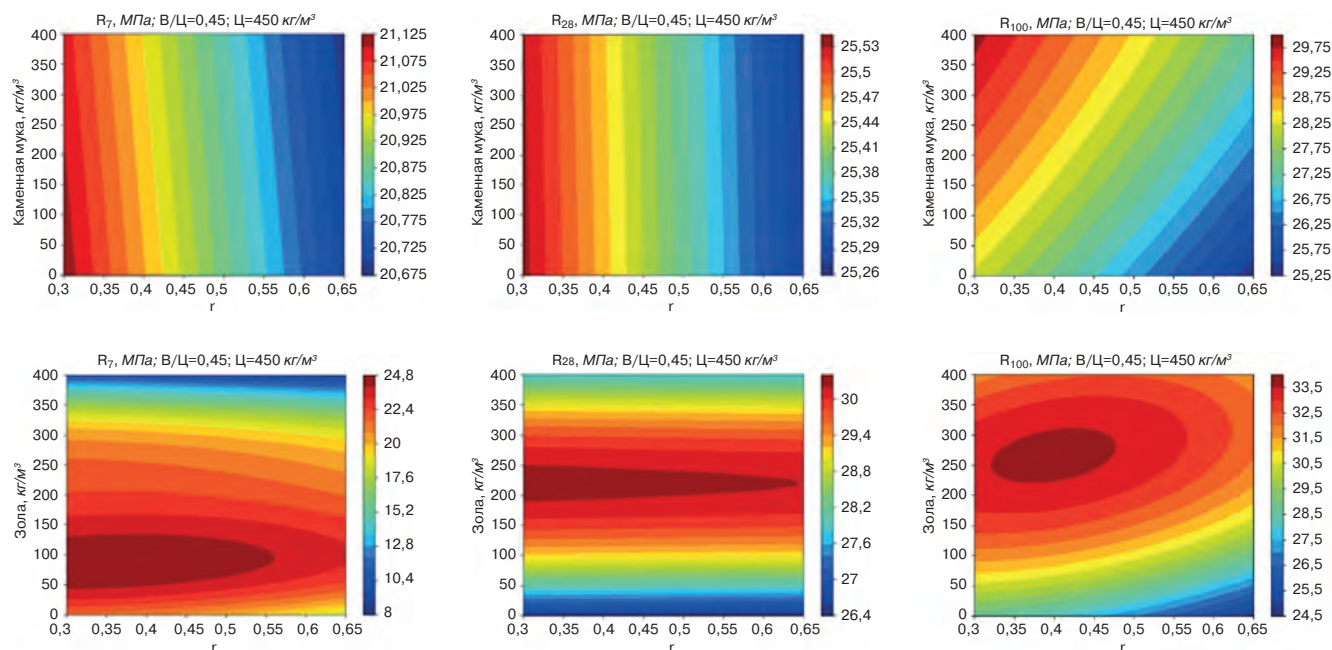


Рис. 5. Срезы поверхности отклика в координатах (r , зола/каменная мука) на 7-е, 28-е и 100-е сут нормального твердения
Fig. 5. Sections of the response surface in coordinates (r , Ash/Stone flour) on the 7th, 28th and 100th day of normal hardening

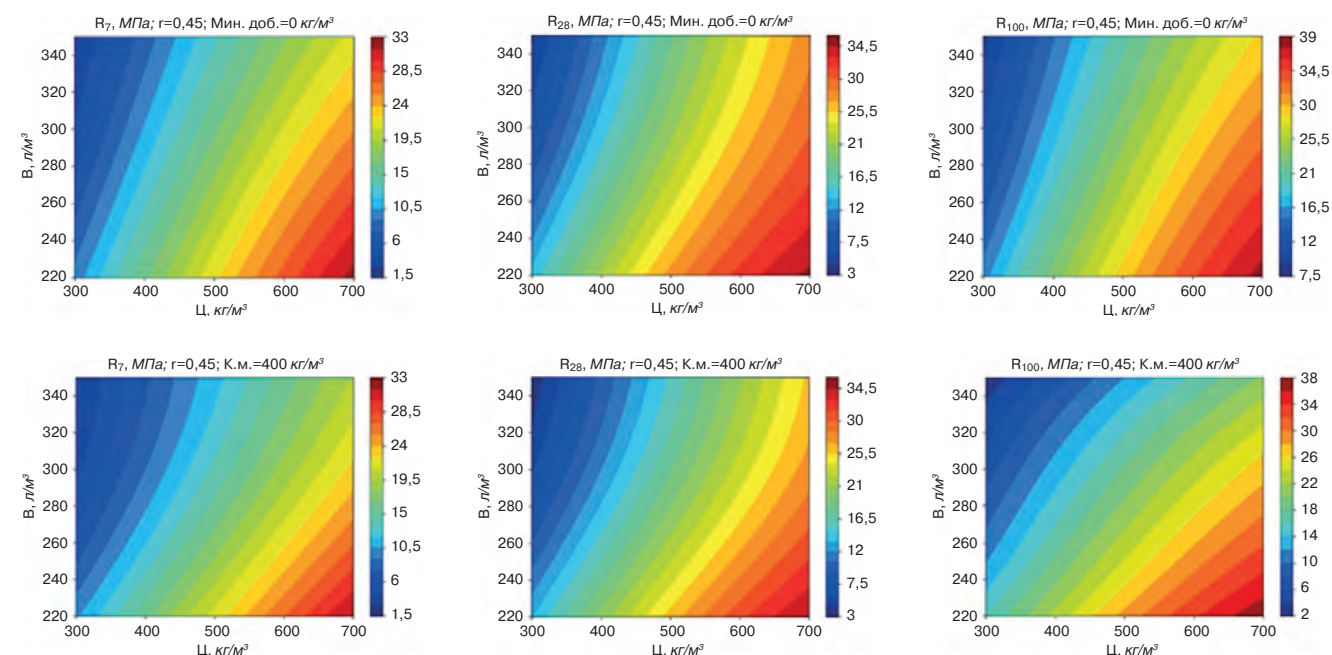


Рис. 6. Срезы поверхности отклика в координатах (B , C) для демонстрации сохранения доминирующего вклада в прочность водоцементного отношения в образцах, содержащих каменную муку
Fig. 6. Sections of the response surface in coordinates (W , C) to demonstrate the preservation of the dominant contribution to the strength of the water-cement ratio in samples containing stone flour

нием добавки (D), и нижним индексом (i,j), соответствующим срокам набора прочности – {1,7,28} сут. Прочность на 1-е сут измерялась для образцов, подвергавшихся тепловлажностной обработке по следующему режиму: выдерживание при комнатной температуре – 4 ч; подъем до 60°C – 4 ч; выдерживание при этой температуре – 8 ч; естественное охлаждение до комнатной температуры. Результаты количественного анализа функции $k_{ij}^{0,D}$ представлены

на рис. 2 в координатах (B , C) при фиксированном отношении песка и щебня $r=0,45$.

Наиболее однородно выглядят функции k_{7-28}^0 и k_{1-7}^D , причем количественно значения этих функций на всем диапазоне B , C близки друг к другу $\sim 0,75$. Полученное значение часто встречается в литературных данных как коэффициент прогноза 28-суточных значений прочности по 7-суточным значениям. Из сравнения функций k_{1-7}^D и k_{7-28}^0 можно заключить, что в со-

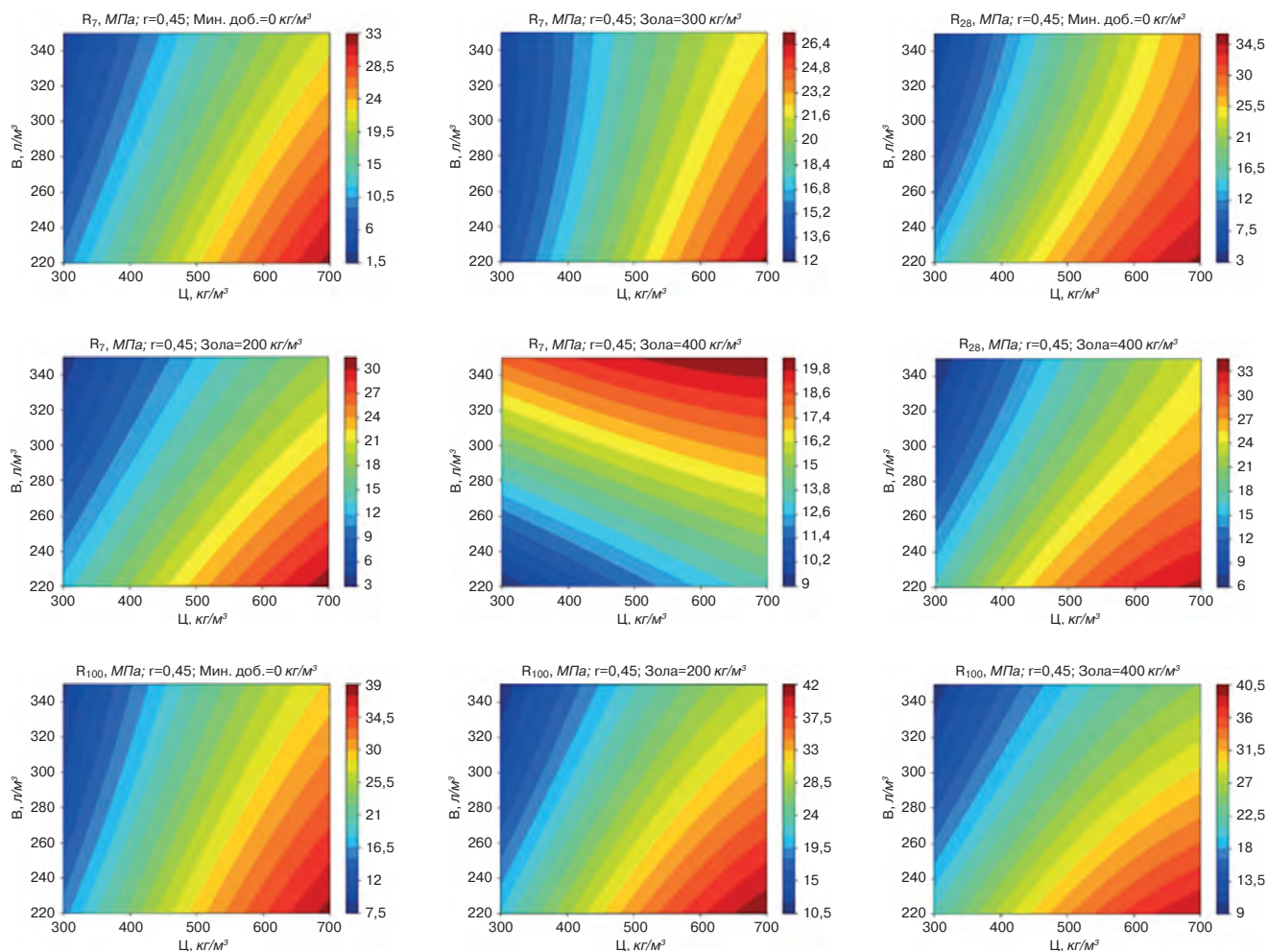


Рис. 7. Срезы поверхности отклика прочности в координатах (W , C) для образцов, содержащих золу
Fig. 7. Sections of the strength response surface in coordinates (W , C) for samples containing ash

ставах, содержащих используемую в экспериментах добавку, скорее всего, подавляется начальный набор прочности бетона при высоких расходах цемента. Например, значения функции k_{1-7}^0 при расходах цемента более 300–350 кг/м³ изменяются от 0,85 до 0,94, в то время как при тех же условиях функция k_{1-7}^D имеет практически постоянное значение ~0,75. В бездобавочных составах наблюдается слабая зависимость темпа набора прочности от содержания воды, основной ее градиент связан с расходом цемента. В составах, содержащих добавку, проявляется зависимость темпа набора прочности от количества воды – с ее увеличением бетон набирает прочность медленнее во времени (см. функции k_{7-28}^D , k_{1-28}^D). Нижняя по воде область функции k_{7-28}^D имеет более высокие значения по сравнению с функцией k_{7-28}^0 . Таким образом, использовать какое-то одно значение коэффициента для перевода 7-суточных значений прочности в 28-суточные для оценки эффективности действия добавки на прочность неверно. Конкретно в случае, описываемом в данном разделе, при использовании коэффициента 0,75 для 7-суточных испытаний образ-

цов с добавками было бы получено завышенное на 20% значение прочности на 28-е сут. С другой стороны, высокий темп набора прочности часто имеет первостепенное значение для производственных задач и сам может являться целью оптимизации [10]. В этом случае представленные в данном разделе результаты и методы, которыми они получены, имеют хорошие перспективы для практического применения. Например, анализируя функцию k_{7-28}^D , можно определить, что наибольших значений темп набора прочности достигает для расходов цемента выше 250 кг/м³ при содержании воды до 210 л/м³.

Соотношение между песком и крупным заполнителем $r = \Pi / (\Pi + \Sigma)$ является одним из главных вопросов, когда заходит разговор об оптимизации состава бетона [10–18]. Для успешного решения этого вопроса необходимо изучить структуру зависимости технологических свойств бетонной смеси и прочности от соотношения заполнителей. Для анализа такой зависимости будут полезными методы построения поверхностей отклика подобных изображенным на рис. 3 и построенных для составов без пластифицирующей

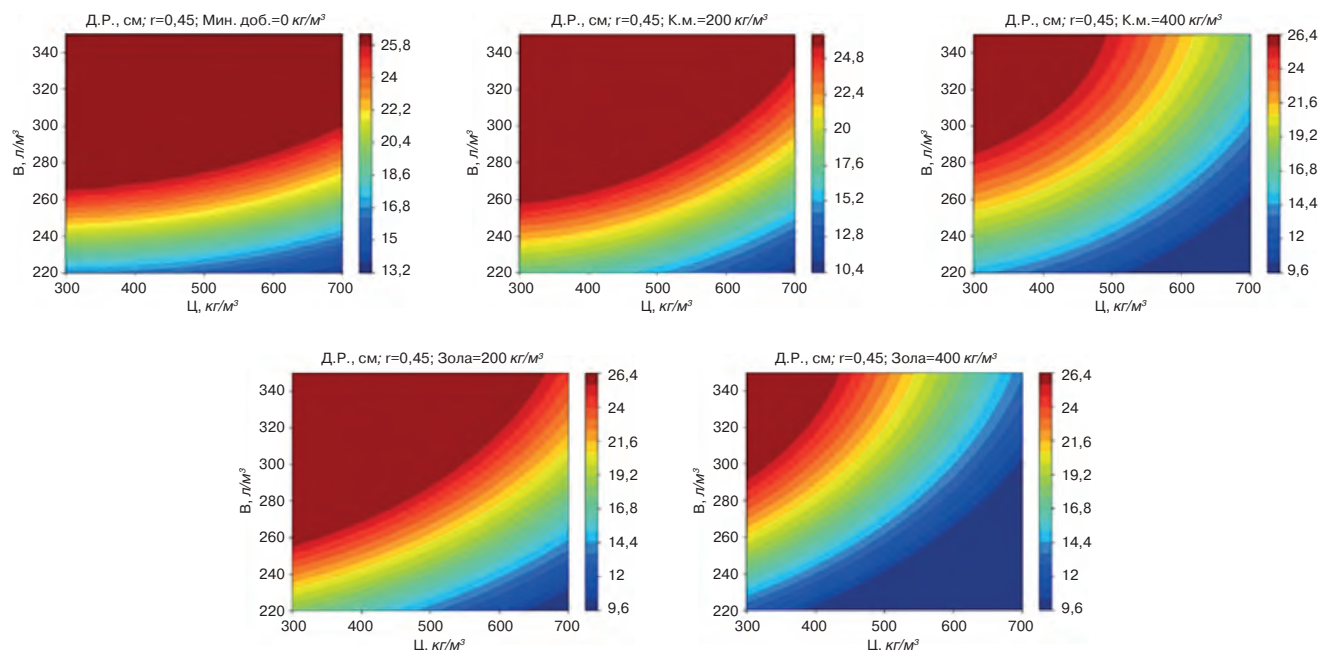


Рис. 8. Срезы поверхности отклика подвижности смеси, измеряемой с помощью величины диаметра расплыва (Д.Р.) мини-конуса для смесей с каменной мукой (к.м., верхний ряд) и золой (нижний ряд). Левая панель — смесь без наполнителей

Fig. 8. Sections of the response surface of the mobility of the mixture, measured using the value of the diameter of the spread (D.S.) of the minicone for mixtures with stone flour (Sf., top row) and ash (bottom row). Left panel — mixture without fillers

добавки. Для расчета толщины обмазки была использована формула (13), эта зависимость приведена с целью оценки степени ее корреляции с прочностью и осадкой конуса. Поскольку B/C фиксированно, можно ожидать, что прочность цементного камня будет величиной, близкой к некоторому постоянному значению и представленные координаты отразят факторы, связанные именно с соотношением заполнителей и долей цементного теста/камня. С увеличением доли цементного теста ожидаемо увеличивается осадка конуса бетонной смеси, демонстрируя хорошую корреляцию с толщиной обмазки. При этом последняя имеет меньшее влияние на прочность, отражая скорее тенденцию, что с ростом толщины обмазки более вероятно наблюдать уменьшение прочности. Этот эффект отчетливо прослеживается на панелях R_7 , R_{28} и его интерпретация может заключаться в том, что при увеличении толщины обмазки уменьшается роль каркаса из частиц заполнителя, принимающего на себя часть напряжений при распределении давления, поскольку среднее расстояние между этими частицами будет увеличиваться и заполняться цементным тестом. Интересное наблюдение следует из анализа зависимости прочности от соотношения заполнителей r : максимальное значение прочности достигается при определенном значении r , зависящим, в свою очередь, от сроков испытания образцов на прочность. Так, например, для R_7 максимальное значение прочности достигается для $r \approx 0,475$ и не зависит от расхода цемента, а для R_{28} — для r в диапазоне от 0,4

до 0,5, зависящим от расхода цемента. Анализируя подобным образом представленные данные для любого другого конкретного набора материалов, можно достаточно быстро выделять закономерности, имеющие практическую ценность.

Координаты (r , C) удобны для выявления факторов, связанных с соотношением между заполнителями, однако для оптимизации водоцементного отношения необходимо изучать поверхности отклика в других координатах — (B , C). Характерные распределения осадки конуса смеси и прочностей R_1 , R_7 и R_{28} представлены для бездобавочных составов на панелях рис. 4. Осадку конуса возрастает с ростом воды в смеси, что ожидаемо, однако интересно отметить, что для диапазона расходов цемента как минимум от 300 до 400–450 кг/м³ наблюдается слабая ее зависимость от количества цемента, что является отражением встречающегося в литературе «правила о постоянстве водопотребности» [16]. Повышение расхода цемента свыше 400–450 кг/м³ линейным образом уменьшает осадку конуса и угловой коэффициент этой зависимости легко оценить даже визуально. В распределениях прочностей R_1 , R_7 , R_{28} отчетливо прослеживается линейный закон ее изменения от B/C с примерно одинаковым угловым коэффициентом, что позволяет эффективно использовать одно уравнение для оптимизации состава бетона. Отметим, что представленные результаты хотя и отражают известные факты и закономерности, тем не менее позволяют целостно взглянуть на свойства

бетона и бетонной смеси, увидеть их взаимосвязь, а также определить, какие факторы и в какой количественной мере влияют на эти свойства. Формат представления данных, полученных по одной модели, в различных координатах позволяет комплексно решать вопросы оптимизации состава бетона и при этом дает интуитивно понятную для интерпретации внутренней механики взаимодействия параметров между собой картину.

5-компонентные смеси мелкозернистого бетона с минеральными наполнителями

В данном разделе обсудим задачу оценки эффективности применения активной золы [4–6, 19–21]. Критерием оптимального содержания золы будем считать максимальное достижение прочности при неизменном количестве в смеси цемента и постоянном водоцементном отношении. Решение проблемы оптимизации будет основано на изучении срезов поверхности отклика в различных координатах 4-мерной модели прочности и подвижности, измеряемой диаметром расплава мини-конуса, имеющего начальный нижний диаметр 10 см, на встряхивающем лабораторном столике. Испытание на прочность осуществлялось на образцах-кубиках со стороной 7 см. Для оценки эффектов, связанных с активностью золы, была построена модель прочности и подвижности смесей, в которых вместо золы использовалась каменная мука [22]. Исходные для смесей материалы: крупный заполнитель – отсеянная фракция 3–5 мм; мелкий заполнитель – отсеянная фракция 0,315 мм; цемент – портландцемент ЦЕМ I 42,5Б производства АО «Мордовцемент»; НГЦТ – 26,7%, истинная плотность – 3,11 г/см³; зола-уноса производства Новочеркасской ТЭЦ, истинная плотность – 2,4 г/см³, доминирующая фракция – 50 мкм; каменная мука – истинная плотность 2,65 г/см³, доминирующая фракция – 50 мкм [18]. Был составлен максимальный экспериментальный план, состоящий из 120 лабораторных замесов. Последующая его реализация и обработка данных показали, что структура поверхности отклика, в принципе, позволяет ее восстановить по 20–25 точкам, а при накоплении хорошей статистики количество лабораторных замесов экспериментального плана можно уменьшить до 10. Исследование динамики набора прочности осуществлялась по испытаниям образцов в 7-, 28- 100-суточные периоды твердения в нормальных условиях.

На рис. 5 представлены срезы поверхности отклика прочности на различные сроки твердения (см. названия над панелями) для образцов, содержащих каменную муку (верхняя тройка панелей), и для образцов, содержащих золу (нижняя тройка панелей).

Крупный, мелкий заполнители и цемент для обеих групп образцов оставались неизменными. Диапазон изменения цемента – от 200 до 800 кг/м³, воды – от 180 до 370 л/м³, соотношения $r = M_k / (M_k + K_p)$, где M_k , K_p – масса мелкого и крупного заполнителей соответственно; в диапазоне от 0,3 до 0,7 расход минеральной добавки варьировался от 0 до 450 кг/м³. Такой широкий диапазон расходов материалов и значений параметров обусловлен целью максимальным образом охватить характерные особенности структуры поверхностей отклика и задачей выявления базовых закономерностей, управляющих подвижностью смесей и прочностью образцов бетона. Для представления данных были выбраны срезы из ориентировочной середины диапазона расхода цемента – 450 кг/м³, при В/Ц=0,45. При таких значениях можно увидеть закономерности изменения прочности в широком диапазоне, от 20 до 35 МПа. По вертикальной оси откладывается расход минеральной добавки, по горизонтальной – соотношение между мелким и крупным заполнителями. Инертность каменной муки отчетливо прослеживается на срезах R_{77} , R_{28} – при изменении содержания каменной муки вплоть до 400 кг/м³ не наблюдается существенного изменения прочности, равно как и не наблюдается существенного ее изменения при варьировании r от 0,3 до 0,65. Фактически для этих сроков твердения набор прочности определяется водоцементным отношением (рис. 6). Однако на длительных сроках твердения можно обнаружить отклик от появления в смеси каменной муки, природа которого не совсем ясна – прочность R_{100} в образцах с содержанием каменной муки показывает более высокие значения по сравнению с образцами без наполнителя. Одно из потенциальных объяснений такого эффекта – повышение плотности упаковки в смесях, содержащих каменную муку, однако в пользу этого утверждения необходимо провести дополнительное изучение вопроса.

Распределение прочности для образцов, содержащих золу (рис. 5, нижняя тройка панелей), показывает явный эффект прироста прочности, связанный с активностью золы. При этом, как следует из структуры этого распределения, максимум в значении прочности зависит от сроков твердения. На 7-е сут максимальную прочность показывают образцы с содержанием золы порядка 15% по расходу цемента, на 28-е сут этот максимум смещается до 40%, и для прочности на 100-е сут ее максимальное значение будет при доле золы почти 50% от массы цемента. Эффект по приросту прочности составляет порядка 20%.

В пользу проявления активности изучаемой золы должен говорить факт изменения характера влияния водоцементного отношения на прочность, что демонстрируют данные, представленные на рис. 7, –

распределения прочности в координатах (В, Ц) для образцов с золой и без нее для различных сроков твердения. Левые две панели в первом и втором рядах соответствуют данным R_7 с содержанием золы от 0 до 400 кг/м³. В окрестности расхода золы порядка 400 кг/м³ наблюдается качественная смена зависимости прочности от водоцементного отношения – угловой коэффициент при В/Ц меняет свой знак, и наблюдается резкое уменьшение прочности на всем диапазоне В, Ц. На рис. 5 такой спад проявляется на панели с распределением R_7 для смесей, содержащих золу: в верхней части панели присутствует небольшой участок с оттенком синего цвета, показывающий значительное снижение прочности относительно других участков. Для выявления природы происхождения этого эффекта необходимо проводить дополнительные исследования, выходящие за рамки текущей работы.

Характер изменения влияния водоцементного отношения на прочность R_{28} , R_{100} для образцов, содержащих золу, согласуется между собой при содержании золы до 400 кг/м³ (рис. 7) – угловой коэффициент наклона при В/Ц с увеличением количества золы в смеси уменьшается, отражая факт уменьшения влияния фактора В/Ц на прочность.

Важной проблемой также является определение количественной меры влияния минеральных наполнителей на подвижность смеси. Оценку этого фактора можно сделать на основе анализа срезов поверхности отклика, построенной для диаметра расплыва (Д.Р.) мини-конуса на встряхивающем лабораторном столике [23] (рис. 8). Минимальный диаметр расплыва, соответствующий жестким смесям, равен 10 см, максимальный – 26–27 см.

При отсутствии минеральной добавки смеси достигают своего насыщения по расплыву мини-конуса при содержании воды порядка 280–300 л/м³, введение каменной муки или золы смещает эту границу в большую сторону, при этом более сильно этот эффект проявляется для большего количества цемента. При расходах цемента до 500 кг/м³ рассмотренные варианты минеральных наполнителей до расхода порядка 200 кг/м³ не оказывают значительного влияния на подвижность смеси. Однако с увеличением расхода наполнителей свыше 200 кг/м³ это влияние уже имеет более заметный характер. С диаметром расплыва мини-конуса косвенно связана относительная вязкость смеси, характер ее возрастания при увеличении удельной поверхности твердой фазы имеет сильно выраженную нелинейную зависимость от последней, что отчетливо прослеживается визуально на распределениях диаметра расплыва – линии постоянного значения для расхода наполнителей 400 кг/м³ имеют экспоненциальный рост при увеличении расхода цемента.

Представленные в данном разделе результаты демонстрируют потенциал для выявления и исследования различных факторов, определяющих прочностные и реологические характеристики смесей и бетона с применением минеральных наполнителей. Методы, с помощью которых эти результаты были получены, могут оказаться полезными также и при оптимизации составов бетона с минеральными наполнителями. Целостность полученной картины по свойствам позволяет обосновать оптимально подобранный по целевым критериям состав и при этом значительно уменьшить трудоемкость комплексной оптимизации.

Заключение

Свойства бетонных смесей и бетонов, с одной стороны, являются результатом сложных физико-химических процессов, протекающих в открытых системах, а с другой – бетон как строительный материал имеет неплохо структурированную историю статистически накопленных данных, формализованных в виде различных эмпирических соотношений. Последние математически можно представить как элементы срезов многомерной поверхности отклика того или иного свойства в пространстве возможных составов и параметров технологических процессов. Прогресс в методах обработки экспериментальных данных и вычислительных возможностей позволяет поставить вопрос об определении и исследовании полномерной (во всем пространстве составов) структуры поверхности отклика. В попытке поиска ответа на этот вопрос в данном цикле из двух статей предложена концепция построения вероятностных моделей свойств бетонных смесей и бетонов в пространстве возможных составов. Данный класс моделей можно рассматривать либо как практический, инженерный инструмент для решения задач поиска составов бетона с заданными свойствами и/или комплексной оптимизации составов бетона, либо как метод анализа факторных составляющих с целью тестирования на правдоподобность физико-химических гипотез о процессах, протекающих в бетонных смесях. Перспективы применения вероятностных моделей в указанных направлениях продемонстрированы в соответствующих разделах данной статьи, где, в частности, показана возможность идентификации области составов среди всех возможных, с положительным экономическим эффектом от применения пластифицирующих добавок. В качестве примера факторного анализа рассмотрена на качественном уровне корреляция эффективной толщины обмазки зерен заполнителей цементным тестом с осадкой конуса бетонной смеси. Количественный анализ этого вопроса в текущем варианте публикации выполнен не был, однако он

не вызовет принципиальных трудностей, поскольку математический аппарат для исследования таких проблем развит в соответствующих разделах математической статистики. Построение полномерных моделей прочности и осадки конуса позволяет однозначно поставить и решить вопрос оптимизации соотношения крупного и мелкого заполнителей в составе бетонной смеси товарного назначения для конкретных производственных материалов. В тех случаях, когда удельные стоимости заполнителей и цемента в составе бетонных смесей имеют сравнимую между собой величину, комплексное изучение поверхностей отклика может открыть нетривиальные пути оптимизации составов по стоимости. Например, применение среднего/крупного песка с высокой рыночной стоимостью позволяет увеличить для определенной области составов прочность бетона на 15–20% [10, 16, 24], тем самым обеспечивая значительный экономический эффект по сравнению с песком низкой рыночной стоимости, но имеющим высокое содержание мелкой ($\leq 0,16$ мм) фракции.

В контексте использования обсуждаемых подходов обогащается ассортимент инструментов для решения проблем комплексной оптимизации составов бетона. Понятие о непрерывности свойств составов по области их определения в совокупности с длинной корреляции позволяет построить поверхность отклика для любого свойства, допускающего количественную меру оценки и удовлетворяющего критерию воспроизводимости этих значений. При этих условиях и при наличии достаточного количества, зависящего от длины корреляции, эксперименталь-

ных данных решение проблемы комплексной оптимизации сводится к разработке удобных интерфейсов навигации по значениям поверхности отклика в пространстве составов. Типичным примером такой навигации может служить построение срезов в различных системах координат. Метод построения моделей прочности и подвижности показывает хорошую устойчивость при работе с мелкозернистыми бетонными смесями, содержащими минеральные наполнители, и отражает как известные эмпирические закономерности, так и потенциально новые. В частности, анализ срезов поверхности отклика прочности в координатах (минеральная добавка/соотношение заполнителей) позволяет даже визуально определить область составов, демонстрирующих наибольшую эффективность активной золы-уноса с точки зрения прироста прочности. Ввиду остро встающих в настоящее время вопросов утилизации мелкодисперсных отходов промышленности, таких как шлаки, золы-уноса и т. д., обсуждаемые в данной статье методы работы с многокомпонентными бетонными смесями могут представлять определенный практический интерес.

References

Список литературы

- ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования.
- ГОСТ 7473–2010. Смесей бетонные. Технические условия.
- ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
- Kanamarlapudi, L., Jonalagadda, K.B., Jagarapu, D.C.K. et al. Different mineral admixtures in concrete: a review. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. 760. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2533-6>
- Глекель Ф.Л. Физико-химические основы применения минеральных добавок. Ташкент: «ФАН», 1975. 198 с.
- Mehta P.K., High performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. University of California, Berkeley, 2004.
- Фаликман В.П. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // *Популярное бетоноведение*. 2009. № 2 (28). С. 86–90.
- GOST 25192–2012. Betony. Klassifikatsiya i obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Concrete. Classification and general technical requirements]. (In Russian).
- GOST 7473–2010. Smesi betonnye. Tekhnicheskie usloviya [Concrete mixes. Specifications]. (In Russian).
- GOST 26633–2015. Betony tyazhelye i melkozernistye. Tekhnicheskie usloviya [Concrete is heavy and fine-grained. Specifications]. (In Russian).
- Kanamarlapudi, L., Jonalagadda, K.B., Jagarapu, D.C.K. et al. Different mineral admixtures in concrete: a review. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. 760. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2533-6>
- Glekel' F.L. Fiziko-khimicheskie osnovy primeneniya mineral'nykh dobavok [Physical and chemical bases of application of mineral additives]. Tashkent: «FAN». 1975. 198 p.
- Mehta P.K., High performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. University of California, Berkeley, 2004.
- Falikman V.R. Polycarboxylate hyperplasticizers: yesterday, today, tomorrow. *Populyarnoe betonovedenie*. 2009. No. 2 (28), pp. 86–90. (In Russian).
- Vovk A.I. Physical and chemical regularities of hydration and hardening of plasticized cement systems. Abstract of diss ... Doctor of Sciences (Engineering). Moscow. 1994. 36 p. (In Russian).
- Rezaev R.O., Dmitriev A.A., Chernyavsky D.V. Application of probabilistic approaches for the construc-

8. Вовк А.И. Физико-химические закономерности гидратации и твердения пластифицированных цементных систем: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994. 36 с.
9. Резаев Р.О., Дмитриев А.А., Чернявский Д.В. Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Ч. I (Теория) // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-25-37>
10. Калашников В.И. Эффективные высокопрочные и обычные бетоны. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2015. 148 с.
11. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.
12. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
13. De Larrard F. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. London and New York, 1998. 448 p.
14. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
15. Zongjin L. Advanced concrete technology. Wiley. 2011. 528 p.
16. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 499 с.
17. Белов В.В., Курятников Ю.Ю., Новиченкова Т.Б. Технология и свойства современных цементов и бетонов. М.: АСВ, 2014. 280 с.
18. Белов В.В., Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 5. С. 94–101.
19. Карпенко В.И. Бетоны на основе золошлаковых смесей // *Бетон и железобетон*. 1975. № 10. С. 20–30.
20. Михайлов К.В., Бужевич Г.А. Применение зол и шлаков ТЭС в бетонных и железобетонных конструкциях // *Бетон и железобетон*. 1972. № 7.
21. Тарасова А.Ю. Бетонные смеси высокой подвижности с золой-уноса для транспортного строительства: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 25 с.
22. Енджиевская И.Г., Васильовская Н.Г., Гофман О.В., Козьмин А.Д., Григорьева В.А. Мелкозернистые торкрет-бетоны с комплексными модификаторами // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 2. С. 164–169.
23. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии.
24. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 385 с.
- tion of “composition–property” models. Part I (Theory). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 25–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-25-37>
10. Kalashnikov V.I. Effektivnye vysokoprochnye i obychnye betony [Efficient high-strength and ordinary concretes]. Penza: Privolzhskii Dom znani. 2015. 148 p.
11. Nevill' A.M. Svoistva betona [Concrete properties]. Moscow: Stroyizdat. 1972. 344 p.
12. Akhverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Fundamentals of concrete physics] Moscow: Stroyizdat. 1981. 464 p.
13. De Larrard F. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. London and New York, 1998. 448 p.
14. Sheikin A.E., Chekhovskii Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoistva tsementnykh betonov [Structure and properties of cement concretes]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 344 p.
15. Zongjin L., Advanced concrete technology. Wiley. 2011. 528 p.
16. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology] Moscow: AVS. 2003. 499 p.
17. Belov V.V., Kuriatnikov Iu.Iu., Novichenkova T.B., Tehnologii i svoistva sovremennykh cementov i betonov [Technology and properties of modern cements and concretes]. Moscow: ASV. 2014. 280 p.
18. Belov V.V. Theoretical substantiation of optimal grain compositions of composite materials with mineral fillers. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 5, pp. 94–101.
19. Karpenko V.I. Concrete based on ash and slag mixtures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1975. No. 10, pp. 20–30. (In Russian)
20. Mikhailov K.V., Buzhevich G.A., The use of ashes and slags from thermal power plants in concrete and reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1972. No. 7. (In Russian).
21. Tarasova A.Yu. High mobility concrete mixtures with fly ash for transport construction. Abstract of diss ... Candidate of Sciences (Engineering). Moscow. 2009. 25 p. (In Russian).
22. Endzhievskaya I.G., Vasilovskaya N.G., Gofman O.V., Koz'min A.D., Grigor'eva V.A. Fine-grained shotcrete with complex modifiers. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018. No. 2, pp. 164–169. (In Russian).
23. GOST 310.4–81. Cements. Methods for determining the ultimate strength in bending and compression. (In Russian).
24. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Raschetnoe prognozirovaniye svoistv i proektirovaniye sostavov betona [Computational prediction of properties and design of concrete compositions]. Moscow: Infra-Inzheneriya. 2019. 385 s.

В.В. ДЬЯЧКОВ, канд. техн. наук (d_vv@mail.ru),
С.О. СЛЫШЕНКОВ, инженер (slyshenkov@mail.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа»

Приведены результаты испытаний арматурного проката класса A500C, изготавливаемого металлургическим заводом в Арабской Республике Египет (АРЕ) по ГОСТ Р 52544, и их анализ на соответствие требованиям ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» к арматурному прокату классов A500CHY и/или A500CEY, требуемых по проекту АЭС «Эль-Дабаа». Целью данной работы является определение возможности металлургического завода выпускать арматурный прокат, соответствующий требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа». Приведен сравнительный анализ технических требований нормативно-технических документов (НТД) на арматурный прокат. Для оценки стабильности выпускаемого арматурного проката за предыдущий период приведены переданные заводом-изготовителем данные о технологических процессах изготовления проката, результатах контроля механических свойств и химического состава. Представлен анализ основных результатов испытаний, отобранных на заводе-изготовителе, образцов арматурного проката. В частности, приведены фактические геометрические характеристики периодического профиля, площадь поперечного сечения и масса, фактический химический состав и механические свойства арматурного проката класса A500C и выполнен их анализ на соответствие требованиям классов A500CHY и/или A500CEY по ГОСТ 34028. Дана оценка результатам испытаний образцов сварных соединений арматурного проката класса A500C на растяжение, изгиб и срез на соответствие техническим требованиям ГОСТ 34028 к классам A500CHY и/или A500CEY. Приведен анализ результатов испытаний на выносливость арматурного проката класса A500C и требований ГОСТ 34028 к классам A500CHY и/или A500CEY. Уделено внимание некоторым отклонениям механических свойств, полученным по результатам испытаний арматурного проката, от требований ГОСТ 34028. Сформулированы выводы о соответствии арматурного проката класса A500C, изготавливаемого металлургическим заводом в АРЕ по ГОСТ Р 52544, требованиям классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028 по проекту АЭС «Эль-Дабаа».

Ключевые слова: арматурный прокат, оценка соответствия, долговременный контроль, механические свойства.

Для цитирования: Дьячков В.В., Слышенков С.О. Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа» // Бетон и железобетон. 2022. № 6 (614). С. 25–32.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-25-32>

V.V. DYACHKOV, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Centre № 3 (d_vv@mail.ru);
S.O. SLYSHENKOV, Engineer, Head of the Sector of the Centre № 3 (slyshenkov@mail.ru).

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) named after A.A. Gvozdev JSC «Research Center «Construction»
(6, buil. 5, 2-nd Institutskaia Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Assessment of Compliance of the Properties of Rebar Rolled Products with the Technical Requirements of the El-Daba NPP Project

The article contains the test results of reinforcement of grade A500C manufactured by a metallurgical plant in the Arab Republic of Egypt (ARE) according to GOST R 52544 and their analysis for compliance with the requirements of GOST 34028 for reinforcement of grades of A500CHY and/or A500CEY required by the El Daba NPP project. The purpose of this work is to determine the possibility of the metallurgical plant to produce reinforcement that meet the requirements of the El Daba NPP project. A comparative analysis of the technical requirements of regulatory and technical documents (NTD) for reinforcement is given. To assess the stability of the manufactured reinforcement for the previous period, the data transmitted by the manufacturer on the technological processes of manufacturing reinforcement, the results of control of mechanical properties and chemical composition are given. The analysis of the main test results selected at the manufacturer, samples of reinforcement is presented. In particular, the actual geometric characteristics of the periodic profile, cross-sectional area and mass, the actual chemical composition and mechanical properties of reinforcement of grade A500C are given and their analysis for compliance with the requirements of grades A500CHY and/or A500CEY according to GOST 34028 is carried out. The evaluation of the test results of samples of welded joints of reinforcement of grade A500C for tension, bending and shear for compliance with the technical requirements of GOST 34028 to grade A500CHY and/or A500CEY is given. The analysis of the results of endurance tests of reinforcement of grade A500C and the requirements of GOST 34028 for grade A500CHY and/or A500CEY is given. The article pays attention to some deviations of mechanical properties obtained from the test results of reinforcement from the requirements of GOST 34028. Conclusions are formulated about the compliance of reinforcement of grade A500C manufactured by the metallurgical plant in the

ARE according to GOST R 52544 with the requirements of grades A500CHY and A500CEY according to GOST 34028 for the El Dabaa NPP project. The article is informational and analytical in nature and will be useful to specialists in solving issues of assessing the compliance of reinforcement with the requirements of foreign NPP construction projects.

Keywords: rebar, conformity assessment, long-term control, mechanical properties

For citation: Dyachkov V.V. Slyshenkov S.O. Assessment of compliance of the properties of rebar rolled products with the technical requirements of the El-Dabaa NPP project. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 25–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-25-32>

Для строительных конструкций АЭС «Эль-Дабая» проектом предусмотрено применение арматурного проката классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия». Однако не все металлургические заводы на территории ARE освоили производство арматурного проката классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016 из-за более высоких требований по сравнению с A500C по ГОСТ Р 52544–2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов A500C и B500C для армирования железобетонных конструкций. Технические условия». При этом производство арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 (ГОСТ Р 52544–2006 отменен с 01.01.2018 г. в части горячекатаного и термомеханически упрочненного арматурного проката в связи с введением в действие на территории Российской Федерации ГОСТ 34028–2016) успешно освоено с 2008 г. [3], поэтому различными металлургическими предприятиями проводятся испытания образцов арматурного проката на соответствие техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабая».

Для оценки возможностей одного из металлургических заводов, расположенного в ARE, выпускать арматурный прокат в соответствии с требованиями проекта АЭС «Эль-Дабая» в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева был выполнен комплекс мероприятий по оценке соответствия свойств арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 требованиям классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016, включавший в себя кроме испытаний анализ технологии производства арматуры и качества выпускаемой продукции при долговременном контроле на заводе [1, 2].

На начальном этапе изучения свойств арматурного проката выполнен анализ технологического регламента производства арматуры на металлургическом заводе, который состоит из прямого восстановления железа (получения окатышей), изготовления непрерывно-литой заготовки, производства проката, упрочненного в потоке стана, и контроля качества различных операций и производств. Используемая на заводе технология прямого восстановления железа позволяет получать чистый металл с минимальным содержанием примесей, так как получение железа в виде губки происходит непосредственно из руды, минуя до-

менную печь [4]. Таким образом, этот процесс протекает без применения кокса, так как именно кокс вносит в больших количествах вредные примеси (фосфор и особенно серу). Прямое восстановление железа считается одним из самых перспективных направлений для эффективного развития мировой металлургии. Установлено, что использование губчатого железа при выплавке стали, в основном в электродуговых печах, позволяет производить наиболее высококачественный, экономически выгодный (с относительно низкой энергоемкостью) и экологически чистый металл (по сравнению с доменным процессом).

При выплавке стали в дуговых электропечах на металлургическом заводе используются металлизированные окатыши, т. е. не полностью восстановленные железорудные окатыши, получаемые методами прямого восстановления. Отличительной особенностью этого сырья является малое содержание серы, фосфора, меди, никеля, хрома и других примесей, обычно содержащихся в стальном ломе [5]. После окончания плавления окатышей из печи сливается большая часть окислительного шлака и далее металл без шлака разливают в ковш, куда вводят раскислители и легирующие. Затем ковш передают на установки внепечной обработки. На металлургическом заводе применяется технология непрерывного литья, сущность которой заключается в получении длинномерных отливок послойного поперечного сечения непрерывной заливкой литейных форм-кристаллизаторов на установках непрерывного действия [6]. На металлургическом заводе применяется технология термомеханического упрочнения арматурного проката в потоке стана, это технологическая операция, направленная на повышение предела текучести и временного сопротивления арматурного проката (или одного из этих параметров) за счет ускоренного охлаждения проката после выхода из последней клетки прокатного стана на линии проходного типа. Технология термомеханического упрочнения арматурного проката в потоке стана с прокатного нагрева является эффективным способом повышения прочностных характеристик арматурного проката, обеспечивающим снижение расхода дорогостоящих легирующих и экономию энергии [7].

Анализ данных по используемым технологическим процессам на металлургическом заводе, расположенном в ARE, показал, что при производстве

Таблица 1
Table 1

Требования нормативной документации (НТД) к механическим свойствам арматуры
NTD requirements for the mechanical properties of reinforcement

Наименование показателя (характеристики)	Требования НТД		
	ГОСТ Р 52544–2006	ГОСТ 34028–2016	
	A500C	A500CHY	A500CEV
Предел текучести σ_T ($\sigma_{0,2}$), МПа, не менее	500	500	500
Временное сопротивление σ_B , МПа, не менее	600	600	600
Отношение фактических значений σ_B/σ_T ($\sigma_B/\sigma_{0,2}$), не менее	1,08	1,08	1,15–1,35
Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	14	16	16
Относительное удлинение δ_{max} (A_{gt}), %, не менее	–	5	7

арматурного проката используются современные технологии: прямое восстановление железа (получение окатышей), выплавка стали в дуговых электропечах с разливкой и доводкой в ковше, изготовление непрерывно литой заготовки и прокатка термомеханически упрочненного в потоке стана арматурного проката; все это в целом обеспечивает техническую возможность данного завода изготавливать арматурный прокат с механическими и эксплуатационными свойствами, отвечающими требованиям классов A500CHY и/или A500CEV по ГОСТ 34028–2016.

После анализа технологических процессов производства арматурного проката выполнен сравнительный анализ требований к арматурному прокату класса A500C по ГОСТ Р 5254–2006 и классов A500CHY и/или A500CEV по ГОСТ 34028–2016. В частности, сравнивались требования нормативных документов к геометрическим параметрам, погонной массе, качеству поверхности, химическому составу, механическим и эксплуатационным свойствам арматурного проката.

Согласно результатам сравнительного анализа, требования ГОСТ Р 52544–2006 к геометрическим параметрам, погонному весу, качеству поверхности, химическому составу, механическим и эксплуатационным свойствам, правилам контроля, упаковки и маркировки арматурного проката класса A500C практически полностью соответствуют требованиям ГОСТ 34028–2016 для арматуры класса A500CHY, поэтому арматурный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 является возможным вариантом замены арматурного проката класса A500CHY по

ГОСТ 34028–2016 при возведении конструкций АЭС «Эль-Дабба». Значительными отличиями в требованиях арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 и A500CEV по ГОСТ 34028–2016, указанных в табл. 1, являются различия в нормируемых значениях показателей пластичности δ_5 и $\delta_{max}(A_{gt})$ и отношении временного сопротивления к пределу текучести $\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$.

Таким образом, арматурный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 может являться вариантом возможной замены арматурного проката класса A500CEV по ГОСТ 34028–2016 при возведении конструкций по проекту АЭС «Эль-Дабба» только после подтверждения соответствия фактических механических свойств при растяжении требованиям класса A500CEV по ГОСТ 34028–2016.

Для анализа качества выпускаемой продукции при долговременном контроле были проанализированы переданные заводом сведения об арматурном прокате за 2021–2022 гг., включавшие в себя химический состав и механические свойства.

Результаты оценки уровня качества при долговременном контроле механических свойств, по данным завода-изготовителя, приведены в табл. 2.

Анализ свойств при долговременном контроле на заводе показал, что вероятные значения, с обеспеченностью $P=0,95$, предела текучести и временного сопротивления не соответствуют требованиям арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 и классов A500CHY и A500CEV по ГОСТ 34028–2016. Причиной такого несоответствия является значительная изменчивость показателей [8]. Вызвано это

Таблица 2
Table 2

Вероятные значения механических свойств арматурного проката класса A500C
Probable values of mechanical properties of reinforcement of grade A500C

Механические характеристики арматурного проката	$\sigma_T(\sigma_{0,2})$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$	δ_5 , %	$\delta_{max}(A_{gt})$, %
Среднее значение в партии X_{cp}	555,4	653	1,177	20,4	8,9
Среднеквадратическое отклонение в партии S_0	30,65	31,42	0,04	2,21	1,01
Оценка параметров при обеспеченности 95% (для Δ_5 и A_{gt} – 90%) и вероятности 90%, $X_{cp}-K \times S_0 \geq C_{min}$	493,8	589,9	1,097	16,8	7,24

Таблица 3
Table 3Результаты оценки химического состава арматурного проката класса A500C
Results of evaluation of the chemical composition of reinforcement of grade A500C

Номинальный диаметр, мм	Химический состав (ковшовая проба или расплав)										C _{экв} x 100, %
	C x 100, %	Si x 100, %	Mn x 100, %	P x 1000, %	S x 1000, %	Cr x 100, %	Ni x 100, %	Cu x 100, %	V x 1000, %	N, ppm	
12	18	15	64	15	18	3	3	10	1	69	30
16	18	15	64	15	18	3	3	10	1	69	30
20	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
25	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
32	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
40	19	17	146	13	17	3	3	11	128	105	48
Нормативные требования ГОСТ 34028–2016 к A500C											
	≤22	≤90	≤160	≤50	≤50	–	–	≤35	≤100	≤120	30–501
Примечание. Ø12–18 мм – C _{экв} = 0,3–0,5%; Ø20–28 мм – C _{экв} = 0,35–0,5%; Ø32–40 мм – C _{экв} = 0,4–0,5%.											

тем, что производством арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 металлургический завод занимался локально и не более двух лет, что не соответствует серийному производству и следует классифицировать, как опытно-промышленные партии арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006.

Следует отметить, что на данном металлургическом заводе налажено серийное производство свариваемого арматурного проката с серповидным периодическим профилем класса B500B по BS 4449 и класса A500C по ST 009 с нормируемым пределом текучести не менее 500 МПа, для которого выполняется соответствующая оценка показателей механических свойств при долговременном контроле уровня качества проката.

Результаты оценки химического состава стали арматурного проката класса A500C приведены в табл. 3.

Химический состав арматурного проката класса A500C диаметром 12–32 мм, определенный изготовителем в ковшовой пробе, и значения углеродного эквивалента C_{экв} соответствуют требованиям классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Однако у арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм выявлено отличие от требований ГОСТ 34028–2016 в части содержания ванадия (V) 0,128 %, которое превышает максимально допустимое значение для классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 не более 0,1%.

Для серийно выпускаемой арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 производства металлургического завода, расположенного в АРЕ, взамен проката классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 следует скорректировать содержа-

ние микролегирующих элементов и контролировать содержание химических элементов и значение углеродного эквивалента каждой плавки в соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016. На начальном этапе серийного производства (не менее 6 месяцев) необходимо дополнительно контролировать механические свойства арматурного проката на удвоенном количестве образцов с приемкой по гарантированным минимальным браковочным значениям и оценкой уровня качества за текущий период в соответствии с ГОСТ 34028–2016.

После анализа НТД, технологических процессов изготовления арматурного проката и оценки качества продукции при долговременном контроле для подтверждения соответствия фактических механических свойств на заводе были отобраны образцы арматурного проката диаметром 12, 25 и 40 мм. Диаметр арматурного проката для испытаний принят таким образом, чтобы охватить весь сортимент, выпускаемой заводом продукции. Испытания отобранных образцов арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 на соответствие требованиям классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 включали в себя [9]:

- оценку геометрических параметров и массы;
- оценку механических свойств при растяжении и изгибе;
- оценку химического состава;
- оценку свариваемости;
- оценку усталостной прочности арматурного проката.

Результаты измерения геометрических параметров, погонной массы и площади поперечного сечения арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 показали, что фактические ос-

новые геометрические размеры профиля отвечают требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Значения относительной площади смятия поперечных ребер f_R находятся в диапазоне 0,057–0,075, что соответствует нормативным требованиям арматурного проката классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Фактическая площадь поперечного сечения A_n и вес 1 м длины всех испытанных образцов арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 соответствуют требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

На поверхности арматурного проката класса A500C диаметром 12 и 25 мм не обнаружено трещин, закатов, плен и раковин, ухудшающих его характеристики, что соответствует ГОСТ 34028–2016. Однако на арматурном прокате диаметром 40 мм в поперечных ребрах выявлены локальные закалочные трещины (рис. 1), что противоречит п. 5.5.1 ГОСТ 34028–2016 и требует изменения режимов прокатки и химического состава для данного диаметра.

Для определения механических свойств отобранного арматурного проката (в состоянии поставки) проводились испытания на растяжение и изгиб. Перед испытанием на растяжение образцы длиной 500–600 мм размечали с шагом 10 мм, определялась масса образцов с точностью до 2 г, измерялась их длина с точностью до 1 мм и вычислялась площадь поперечного сечения. Предварительную разметку использовали для определения относительных удлинений δ_5 и δ_p после испытания образцов. Испытания на растяжение проводили по методике ГОСТ 12004–81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение» в лабораторных условиях поэтапным нагружением вплоть до разрыва образца на



Рис. 1. Общий вид трещин в поперечных ребрах арматурного проката диаметром 40 мм

Fig. 1. General view of cracks in the transverse ribs of reinforcement with a diameter of 40 mm

испытательной гидравлической машине Instron серии HDX мод. 1000HDX.

Результаты испытаний на растяжение, указанные в табл. 4, показали однородность значений предела текучести и временного сопротивления арматурного проката класса A500C и соответствие статистических показателей требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Однако в части отношения $\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$ и полного относительного удлинения $\delta_{max}(A_{gt})$ арматурный прокат диаметром 12 мм не соответствует требованиям A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

Испытания на изгиб показали, что все образцы выдержали угол изгиба 180° вокруг оправки диаметром

Таблица 4
Table 4

Механические свойства арматуры класса A500C
Mechanical properties of reinforcement of grade A500C

Статистические показатели	Диаметр, мм	Механические свойства				
		$\sigma_T(\sigma_{0,2})$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$	Δ_5 , %	$\delta_{max}(A_{gt})$, %
Среднее значение в партии X_{cp}	12	552,9	634,1	1,15	21,6	7,3
	25	533,1	647	1,21	21,2	9,9
	40	559,3	736,5	1,32	20,3	11,6
Среднеквадратическое отклонение в партии S	12	6,49	2,69	0,01	0,82	0,44
	25	1,97	0,27	0,005	1,75	0,61
	40	3,08	12,49	0,02	1,04	1
Оценка механических свойств при обеспеченности 95% (для δ_5 и A_{gt} – 90%) и вероятности 90%, $X_{cp}-ks \geq C_{min}$	12	532,9	625,8	1,12	19,6	6,2
	25	527	646,2	1,2	16,8	8,4
	40	549,7	697,9	1,27	17,7	9,1
Требования ГОСТ 34028–2016 к классу A500CHU		≥ 500	≥ 600	$\geq 1,08$	≥ 16	≥ 5
Требования ГОСТ 34028–2016 к классу A500CEU		≥ 500	≥ 600	1,15–1,35	≥ 16	≥ 7
Требования ГОСТ Р 52544–2006 к классу A500C		≥ 500	≥ 600	$\geq 1,08$	≥ 14	–



Рис. 2. Образцы после испытаний: а — при растяжении; б — при изгибе
Fig. 2. Samples after testing: a — tensile testing; b — bending

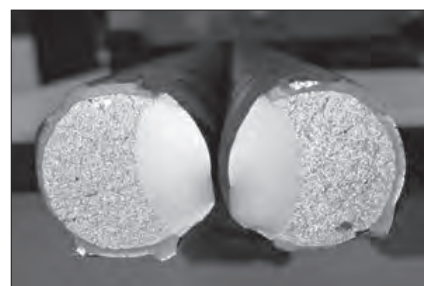


Рис. 3. Характер разрушения арматурного проката диаметром 40 мм при действии многократно повторяющейся нагрузки
Fig. 3. The nature of the destruction of reinforcement with a diameter of 40 mm under the action of a repeatedly repeated load

$D=3d_n$, трещин на образцах после проведения испытаний не обнаружено, это удовлетворяет требованиям классов А500СНУ и А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016.

Образцы после испытаний показаны на рис. 2.

Результаты испытаний показали, что арматурный прокат диаметром 12–40 мм класса А500С по ГОСТ Р 52544–2006 по механическим свойствам соответствует требованиям класса А500СНУ по ГОСТ 34028–2016, при этом диаметр 25–40 мм соответствует требованиям класса А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016.

Для определения химического состава стали предоставленных образцов арматурного проката использовали оптико-эмиссионный метод по ГОСТ Р 54153–2010. Химический состав определяли с помощью спектрометра АРГОН-5СФ.

Результаты определения химического состава арматурного проката класса А500С приведены в табл. 5.

Оценка содержания химических элементов в готовом прокате и значений углеродного эквивалента позволяет сделать вывод о соответствии химического состава исследованных образцов арматурного проката класса А500С диаметром 12–40 мм производства завода-изготовителя требованиям классов А500СНУ и А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016. Повышенное содержание, не более 0,1%, ванадия в стали арматурного проката класса А500С диаметром 40 мм необходимо скорректировать при серийном производстве.

В соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016 свариваемость арматуры обеспечивается химическим составом, технологией изготовления и контролируется путем испытания ее сварных соединений.

Анализ технологии производства и химический состав стали показали возможность изготовления заводом свариваемого арматурного проката, который необходимо подтвердить испытаниями на растяжение и изгиб образцов сварных соединений, выполненных различными способами сварки, наиболее часто применяемыми в строительстве и в наибольшей степени влияющим на изменение свойств исходной стали.

Исследования свариваемости арматурного проката класса А500С проводились по методике, приведенной в ГОСТ 34028–2016, Приложение Г. Типы сварных соединений и способы сварки образцов, изготовленных для проведения контрольных испытаний, назначались в соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016, Приложение Г, и ГОСТ 14098 «Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры». Технологические условия сварки образцов назначались в соответствии с требованиями РТМ 393–94 «Руководящие технологические материалы по сварке и контролю качества соединений арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций».

Способы контроля и методики испытания готовых сварных соединений арматуры принимались в

Таблица 5
Table 5

Химический состав стали в готовом арматурном прокате класса А500С
Chemical composition of steel in original state reinforcement of grade А500С

Класс, диаметр, плавка	Массовая доля химических элементов в стали (готовый прокат), %											C _{экв}
	C	Si	Mn	V	Nb	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	
12 мм	0,198	0,145	0,598	<0,005	<0,005	0,007	0,03	0,037	0,102	0,014	0,0156	0,315
25 мм	0,196	0,142	1,349	0,061	0,007	0,007	0,03	0,03	0,09	0,0087	0,0119	0,448
40 мм	0,191	0,166	1,448	0,11	0,011	0,008	0,03	0,031	0,096	0,0116	0,0151	0,47
А500С по ГОСТ Р 52544	≤0,24	≤0,95	≤1,7	—	—	—	—	—	≤0,35	≤0,055	≤0,055	≤0,52
А500С по ГОСТ 34028	≤0,24	≤0,95	≤1,7	≤0,1	≤0,1	≤0,1	—	—	≤0,35	≤0,055	≤0,055	≤0,52

Таблица 6
Table 6Результаты испытаний на выносливость арматурного проката класса A500C
Results of fatigue tests of reinforcement of grade A500C

Характеристика образца	Усилия цикла, кН			Пройденное число циклов	Характеристика разрушения образца
	P_{max}	P_{min}	ΔP		
Диаметр 12 мм	33,93	16,97	16,97	2 032 700	На рабочей базе образца разрушения не выявлены
				2 015 100	
				2 016 800	
Диаметр 25 мм	147,27	73,64	73,64	2 020 000	На рабочей базе образца разрушения не выявлены
				2 017 000	
				2 018 500	
А500С, диаметр 40 мм (151699)	376,98	188,49	188,49	1 211 900	Усталостное разрушение образца на рабочей базе (рис. 3)
				1 845 300	
				—	
Требования ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016				≥ 2 000 000	Не допускаются разрушения на рабочей базе образца*
Примечание. *Обрыв в захвате и на расстоянии до $2d_n$ от захвата не является браковочной характеристикой.					

соответствии с ГОСТ Р 57997–2006 «Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия».

Результаты испытаний сварных образцов показали, что термомеханически упрочненный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 диаметром 12 и 25 мм соответствует требованиям свариваемости арматуры класса A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028, при этом эксплуатационные свойства сварных соединений проката диаметром 40 мм не полностью соответствуют требованиям ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016, так как выявлены разрушения крестообразных сварных соединений при изгибе, что недопустимо. Для обеспечения стабильной свариваемости арматурного проката диаметром выше 25 мм при серийном производстве необходимо подкорректировать концентрацию легирующих элементов в стали и отработать режимы термомеханического упрочнения проката в потоке стана, а затем подтвердить требуемые эксплуатационные свойства.

Испытаниям на выносливость при многократно повторяющихся циклических нагрузках подвергались отобранные случайным образом от разных стержней образцы проката минимального и максимального диаметров из производимого заводом сортамента.

Методика испытания образцов арматурного проката класса A500C на выносливость при многократно повторяющихся циклических нагрузках принята в соответствии с требованиями Приложения Е ГОСТ 34028–2016. Испытания на выносливость выполнялись на сервогидравлической машине «SCHENCK POZ 0691».

Результаты испытаний образцов на выносливость приведены в табл. 6.

Результаты испытаний на выносливость при действии многократно повторяющихся циклических нагрузок показали, что арматурный прокат класса A500C по ГОСТ 52544–2006 диаметром 12 и 25 мм соответствует требованиям класса A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016. Образцы арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм во всех случаях при воздействии многократно повторяющейся нагрузки разрушались в рабочей зоне образца после $1,211 \times 10^6$ – $1,845 \times 10^6$ циклов, что не соответствует ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016. Зарождение усталостной трещины происходило у основания поперечных ребер в местах сопряжения с телом стержня, зона хрупкого излома составляет около 30% от площади поперечного сечения (рис. 3), при этом на остальной части сечения отсутствуют признаки пластического разрыва.

Для обеспечения соответствия арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм требованиям выносливости по ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016 при серийном производстве необходимо снизить влияния концентраторов напряжения, а именно внести изменения в используемые калибры и добиться более плавного перехода поперечного ребра в тело стержня, а также отсутствия трещин на поверхности проката [10] и понизить концентрацию содержания ванадия в стали, в некоторой степени способствующего повышению твердости поверхностного слоя металла и, как следствие, его чувствительности к концентраторам и дефектам.

Выводы

Представленный для исследований арматурный прокат класса A500C диаметром 12 и 25 мм по ГОСТ Р 52544–2006 производства металлургического завода, расположенного в АРЕ, соответству-

ет требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

Арматурный прокат класса A500C по ГОСТ 52544–2006 диаметром 40 мм по ряду показателей не соответствует требованиям ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016, необходимо отработать технологию изготовления данного проката, обеспечить стабильность качества поверхности, механических и эксплуатационных свойств в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016. Данный прокат может быть использован наряду и взамен проката классов A500CHU и A500CEU при возведе-

нии железобетонных конструкций по проекту АЭС «Эль-Дабаа» только при прохождении процедуры оценки соответствия требованиям ГОСТ 34028–2016 с учетом выше изложенных рекомендаций.

В статье приведен порядок выполненных мероприятий, достаточных для достоверной оценки соответствия арматурного проката требованиям классов A500CHU и A500CEU по проекту АЭС «Эль-Дабаа». Данный порядок может применяться для оценки соответствия продукции требованиям зарубежных проектов строительства АЭС любых металлургических предприятий.

Список литературы

1. Полякова М.А., Харитонов В.А., Петров И.М. Оценка процесса производства арматурного проката на основе статистических показателей // *Теория и технология металлургического производства*. 2018. № 2. С. 22–26.
2. Кривцова О.Н., Кузьмина Н.Ю., Цыганова В.М. Оценка стабильности качества арматурного проката посредством статистических методов контроля // *Труды университета*. 2017. № 2. С. 105–108.
3. Мадатян С.А., Падин О.И., Гиниятулина Г.Н. Результаты сертификационных испытаний импортного арматурного проката класса A500C // *Бетон и железобетон*. 2008. № 1. С. 7–11.
4. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы производства металла. М.: Металлургия, 1994. 320 с.
5. Меденков С.А. Перспективное использование металлизированных окатышей в электрометаллургии. *НАУКА ЮУРГУ: Материалы 66-й научной конференции*. Челябинск, 2014. С. 1404–1410.
6. Стеблов А.Б., Березов С.Н. Технология МНЛЗ малых сечений // *Литье и металлургия*. 2013. № 4. С. 85–88.
7. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
8. Харитонов В.А., Ильина Н.Н., Петров И.М. Анализ уровня качества арматурной стали A400C и A500C на основе методов математической статистики // *Качество в обработке материалов*. 2016. № 1. С. 18–22.
9. Цыба О.О., Дьячков В.В., Саврасов И.П., Панченко А.И. О новом межгосударственном стандарте ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций» // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 3. С. 23–31.
10. Городницкий Ф.М., Михайлов К.В. Выносимость арматуры железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1972. 151 с.

References

1. Polyakova M.A., Kharitonov V.A., Petrov I.M. Evaluation of the reinforcement process based on statistical indicators. *Theoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2018. No. 2, pp. 22–26. (In Russian).
2. Krivtsova O.N., Kuzminova N.Yu., Tsygankova V.M. Assessment of the stability of the quality of reinforcement by statistical control methods. *Trudy universiteta*. 2017. No. 2, pp. 105–108. (In Russian).
3. Madatyan S.A., Padin O.I., Giniyatullina G.N. Results of certification test of imported reinforcement of grade A500C. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2008. No. 1, pp. 7–11. (In Russian).
4. Yusfin Y.S., Himmelfarb A.A., Pashkov N.F. Novye protsesy proizvodstva metalla [New processes of metal production]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 320 p.
5. Medenkov S.A. Promising use of metallized pellets in electrometallurgy. *SUSU SCIENCE. Materials of the 66th Scientific Conference*. Chelyabinsk. 2014. C.1404–1410.
6. Steblov A.B., Berezov S.N. Technology of small cross-section MNLZ. *Lit'e i metallurgiya*. 2013. No. 4, pp. 85–88. (In Russian).
7. Madatyan S.A. Reinforcement of reinforced concrete structures [Armatura zhelezobetonnykh konstruktсий]. Moscow: Voentehlit, 2000. 256 p.
8. Kharitonov V.A., Ilyina N.N., Petrov I.M. Analysis of the quality level of reinforcing steel A400C and A500C based on methods of mathematical statistics. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2016. No. 1, pp. 18–22. (In Russian).
9. Tsyba O.O., Dyachkov V.V., Savrasov I.P., Panchenko A.I. On the new interstate standard GOST 34028–2016 «Reinforcement for reinforced concrete structures». *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2017. No. 3, pp. 23–31. (In Russian).
10. Gorodnitsky F.M., Mikhailov K.V. Vynoslivost' armatury zhelezobetonnykh konstruktсий [Fatigue of reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 151 p.

М.Ю. ТИТОВ, канд. техн. наук, Л.А. ТИТОВА, канд. техн. наук,
М.И. БЕЙЛИНА, инженер-технолог

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство», лаборатория № 7 самонапряженных конструкций и напрягающих бетонов
(109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов

Возможность получить строительные материалы с высокими физико-механическими характеристиками привлекала ученых и практиков в поиске применения дешевых отходов промышленности, что позволило бы снизить материало- и энергоемкость, получив материалы с заданными свойствами. Доменные и металлургические шлаки для решения этих задач представляют особый интерес, так как они характеризуются прогнозируемым химическим составом и экологически безопасны. Современный уровень развития технологии бетона предполагает широкое использование различных добавок в бетон. Применение добавок справедливо считается одним из самых универсальных, доступных и гибких способов управления технологическими параметрами строительных материалов. В результате использования расширяющих добавок можно добиться улучшения структурных характеристик бетонов, снижения усадочных деформаций, ускорения темпов нарастания прочности, повышения долговечности. В конечном итоге возможно качественно улучшить строительно-технические свойства конструкции.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки, расширяющая добавка, напрягающий бетон, бетон с компенсированной усадкой, прочность, самонапряжение, водонепроницаемость.

Для цитирования: Титов М.Ю., Титова Л.А., Бейлина М.И. Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов // *Бетон и железобетон*. 2022. № 6 (614). С. 33–37.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-33-37>

M.Yu. TITOV, Candidate of Sciences (Engineering), L.A. TITOVA, Candidate of Sciences (Engineering), M.I. BEYLINA, Engineer-Techologist
Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev
(6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Application of Industrial Waste for the Production of Expansion Components

The opportunity to obtain building materials with high physical and mechanical characteristics attracted scientists and practitioners in the search for the use of cheap industrial waste, which would reduce material and energy consumption, having obtained materials with the specified properties. Blast-furnace and metallurgical slags are of particular interest for solving these problems, since they are characterized by a predictable chemical composition and are environmentally friendly. The current level of development of concrete technology involves the widespread use of various additives in concrete. The use of additives is rightly considered as one of the most versatile, affordable and flexible ways to control the technological parameters of building materials. As a result of the use of expansion additives, it is possible to improve the structural characteristics of concrete, reduce shrinkage deformations, accelerate the rate of strength increase, and increase durability. Ultimately, it is possible to qualitatively improve the construction and technical properties of the structure.

Keywords: blast-furnace granular slags, expansion additive, self-stressing concrete, concrete with compensated shrinkage, strength, self-stress, watertightness.

For citation: Titov M.Yu., Titova L.A., Beylina M.I. Application of industrial waste for the production of expansion components. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 33–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-33-37>

Интенсивное развитие строительства и создание конструкций, обладающих высокой прочностью и долговечностью, поставило задачу расширения применения не только портландцемента общестроительного назначения, но и специальных цементов и бетонов на их основе.

При возведении и эксплуатации зданий и сооружений серьезной проблемой является предотвраще-

ние отрицательных последствий усадочных деформаций.

Поиски, направленные на снижение усадки в середине XX в., привели к созданию напрягающих цементов. В процессе твердения бетона с использованием этих цементов вместо традиционной усадки происходит расширение бетона, уплотняется структура и увеличивается прочность, водонепроницаемость

и долговечность конструкций. Для обеспечения этих характеристик бетонов используются минеральные добавки, среди которых особое место занимают расширяющие добавки, при использовании которых улучшаются показатели проницаемости, растяжения при изгибе и снижаются величины усадки.

Напрягающий бетон может приготавливаться как при применении напрягающего цемента, так и композитного вяжущего: портландцемента и расширяющего компонента, вводимого как составляющее при приготовлении бетона.

Расширяющие добавки, вводимые при приготовлении бетона в бетоносмеситель, упрощают технологию и позволяют получить материал с регулируемыми свойствами [1, 2].

В России разработана большая гамма расширяющих добавок, среди которых особое место занимают алюминатно-сульфатные, механизм твердения которых наиболее изучен при разработке спеццементов.

В основных работах по анализу природы расширения [3–5] утверждается, что расширение цементного камня является следствием роста кристаллов этtringита – ГСАК ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) в

определенный период развития кристаллизационной структуры твердеющего цементного камня. При продолжительном росте кристаллов ГСАК процесс сбалансированного твердения портландцемента проходит параллельно процессу расширения алюминатной составляющей при взаимодействии с гипсом.

По мнению ряда ученых [1–3], ГСАК образует тонкие оболочки вокруг гидратирующихся цементных зерен, способных создавать разности концентраций растворов в капиллярном пространстве. При этом определенную роль играет химический состав портландцемента. Этtringит, образующийся при высокой концентрации извести, предопределяет расширение структуры. Образование ГСАК происходит в структуре, склонной к пластическим деформациям, при этом происходит уплотнение порового пространства кристаллами ГСАК, что способствует образованию непроницаемого плотного материала.

В шлаках металлургических заводов содержание оксида Al_2O_3 колеблется от 7 до 30%. Такие шлаки могут быть использованы для выпуска расширяющих добавок, как простых по составу, так и многокомпонентных. Использование шлаков различного

Таблица 1
Table 1

Химический состав исходных материалов
Chemical composition of initial materials

Наименование материала	Содержание оксидов, %							
	Al_2O_3	SO_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	R_2O
Молотый доменный гранулированный шлак	24,8	3,7	34,7	0,86	6,8	38,6	2,74	1,3
Гипсовый камень	0,78	48,7	4,3	0,76	2,84	28,9	–	–

Таблица 2
Table 2

Прочность мелкозернистых бетонов на основе добавки доменного шлака Нижнетагильского металлургического завода
Strength of fine-grained concrete based on the addition of blast-furnace slag from the Nizhny Tagil Metallurgical Plant

№ п/п	Состав, %		Содержание, %		Прочность при сжатии, МПа в возрасте, сут			
	Шлак	Гипс	Al_2O_3	SO_3	3	7	14	28
1	50	50	12,4	24,35	24,7	32	33,7	36
2	60	40	14,9	19,48	27,1	34,6	36,7	39,7
3	65	35	16,12	17	29,4	32	41,4	47,6
4	70	30	17,36	14,6	31	36,7	44,8	50,4

Таблица 3
Table 3

Самонапряжение и расширение мелкозернистого бетона с расширяющей добавкой
Self-stressing and expansion of fine-grained concrete with an expansion admixture

№ п/п	Состав, %		Содержание, %		Самонапряжение, сут, МПа				Расширение, сут, МПа			
	Шлак	Гипс	Al_2O_3	SO_3	3	7	14	28	3	7	14	28
1	50	50	12,4	24,35	0,85	0,96	1	1,13	0,5	0,76	0,9	1,04
2	60	40	14,9	19,48	0,63	0,98	1,07	1,09	0,45	0,54	0,69	0,7
3	65	35	16,12	17	0,61	1,12	1,42	1,84	0,36	0,5	0,6	0,65
4	70	30	17,36	14,6	0,6	1,15	1,62	1,74	0,29	0,36	0,46	0,47

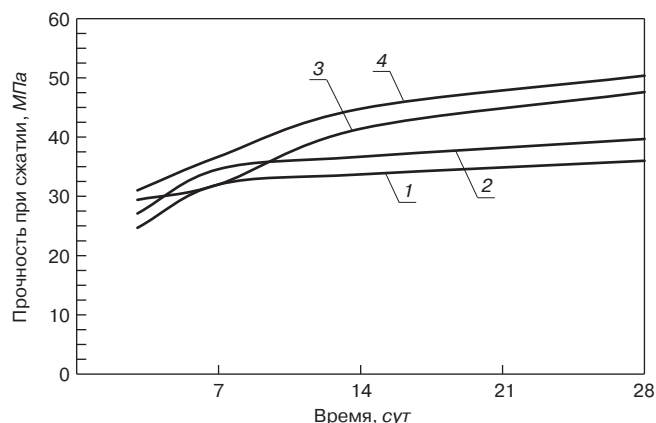


Рис. 1. Прочность при сжатии составов 1–4
Fig. 1. Compressive strength of compositions 1–4

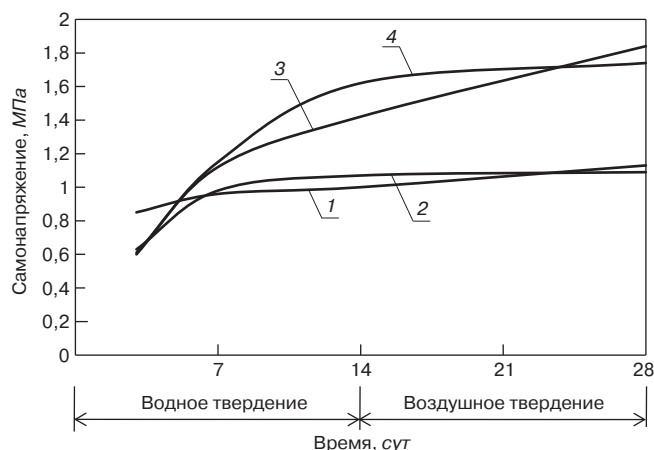


Рис. 2. Самонапряжение мелкозернистого бетона составов 1, 2, 3 и 4
Fig. 2. Self-stressing of fine-grained concrete of compositions 1, 2, 3 and 4

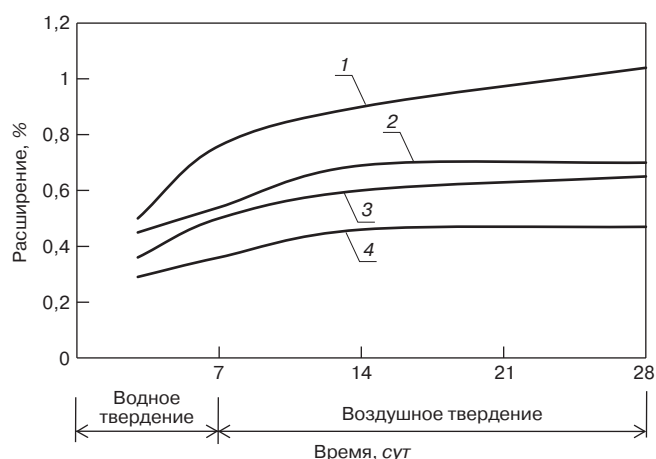


Рис. 3. Расширение мелкозернистого бетона составов 1, 2, 3 и 4
Fig. 3. Expansion of fine-grained concrete of compositions 1, 2, 3 and 4

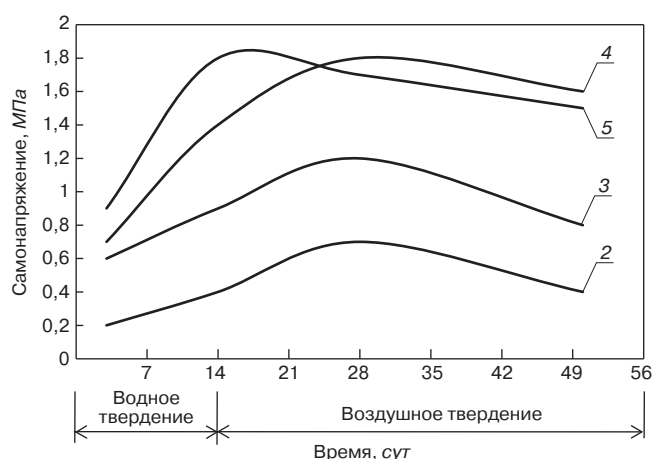


Рис. 4. Самонапряжение бетона составов 2, 3, 4 и 5
Fig. 4. Self-stressing of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

химического состава (по содержанию оксида Al_2O_3) позволит в различных регионах РФ получить расширяющие добавки широкого диапазона.

Для проведения исследований и получения напрягающих бетонов в качестве алюмосодержащего компонента РД был выбран доменный шлак Нижнетагильского завода с повышенным содержанием Al_2O_3 – 24,6%.

В качестве сульфатного составляющего был выбран двухводный гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ с содержанием SO_3 – 48,7%).

Химический состав применяемых материалов представлен в табл. 1.

На данных материалах проводилась работа по определению количественного соотношения содержания шлака и гипса для получения расширяющих добавок по ТУ 5743-023-468540–90 для бетонов как напрягающих, так и с компенсированной усадкой.

В молотом гранулированном шлаке Нижнетагильского завода содержится оксида Al_2O_3 более 20%, поэтому расширяющая добавка была получена простым смешиванием или при помоле шлаков с гипсом. По-

лученная расширяющая добавка имела тонкость помола не менее $3500 \text{ см}^2/\text{г}$, т. е. в пределах значений величины удельной поверхности портландцемента.

Согласно ТУ на расширяющую добавку, контроль физико-механических показателей проводился на мелкозернистом бетоне.

Результаты оценки физико-механических свойств представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 1–3.

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что для шлаков этого завода использование равного количества шлака и гипса (50:50) снижает прочность при сжатии и увеличивает деформации расширения (образцы слабые, пористые).

Наиболее оптимальным соотношением содержания шлака и гипса возможно считать соотношение 65:35 (шлак:гипс) при обеспечении значений прочности 47,6 МПа.

Величину самонапряжения определяли в возрасте 28 сут.

Развитие самонапряжения и расширения бетона при варьировании соотношения шлака и гипса 65:35 представлено в табл. 3 и на рис. 2 и 3.

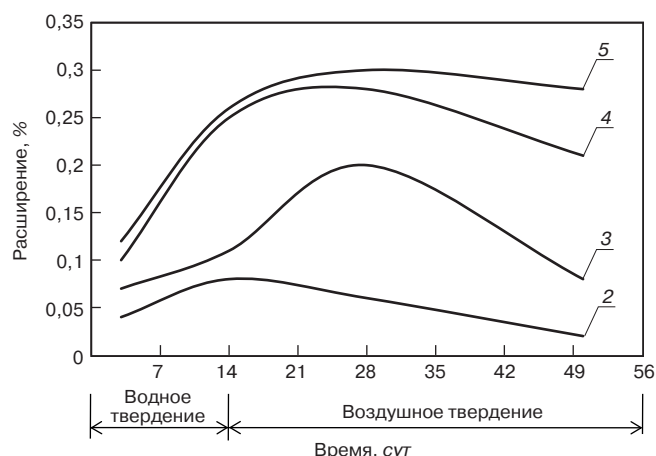


Рис. 5. Расширение бетона составов 2, 3, 4 и 5

Fig. 5. Expansion of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

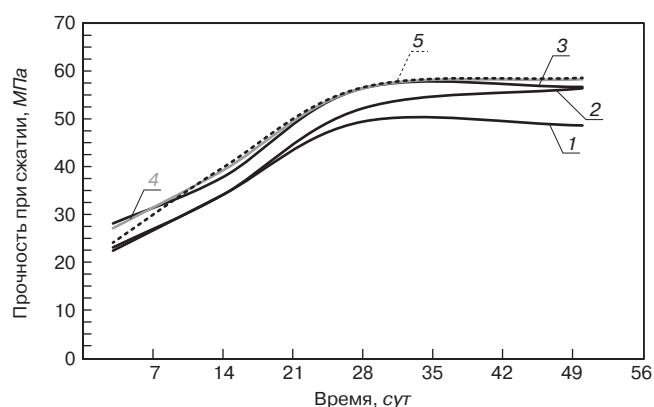


Рис. 6. Прочность при сжатии бетона составов 2, 3, 4 и 5

Fig. 6. Compressive strength of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

При развитии самонапряжения 1,74 МПа и стабилизации расширения на 14-е сут в данной пробе расширяющей добавки количество Al_2O_3 составляет 16,1%, оксидов серы SO_3 – 17%, что позволяет получить расширяющую добавку с величиной самонапряжения до 2 МПа.

Как видно из таблиц, кинетика развития самонапряжения этого состава находится в соответствии с развитием расширения и прочности.

Для оценки возможности получения различных видов бетонов и регулирования их свойств рассма-

тривалось влияние добавки на физико-механические показатели.

В настоящем исследовании анализировались равнопрочные бетоны с расходом вяжущего 330 кг/м³ с использованием ПЦ500Д0Н ОАО «Мальцовский портландцемент» и расширяющие добавки на основе доменных гранулированных шлаков ПАО «Северсталь».

Нормируемые показатели таких бетонов представлены в табл. 4 и на рис. 4–6.

Результаты испытаний, представленных в табл. 4, показали, что для получения бетонов с компенсированной усадкой с применением шлаков с повышенным (более 20%) содержанием Al_2O_3 достаточно вводить 5–8% такой добавки. При этом деформации расширения в возрасте 14 сут достигли 0,2 и 0,08% при твердении на воздухе.

Из анализа результатов испытаний видно, что для получения напрягающего бетона необходимо вводить не более 12% расширяющей добавки этого типа. При этом величина самонапряжения повышается до 2 МПа (по требованию ТУ), а в возрасте 50 сут в воздушно-сухих условиях происходит снижение самонапряжения на 15% без снижения прочности.

При введении 8% добавки величина самонапряжения на 14-е сут достигает 1,8 МПа, при ее снижении в возрасте 50 сут (в условиях воздушно-влажного твердения) на 11%. Прочность незначительно увеличивается.

Проведенные исследования показали, что на основе молотого гранулированного шлака с содержанием Al_2O_3 свыше 20% могут быть получены напрягающие бетоны и бетоны с компенсированной усадкой класса до В40 с водонепроницаемостью до W20 и компенсацией усадочных деформаций. При этом количество расширяющей добавки варьировалось от 5 до 15%.

Применение напрягающих бетонов с использованием доменных шлаков позволит значительно расширить область их применения и решить следующие задачи:

– повысить эксплуатационные характеристики бетонов;

Таблица 4
Table 4

Изменения свойств бетонов в зависимости от количества РД
Changes in the properties of concrete depending on the number of RD

Состав	Состав вяжущего		Самонапряжение, МПа				Расширение, %				Прочность при сжатии, МПа			
	ПЦ	РД	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут
1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	22,4	34,1	49,4	48,6
2	95	5	0,2	0,4	0,7	0,4	0,04	0,08	0,06	0,02	23,1	34,1	52,2	56,4
3	92	8	0,6	0,9	1,2	0,8	0,07	0,11	0,2	0,08	28,1	37,8	56,4	56,7
4	90	10	0,7	1,4	1,8	1,6	0,1	0,25	0,28	0,21	27,1	39,2	56,4	58,3
5	85	15	0,9	1,8	1,7	1,5	0,12	0,26	0,3	0,28	24,1	39,8	56,6	58,6

– расширить сырьевую базу для получения высокоэффективных строительных материалов;

– решить экологическую задачу по защите окружающей среды путем утилизации отходов металлургических производств.

Полученные результаты использования промышленных отходов доменных шлаков Нижнетагильского металлургического комбината показали, что в ряде заводов можно получать расширяющие добавки.

В регионах Сибири и Урала имеются заводы, в отходах которых содержание оксидов алюминия (Al_2O_3) более 15%, поэтому НИИЖБ им. А.А. Гвоздева обратился с предложением использовать их собственные отходы для выпуска расширяющих добавок и получения эффективных бетонов для возведения водонепроницаемых конструкций подземной части жилых и общественных зданий (в том числе по методу «белой ванны»).

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Дворкин Л.И. Ресурсосбережение в строительстве за счет применения побочных промышленных продуктов. М.: ЦМИПКС, 1986. 66 с.
2. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющие и напругающие цементы и самонапряженные конструкции. М.: Стройиздат, 1974. 312 с.

3. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. М.: Стройиздат, 1983. 279 с.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Стройиздат, 1968. 268 с.
5. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1989. 348 с.

References

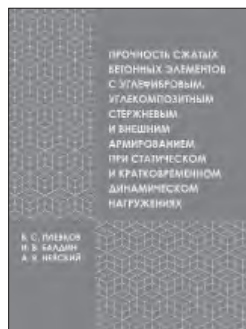
1. Bazhenov YU.M., Dvorkin L.I. Resursosberezhenie v stroitel'stve za schet primeneniya pobochnykh promyshlennykh produktov [Resource saving in construction through the use of by-products of industrial production]. Moscow: CMIPKS, 1986. 66 p.
2. Mikhailov V.V., Litver S.L. Rasshirayushchie i napryagayushchie tsementy i samonapryazhennye konstruksii. [Expanding and straining cements and self-stressed structures]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 312 p.
3. Royak S.M., Royak G.S. Spetsial'nye tsementy [Special cements]. Moscow: Stroyizdat. 1983. 279 p.
4. Batrakov V.G. Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika [Modified concrete. Theory and practice]. Moscow: Stroyizdat. 1968. 268 p.
5. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of binding materials]. Moscow: Vysshaya shkola. 1989. 348 p.

Прочность сжатых бетонных элементов с углефибровым, углекомпозитным стержневым и внешним армированием при статическом и кратковременном динамическом нагружениях

Авторы – В.С. Плевков, И.В. Балдин, А.В. Невский

ISBN 978-5-6048004-3-0

Томск, Издательство ТГАСУ. 2022, 176 с.



Монография посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям сжатых бетонных конструкций с углекомпозитным стержневым армированием при статическом и кратковременном динамическом нагружениях. Приведены результаты испытаний и диаграмма состояния углекомпозитной арматуры при растяжении и сжатии. Рассмотрены наиболее рациональные способы реализации ее высокого прочностного потенциала в статически и динамически нагруженных сжатых бетонных элементах при помощи углеродного фибрового и углекомпозитного внешнего армирования бетона. На основе опытных данных и результатов теоретических исследований сформулирован инженерный метод расчета прочности сжатых бетонных элементов с углеродным фибровым, углекомпозитным стержневым и внешним армированием. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований

сжатых бетонных элементов с различными параметрами углефибрового, стержневого и внешнего углекомпозитного армирования при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Международный строительный форум и выставка 100+ TechnoBuild

Международный форум и выставку 100+ TechnoBuild, которые прошли в Екатеринбурге в октябре 2022 г., посетило более 18 тыс. участников из России и стран СНГ (в 2021 году — около 13 тыс. человек). Впервые мероприятие проходило четыре дня. Деловая программа насчитывала 207 секций. Выступило 600 спикеров. На выставке представлено 320 экспонентов. Одним из ключевых соорганизаторов 100+ выступило Министерство строительства и ЖКХ РФ. Журналы «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» традиционно информационные партнеры форума.



Сохранение темпов и параметров проектного финансирования жилищного строительства, которых удалось достичь в период 2020–2022 гг., в настоящее время является важнейшей задачей, заявил замминистра строительства и ЖКХ РФ Никита Сташин на пленарном заседании «Строительство будущего. Новые возможности» в рамках Международного строительного форума и выставки 100+ TechnoBuild. Он подчеркнул, что кроме увеличения показателя ввода жилья до 120 млн м² к 2027 г. необходимо обратить внимание на незавершенные объекты. Также в 1,5 раза надо увеличить объем ввода объектов, которые строятся с участием бюджетного финансирования — при помощи инфраструктурных кредитов, в рамках нацпроектов, федеральных инвестиционных программ и др. Пленарное заседание состоялось в формате «вопрос–ответ». В нем приняли участие представители органов власти, крупнейших застройщиков и отраслевых объединений.

Например, Свердловская область продолжит наращивать темпы сдачи жилья, сообщил губернатор **Е.В. Куйвашев** журналистам на брифинге во время форума 100+TechnoBuild. Он отметил, что в Свердловской области хороший задел на пять лет и планы по вводу жилья будут увеличиваться. В 2022 г. будет сдано порядка 3 млн м² жилья. На форуме обсуждали вопросы комплексного развития территорий: в России рассматривается 761 территория общей площадью 25 тыс. га. На них может появиться 112 млн м² жилья. Решения приняты по 226 участкам. Для комплексного развития территорий власти используют механизм «инфраструктурного меню», в который входят инфраструктурные бюджетные кредиты и облигации, поддержка ВЭБ.РФ развития инфраструктуры, а также другие меры. Застройщики отметили, что механизм требует совершенствования. Среди моментов, на которые необходимо обратить внимание, работа с собственниками, формирование документации по планировке территорий, финансирование процесса расселения жителей старых домов и др.

По словам зам. директора Департамента металлургии и материалов Минпромторга России **Р.Г. Куприна**, до 2024 г. рынок будет обеспечен всеми строительными материалами в полном объеме. На данный момент рассматриваются планы по стимулированию строительства новых мощностей в тех регионах, где есть собственный дефицит и существует проблема с доставкой. Он одобрил создание каталога импортозамещения стройматериалов и оборудования, которым занимается Национальное объединение строителей (НОСТРОЙ). В каталог включено порядка 1,8 тыс. позиций.

По сообщению зам. министра строительства и жилищно-коммунального хозяйства **С.Г. Музыченко**, Минстрой России продолжает работу с нормативными документами: в первом полугодии 2022 г. внесены изменения в 259 специальных технических условий. Директор Федерального центра нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве **А.В. Копытин** добавил, что в настоящее время создается цифровая платформа, через которую будут координироваться рабочие группы и технические комитеты по вопросам стандартизации. Отмечено, что техрегламент Евразийского экономического союза (ЕАЭС) по строительным материалам и изделиям проходит публичные согласования в РФ и странах ЕАЭС.

Международная научно-практическая конференция BetONconf'2022

В Москве состоялось одно из ключевых научных мероприятий строительной отрасли — 11-я международная научно-практическая конференция BetONconf'2022, организованная компанией «Полипласт Новомосковск». Конференция объединила около 400 представителей компаний — производителей товарного бетона, железобетонных изделий и конструкций, строительных растворов со всей страны, а также представителей смежных отраслей — производителей цемента, оборудования и материалов. Мероприятие привлекло научных деятелей — профессоров и преподавателей научно-исследовательских институтов, представителей общественных и саморегулируемых организаций строительного комплекса, средства массовой информации. Журналы «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» выступили информационными партнерами конференции BetONconf'2022.

Основной задачей конференции в 2022 г. стало получение знаний о новейших технологиях в области производства бетона и железобетона, поиск способов практического применения инноваций в отрасли в современных экономических условиях, а также укрепление делового и научного сотрудничества. В программу мероприятия были включены самые актуальные темы и вопросы, касающиеся не только производственной и научной деятельности, но и их развития в санкционных условиях.

Конференция BetONconf'2022 традиционно состояла из трех секций, которые включали в себя не только выступления спикеров, но и интерактивное общение, вопросы слушателей и обсуждение наиболее важных проблем отрасли.

Открыл официальную часть мероприятия директор по продажам компании «Полипласт Новомосковск» **С.А. Молчанов**, который в своем выступлении рассказал о планах и перспективах развития компании, а также о новых разрабатываемых продуктах и продуктовых направлениях. Благодаря поддержке правительства Тульской области, в том числе в рамках глобальной стратегии по развитию промышленного потенциала региона, компания успешно завершила ряд крупных инвестиционных проектов: значительно увеличены мощности реакционного отделения, модернизирован участок по производству основного сырья. В мае 2022 г. закончено строительство производственного комплекса по выпуску сухих функциональных добавок. Продукция, производимая комплексом, поставляется как на внутренний рынок, так и на экспорт.

В настоящее время на площадке «Полипласт Новомосковск» ведутся работы по созданию нового производства технологичных высокомолекулярных полимеров, которые необходимы для обеспечения потребности страны в специализированной химии. На церемонии вручения премии «Тульский бизнес-2022» компания «Полипласт Новомосковск» признана промышленной компанией 2022 года. Это первая независимая премия в области бизнеса в Тульском регионе, которая призвана содействовать привлечению инвестиций в тульскую экономику, помогать компаниям-номинантам расширять свой бизнес, повышать репутацию и конкурентоспособность на рынке Тульской области и России.

На мероприятии обсуждались развитие промышленности строительных материалов в современных условиях; состояние и развитие нормативной базы в индустрии бетона и железобетона; новые подходы к технологии бетона и перспективы развития; изменения рынка добавок в бетон; литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси и бетоны нового поколения; проблемы разрушения и ремонта железобетона; вопросы строительства и ремонта цементобетонных дорожных покрытий; микроцементы российского производства и их применение в современном строительстве.

Конференция BetONconf'2022 вызвала живой интерес со стороны профессионального сообщества, что является главной целью организаторов.



С.Н. ЛЕОНОВИЧ¹, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН, главный научный сотрудник «Центра научных исследований и испытаний строительных конструкций (ЦНИИСК) филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» (sleonovich@mail.ru); Е.Е. ШАЛЫЙ², инженер (john_shamali@mail.ru); Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ³, гл. инженер; А.В. СТЕПАНОВА¹, инженер; В.В. МАЛЮК⁴, ген. директор; А.В. КОЛОДЕЙ¹, инженер

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

² Дальневосточный федеральный университет (690091, г. Владивосток, пос. Аякс, корп. 12, каб. Е920)

³ ООО «ИнжСпецСтройПроект» (220076, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Мстиславца, 22, пом. 210)

⁴ ООО «Трансстрой-Трест» (Сахалинская обл., Корсаковский р-н, г. Корсаков, ул. Вокзальная, 19Г)

Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии: анализ методологии и приложений

Проведен анализ вероятностного начала коррозии в железобетонных конструкциях, подверженных проникновению ионов хлорида. Прочность конструкции является важным критерием, который должен оцениваться в каждом типе конструкции, особенно когда эти конструкции эксплуатируются в агрессивных средах. Рассматривая железобетонные элементы, процесс диффузии хлоридов широко используется для оценки долговечности. Поэтому при моделировании этого явления коррозия арматуры может быть лучше оценена и предотвращена. Эти процессы начинаются при достижении порогового уровня концентрации хлоридов на стальных стержнях арматуры. Несмотря на надежность нескольких моделей, предложенных в литературе, детерминированные подходы не могут точно предсказать время начала коррозии из-за случайности, наблюдаемой в этом процессе. В связи с этим долговечность может быть более реалистично представлена с использованием вероятностных подходов. В статье представлен вероятностный анализ проникновения ионов хлорида. Проникновение ионов хлорида моделируется с использованием второго закона диффузии Фика. Этот закон представляет собой процесс диффузии хлоридов, учитывая зависящие от времени эффекты. Вероятность отказа рассчитывается с использованием моделирования Монте-Карло и метода надежности первого порядка (FORM) с подходом прямой связи. Для изучения этих явлений рассматриваются некоторые примеры и предлагается упрощенный метод определения оптимальных значений для защитного слоя бетона.

Ключевые слова: алгоритмы надежности, железобетон, долговечность, расчет-прогноз, защитный слой бетона.

Для цитирования: Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В., Малюк В.В., Колодей А.В., Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии: анализ методологии и приложений // Бетон и железобетон. 2022. № 6 (614). С. 40–50.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-40-50>

S.N. LEONOVICH¹, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academician of the RAACS, Chief Researcher of the Center for Scientific Research and Testing of Building Structures branch of the BNTU "Research Polytechnic Institute" (sleonovich@mail.ru);

EE. SHALY², Engineer (john_shamali@mail.ru); D.A. LITVINOVSKIY³, Main engineer; A.V. STEPANOVA¹, Engineer;

V.V. MALYUK⁴, General director; A.V. KOLODEY¹, Engineer

¹ Belarusian National Technical University (65, Tyuravsimosty Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus)

² Far Eastern Federal University (office E920, building 12, Ayaks settlement, Vladivostok, 690091, Russian Federation)

³ InzhSpetsStroyProekt LLC (room 210, 22, P. Mstislavtsa Street, 220076, Minsk, Republic of Belarus)

⁴ Transstroy-Trest LLC (19G, Vokzalnaya Street, Korsakov, Sakhalin Region, Russian Federation)

Reliability Algorithms for Calculating and Predicting the Durability of Reinforced Concrete under Chloride Aggression: Analysis of Methodology and Applications

The article deals with the analysis of the probabilistic onset of corrosion in reinforced concrete structures subject to the penetration of chloride ions. Structural strength is an important criterion that must be evaluated in every type of structure, especially when these structures are operated in aggressive environments. When considering reinforced concrete members, the chloride diffusion process is widely used to evaluate durability. Therefore, by simulating this phenomenon, reinforcement corrosion can be better assessed and prevented. These processes begin when a threshold level of chloride concentration on the steel reinforcement bars is reached. Despite the reliability of several models proposed in the literature, deterministic approaches cannot accurately predict the time of onset of corrosion due to the randomness observed in this process. In this regard, durability can be more realistically represented using probabilistic approaches. The article presents a probabilistic analysis of the penetration of chloride ions. The penetration of chloride ions is modeled using Fick's second law of diffusion. This law represents the diffusion process of chlorides, taking into account time-dependent effects. The failure probability is calculated using Monte Carlo simulation and first order reliability method (FORM) with a feed-forward approach. To study these phenomena, some examples are considered and a simplified method is proposed for determining the optimal values for the concrete cover.

Keywords: reliability algorithms, reinforced concrete, durability, calculation-forecast, protective layer of concrete.

For citation: Leonovich S.N., Shaly E.E., Litvinovsky D.A., Stepanova A.V., Malyuk V.V., Kolodey A.V. Reliability algorithms for calculating and predicting the durability of reinforced concrete under chloride aggression: analysis of methodology and applications. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 40–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-40-50>

Коррозия арматурной стали железобетонных конструкций

Железобетонные конструкции (ЖБК) являются одним из наиболее часто используемых типов конструкций во всем мире. Когда ЖБК расположены в неагрессивных средах, эти типы конструкций соблюдают срок службы, который задается критериями долговечности. Что касается долговечности, ее можно определить как период времени, в течение которого конструкция поддерживает минимальные функциональные условия, сопротивление и внешние аспекты, необходимые при проектировании. Однако на прочность конструкции могут сильно влиять процессы деградации экологического и функционального происхождения [1, 2]. Среди этих процессов стоит обозначить проникновение хлоридов, карбонизацию, усталость и ползучесть. Поэтому принимается железобетонная конструкция с анализом надежности прочности конструкций, а также прогнозированием ремонта и технического обслуживания становится [3–5].

Одним из важнейших процессов деградации железобетонных конструкций является явление арматурной коррозии. Оно несет прямую ответственность за долговечность и разрушение бетонных конструкций. Что касается внешних агентов, то диффузия хлоридов определяется как один из основных факторов, вызывающих коррозию арматуры. Когда начинается коррозия, на долговечность конструкции влияет несколько явлений, таких как уменьшение поперечного сечения арматуры, трещинообразование в бетоне и потеря адгезии между сталью и бетоном [6, 7].

В целом, процесс коррозии можно разделить на два этапа: инициацию и период распространения. В период инициации ионы хлорида диффундируют через бетон к арматуре. Концентрация хлорида достигает порогового значения, что вызывает коррозию стали. Период распространения коррозионного процесса определяется как время от начала коррозии до достижения критического ограничения потерь стали.

Первая стадия – относительно короткий период. Поэтому процесс диффузии хлоридов часто используется для указания на долговечность и срок службы бетонных конструкций [8].

Что касается моделей прогнозирования времени коррозии, то в литературе было предложено несколько моделей для надлежащего решения проблемы коррозии в железобетонных конструкциях. Большинство из них предлагают детерминированные подходы для моделирования этой структурной проблемы. Однако из-за большого количества присущих неопределенностей, таких как проникновение хлоридов в бетон, эти проблемы могут быть точно проанализированы только с учетом вероятностных подходов. Сре-

ди этих моделей и составов стоит упомянуть [9–13], где процесс коррозии изучался с учетом нескольких условий и переменных. На основе этих вероятностных моделей может быть точно выполнен анализ оценки срока службы в железобетонных конструкциях, подверженных проникновению хлоридов [14–16]. Например, учитывая эти результаты, аспекты планов технического обслуживания и инспекций, может быть предложен оптимальный защитный слой бетона с учетом случайности, присущей переменным в каждой модели.

Для достижения требований к долговечности в железобетонной конструкции создана механическая модель для оценки концентрации хлоридов, где очень важно положение внутри бетона. Более того, механизм проникновения хлорида контролируется комплексами взаимодействия между физическими и химическими механизмами, которые являются крупным источником неопределенностей. Однако это явление часто встречается.

Диффузионные законы Фика предъявляют все требования к моделированию проблемы и основаны на некоторых гипотезах, таких как: бетон является однородным материалом в пространстве. Прямым следствием этого предположения является постоянное значение коэффициента диффузии во времени. Модель предполагает, что концентрация ионов хлорида в окружающей среде постоянна и допускает бетон в насыщенном состоянии. Предполагая все это поведение, вероятностный анализ попадания хлорида в бетонные конструкции может быть выполнен путем соединения законов диффузии Фика с алгоритмами надежности. В данной работе разработана связанная механическая и надежностная модель, позволяющая проводить вероятностный анализ железобетонных конструкций, подвергающихся проникновению ионов хлорида. Эти анализы направлены на количественную оценку вероятности начала коррозии в железобетонной конструкции на основе подхода надежности. Механическая модель основана на втором законе диффузии Фика, который способен имитировать процесс проникновения хлоридов в пористые материалы. Затем можно оценить концентрацию хлоридов на заданной глубине защитного слоя бетона и соответствующее время. Для определения вероятности отказа были рассмотрены два алгоритма надежности: прямая связь механической модели с формой и моделирование Монте-Карло. Оба алгоритма определяют вероятность отказа с учетом сценариев отказа, достигнутых механической моделью, основанной на законе диффузии Фика. Проанализировано вероятностное проникновение хлорида для некоторых частных случаев и обсужден набор значений, достигнутых

предложенными моделями. Упрощенная процедура получения оптимальных защитных слоев бетона для периодических проверок иллюстрируется также расчетами некоторых зданий.

Механическая модель – закон диффузии Фика

Коррозия арматуры, индуцированная хлоридами, может происходить в присутствии кислорода и влаги, когда накопление хлоридов внутри структур превышает пороговое значение. Даже для тщательно приготовленного бетона, с незначительным или практически нехлоридным наследием на этапе строительства, постепенное накопление необходимого уровня содержания хлоридов для инициирования коррозии арматуры происходит медленно за счет попадания ионов хлорида из внешних источников.

Явление переноса, связанное с движением ионов хлорида вдоль структур, подвергающихся воздействию агрессивных сред, объясняется главным образом диффузией ионов хлорида в пористый бетон под градиентом концентрации. Коэффициент диффузии хлоридов бетона, который зависит от пористой структуры бетона, характеризует этот поток при заданной концентрации хлоридного воздействия и рассматривается как характерное свойство затвердевшего бетона.

Чтобы смоделировать попадание хлорида и его перенос в пористый бетон, широко рассматривается второй закон диффузии Фика [17] как приемлемая модель. Законы Фика для диффузии применимы к материалу однородному, изотропному и инертному [18]. Более того, предполагается, что механические свойства диффузионного процесса одинаковы во всех направлениях и сохраняются постоянными во времени. Рассматривая бетон, эти гипотезы не полностью удовлетворяются, потому что бетон хорошо известен как гетерогенный, анизотропный и химически реакционноспособный (продолжающийся процесс гидратации и микротрещинообразования) материал. Однако методы, обычно используемые для моделирования переноса хлоридов в бетоне, считают, что этот процесс регулируется только ионной диффузией, тогда он предполагает, что защитный слой бетона полностью насыщен. Поэтому это делает гипотезы законов Фика приемлемыми для моделирования хлоридного проникновения, поскольку в этом случае материал предполагается полностью насыщенным, с однонаправленным потоком хлорида, т. е. с внешней поверхности в бетонную глубину. Когда хлорид диффундирует в бетон, изменение концентрации хлорида происходит в любое время в каждой точке бетона, и это неустойчивое состояние диффузии. В целях упрощения ее анализа задача диффузии рассматривается как одномерная. Многие инженерные пробле-

мы попадания хлорида, могут быть решены с учетом этого упрощения.

Предположение диффузионной теории Фика состоит в том, что перенос (заданный потоком) в бетоне ионов хлорида через единичную площадь сечения бетона в единицу времени пропорционален градиенту концентрации ионов хлорида, измеренному нормальному для сечения. Затем:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial p}, \quad (1)$$

где F – поток ионов хлорида в бетон; D – общий коэффициент диффузии бетона; C соответствует концентрации хлорида в любом положении внутри бетона; p – такое положение.

Отрицательный знак в приведенном выше уравнении возникает потому, что диффузия ионов хлорида происходит в направлении, противоположном увеличению концентрации ионов хлоридов. В целом, D не является постоянным, а зависит от многих параметров, таких как время, в течение которого произошла диффузия; расположение в бетоне; состав бетона. Если коэффициент диффузии хлоридов постоянен, уравнение (1) обычно называют первым законом диффузии Фика. Если это не так, отношение обычно называют первым общим законом диффузии Фика.

Есть некоторые случаи, когда это простое отношение не должно применяться. В связи с этим стоит упомянуть случаи, когда диффузионный процесс может быть необратимым или имеет анамнез-зависимость. В таких случаях закон диффузии Фика недействителен, и процесс диффузии называют аномальным. Однако ни одно из наблюдений до сих пор не указывает на то, что диффузию хлоридов в бетоне следует характеризовать как аномальную диффузию. Второй закон Фика может быть выведен с учетом принципа баланса массы. Затем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left(-D \frac{\partial C}{\partial p} \right). \quad (2)$$

Чтобы применить второй закон диффузии Фика в этой форме для бетона, подвергшегося воздействию хлорида в течение длительного периода времени, необходимо знать изменение коэффициента диффузии хлорида во времени. Если в конкретном случае существует лишь несколько наблюдений, то можно оценить верхнюю и нижнюю границу для изменения D во времени. Несмотря на эту зависимость, можно рассмотреть особый случай, когда коэффициент диффузии хлоридов не зависит от местоположения, времени и концентрации хлорида. В этом случае второй закон Фика можно переписать в более простом виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial p^2}, \quad (3)$$

где D_0 – постоянный коэффициент диффузии хлоридов бетона; t – время оценки концентрации хлоридов.

Решение дифференциального уравнения (3) для полубесконечной области с равномерной концентрацией на структурной поверхности задается следующим образом:

$$C(p, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left[\frac{p}{2\sqrt{D_0 t}} \right], \quad (4)$$

где C_0 – концентрация хлорида ионов на поверхности структуры, предположительно постоянная во времени; erfc – функция комплементарной погрешности.

В данной работе уравнение (4) используется для оценки концентрации хлоридов $C(p, t)$, в заданном положении p и времени t , и по этой причине также используется в качестве механической модели. Исходя из значений концентрации ионов хлорида на заданной структурной глубине, можно оценить структурную безопасность. Однако для того, чтобы можно было оценить безопасность, была построена связь между описанной механической моделью и алгоритмами надежности. Эти модели связи учитывают присутствующую случайным величинам в процессе диффузии. Одним из наиболее важных продуктов этих соединений является возможность выбора критического времени обслуживания конструкций на основе заданного целевого показателя надежности или определения толщины защитного слоя бетона на основе целевого уровня безопасности конструкции.

Понятия надежности и методы анализа

Общие понятия. Анализ надежности направлен на вычисление вероятности отказа в отношении конкретного сценария сбоя, известного как предельное состояние. Первым шагом в оценке надежности является определение базового набора случайных величин $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, для которых необходимо учитывать неопределенности. Для всех этих переменных приписываются распределения вероятностей, чтобы смоделировать ее случайность. Эти распределения вероятностей могут быть определены физическими наблюдениями, статистическими исследованиями, лабораторным анализом и мнением экспертов. Количество случайных величин является важным параметром для определения вычислительного времени, затрачиваемого при анализе надежности. Чтобы уменьшить размер пространства случайных величин, рекомендуется рассматривать в качестве детерминированных все переменные, неопределенности которых приводят к незначительным влияниям на величину вероятности отказа.

Второй этап заключается в определении ряда потенциально критических режимов отказа. Для каждого из них функция предельного состояния разделяет пространство на две области, как описано на рис. 1: безопасный домен, где $G(X)>0$ и домен сбоя, где $G(X)<0$. Граница между этими двумя доменами опре-

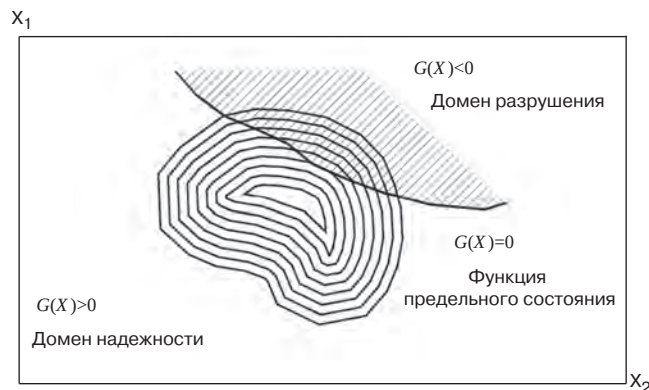


Рис. 1. Домены разрушения и надежности

Fig. 1. Domains of destruction and reliability

деляется $G(X)=0$, известное как само предельное состояние. Явное выражение функции предельного состояния обычно невозможно. Когда используются численные механические модели, только в нужном количестве точек его можно вычислить. Предельное состояние определяется с помощью критического режима отказа, рассчитанного уравнением (4). Вероятность отказа оценивается путем интегрирования в область отказа функции плотности соединения, представленной [19]:

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n, \quad (5)$$

где $f_x(X)$ – функция совместной плотности случайных величин X .

Поскольку оценка интеграла, определяемого уравнением (5), практически невозможна на практике, на основе концепции индекса надежности разработаны альтернативные процедуры [20]. Этот параметр определяется расстоянием между средней точкой и точкой отказа, помещенной в функцию предельного состояния $G(X)=0$ в нормализованном пространстве случайных величин. Индекс надежности позволяет рассчитать вероятность отказа, используя метод надежности первого порядка (FORM) следующим образом:

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (6)$$

где Φ – стандартная гауссовская кумулятивная функция распределения; β – индекс надежности.

Существует несколько альтернативных процедур, доступных в теории надежности, которые позволяют оценить вероятности структурного разрушения. Эти процедуры основаны на методах численного моделирования. Наиболее важным подходом является метод моделирования Монте-Карло. Однако, когда принимаются численные механические модели, дорогостоящие с точки зрения вычислительной работы, этот подход может быть ненадежным из-за большой выборки, необходимой для моделирования. В данном исследовании используются два подхода

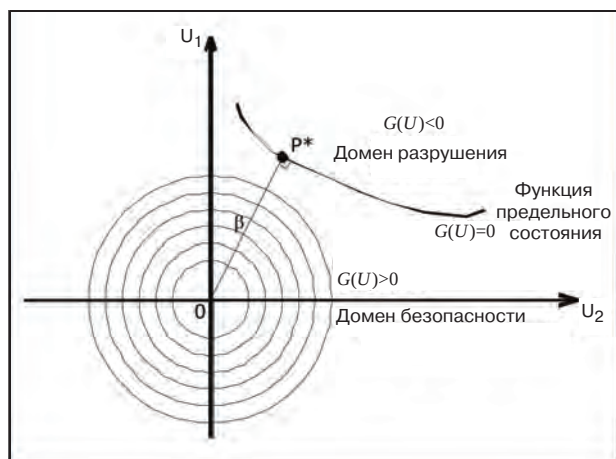


Рис. 2. Определение индекса надежности и расчетных точек
Fig. 2. Determination of the reliability index and calculated points

к надежности. Первый известен как прямой подход, поскольку он является результатом прямой связи механической модели по методу надежности первого порядка (FORM). Вторым используемым подходом – это классическая симуляция Монте-Карло. В обоих случаях модели используются для оценки вероятности разрушения с учетом процесса попадания хлорида в железобетонные конструкции.

Прямой подход – механическая модель и FORM

Основная процедура в этой модели заключается в непосредственном соединении модели надежности FORM с механической моделью, заданной уравнением (4). Этот подход продемонстрировал точность и надежность для анализа многих сложных инженерных проблем, как обсуждалось в [21–23].

Функция предельного состояния определяет границу между безопасными доменами и доменами сбоя. Рассматривая проблему проникновения хлоридов, функция предельного состояния может быть записана в терминах времени начала коррозии:

$$G(X) = t_R(X) - t_a, \quad (7)$$

где t_R – время начала коррозии, зависящее от множества случайных величин X ; t_a – структурный срок службы, ожидаемый при проектировании, который рассматривался как детерминированный параметр или это может быть предлагаемое время для инспекций.

Время t_R вычисляется из уравнения (4), предполагающего концентрацию хлорида $C(p, t)$, известную в заданном положении p внутри бетона. На самом деле предполагается, что $C(p, t)$ равен пороговому значению концентрации хлоридов, при котором вызывается коррозия стали, в состоянии отказа. Диапазоном p положения в данном случае является защитный слой бетона, в котором он принимает ноль на внешней поверхности элемента конструкции и

значение защитного слоя бетона на арматурной поверхности внутри бетона. В связи с этим время начала коррозии может быть определено явно из уравнения (4) как:

$$t_R = \frac{1}{D_0} \left\{ \frac{p}{2 \operatorname{erfc}[C(p, t)/C_0]} \right\}^2. \quad (8)$$

Чтобы включить инвариантную меру безопасности, случайные величины, определенные в физическом пространстве, преобразуются в независимые стандартные гауссовские переменные [20] с использованием соответствующих вероятностных преобразований. Функция предельного состояния $G(X)=0$, определенная в физическом пространстве, преобразуется в $H(U)=0$ в стандартном нормализованном пространстве с $U_i = [1, 2, \dots, u_n]$, где U – множество нормализованных случайных величин. В этом стандартном пространстве индекс надежности b задается минимальным расстоянием между областью отказа и началом стандартного пространства. Индекс надежности можно оценить, решив ограниченную задачу оптимизации: Найти: U , который минимизирует: $b = U^T \cdot U$ и при условии:

найти: U , который минимизирует: $\beta = \sqrt{U^T \cdot U}$ и при условии: $H(U)=0$. (9)

Решение этой задачи сходится к ближайшей к пространству точке отказа, известной как расчетная точка или наиболее вероятная точка отказа U^* . В стандартном пространстве расстояние между этой точкой и началом координат является индексом надежности, как показано на рис. 2. Индекс надежности b может быть достигнут путем применения любого алгоритма оптимизации. Особым алгоритмом, который эффективен в данном случае для решения задач надежности, является алгоритм HLRF [24]. Этот алгоритм оптимизации может быть связан непосредственно с механической моделью. Поскольку время начала коррозии известно точно, известно сопротивление t_R . Следовательно, функция предельного состояния определяется по пунктам. Затем градиент функции предельного состояния может быть определен с помощью любой числовой процедуры. Для данного предложения был использован метод прямых конечных различий. Некоторые трудности могут возникнуть из-за уравнения (8), особенно его градиентов, оценка, обусловленная наличием погрешности комплементарной функции. Естественным барьером, который можно отметить в этом подходе, является числовая ошибка из-за процедуры конечной разности, которая может повлиять на сходимость связанной процедуры, а также на точность решения, особенно для нелинейных переходных явлений. Однако для всех задач, численные задачи, связанные с методом конечных разностей, не наблюдались. Кроме того, было проверено, что процедура прямой

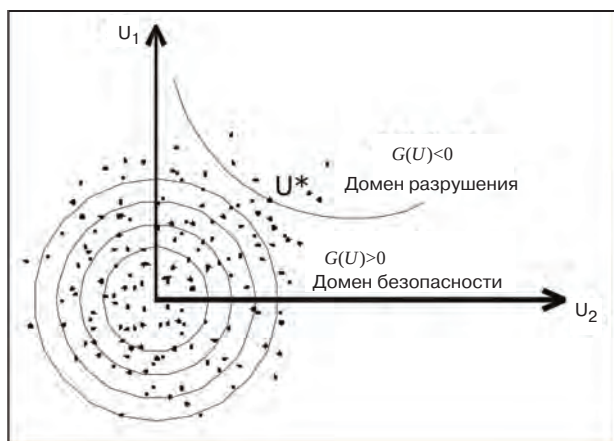


Рис. 3. Выборка Монте-Карло для двух случайных переменных
Fig. 3. Monte Carlo sampling for two random variables

связи дает точные результаты и стабильную скорость сходимости при разумном количестве механических анализов.

Моделирование Монте-Карло

Метод Монте-Карло представляет собой подход численного моделирования, широко используемый в задачах надежности [25]. В этом методе выборка случайных величин используется для построения набора значений, направленных на описание пространства отказа и безопасного пространства и вычисления уравнения (5). Выборка строится на основе статистического распределения, присвоенного для каждой случайной величины в задаче. Поскольку этот метод имеет дело с моделированием функции предельного состояния, чем больше будет выборка, тем точнее будет описание пространства и более точной будет вероятность достижения отказа. Ядро этого метода состоит в построении выборки для каждой случайной величины, участвующей в задаче. Затем область безопасности и точки отказа исследуются путем моделирования уравнения (7), (рис. 3). Вероятность отказа вычисляется для моделирования Монте-Карло, используя следующее выражение:

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_x(x_i) dx_i = \int_{G \leq 0} I(x_i) f_x(x_i) dx_i = E[I(x_i)]. \quad (10)$$

Функция $I(x_i)$ является дискретным оператором для вычисления сбоев и может быть записана как:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 \rightarrow G \leq 0 \\ 0 \rightarrow G > 0. \end{cases} \quad (11)$$

Моделируя функцию предельного состояния для удобного числа выборок, среднее значение $(E)^j(x_i)$ будет оценщиком вероятности отказа. Затем:

$$\bar{P}_f = E[I(x_i)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i). \quad (12)$$

Недостаток этого метода связан с большим количеством симуляций N , необходимых для точного вы-

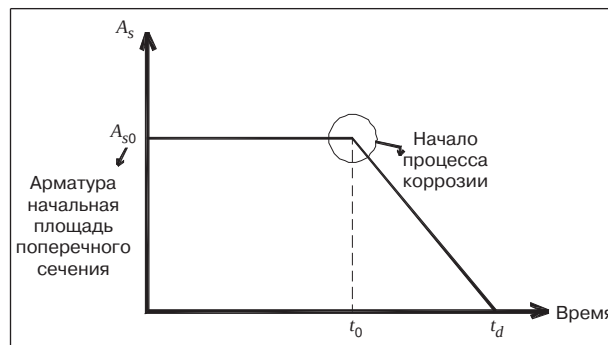


Рис. 4. Коррозионный процесс на площади поперечного сечения арматуры

Fig. 4. Corrosion process on the cross-sectional area of the reinforcement

числения вероятности отказа. Как правило, для того, чтобы точно оценить вероятность отказа 10^{-n} , количество симуляций должно быть выше 10^{n+2} или 10^{n+3} . Это означает, что в гражданских инженерных сооружениях, где вероятность отказа находится в пределах от 10^{-3} до 10^{-6} , требуется, по крайней мере, от 10^5 до 10^9 реализаций функции предельного состояния. Когда задействованы сложные численные механические модели, которые приводят к высокой вычислительной работе, этот метод может быть ненадежным. Однако теоретически этот метод приводит к реальной вероятности отказа, когда диапазон выборки становится бесконечным.

Методология анализа

Моделирование коррозионного явления в железобетонных конструкциях должно учитывать два различных этапа, как показано на рис. 4. Первый этап связан с попаданием хлоридов в пористый бетон. На этом этапе концентрация хлоридов вдоль глубины защитного слоя бетона увеличивается с течением времени. Коррозия начинается, когда концентрация хлоридов, окружающих арматуру, достигает порогового уровня, что приводит к потере химической пассивной защиты бетона. В конце этого этапа арматурная сталь остается неповрежденной. Вторая стадия, называемая стадией распространения, характеризуется уменьшением поперечных сечений арматуры, что порождает потерю прочности конструкции с течением времени.

По сравнению с первой стадией период размножения относительно короткий. Поэтому время начала коррозии было широко принято для оценки прочности конструкции и безопасности. В связи с этим целью данной работы является оценка вероятности отказа с учетом сценария отказа, прогнозируемого стадией инициации. Поэтому отказ наблюдается, когда концентрация хлоридов на глубине арматуры достигает порогового уровня. В связи с этим основными пара-

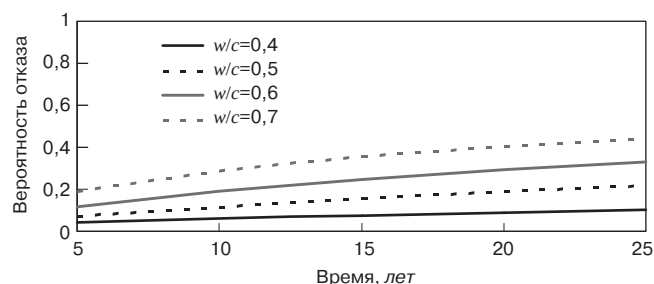


Рис. 5. Вероятность отказа со временем

Fig. 5. Probability of failure over time

метрами, рассматриваемыми для всех выполняемых анализов надежности, являются:

- порог концентрации хлоридов на границе раздела между бетоном и арматурными стержнями, определяющий начало коррозионного процесса, $C(x,t)$. Этот параметр был изучен экспериментально [12];

- концентрация хлоридов на поверхности конструкции, C_0 . Этот параметр связан с агрессивностью окружающей среды, и его контрольные значения могут быть определены экспериментальными наблюдениями, представленными в [12], или определены с использованием международного стандартного проектного кода [26];

- коэффициент диффузии бетона, D_0 , который был изучен [27];

- структурная глубина, которая в данном исследовании определяется как защитный слой бетона.

Первоначальные трещины вследствие твердения бетона и изгиба/сдвига и продольного растрескивания не были учтены в формулировке, представленной здесь. Эти явления влияют на процесс коррозии, и его моделирование может быть точно выполнено с использованием численных методов, таких как метод конечных элементов и метод граничных элементов [28].

Согласно [12], концентрация хлоридов на поверхностях конструкций является функцией атмосферы, где расположены эти элементы. Толщина защитного слоя также определяется в соответствии с окружающей средой, которая заявлена международным стандартом конструкции бетона в категориях агрессивности. Коэффициент диффузии бетона, представляющий собой стойкость материала к попаданию хлорида, зависит от водо-цементного отношения. Чем выше будет доля воды, тем выше будут пустые объемы внутри матрицы из-за процесса твердения бетона. Следовательно, выше будет проницаемость материала, а ниже будет сопротивление бетона проникновению хлорида. Поэтому в регионах, близких к побережью, настоятельно рекомендуется строить железобетонные конструкции с более низким водо-цементным отношением и большими защитными слоями бетона.

Предложенная модель позволяет оценить вероятность структурного разрушения с учетом ранее представленных случайных величин. Более того, эта модель способна описать зависимость соотношения между вероятностью отказа и временем. Затем предложенная модель может быть использована для решения интересной структурной проблемы, которая связана с планами обслуживания конструкций, основанными на их безопасности.

Чтобы применить модель в этой задаче, необходимо определить заданный уровень безопасности. Указанный уровень безопасности может быть определен с использованием [29], где предотвращение структурных отказов измеряется на основе целевого индекса надежности. Поскольку концентрация хлоридов в структурном покрытии увеличивается с течением времени, безопасность от этого режима отказа со временем снижается. Интервалы времени для периодического технического обслуживания конструкций, для безопасности конструкций достигаются, когда индекс надежности, рассчитанный с использованием предлагаемой модели, достигает целевого показателя надежности. Стоит отметить, что ремонтные процедуры предполагаются, в данном случае, как совершенные, т. е. после технического обслуживания конструкция восстанавливает свои первоначальные условия целостности без хлоридов. Эти интервалы определяются до тех пор, пока параметры, связанные с материалом, глубиной покрытия и агрессивностью окружающей среды, определены априори.

Другое применение предлагаемой модели связано с определением толщины слоя и свойств бетона w/c , основанное на данном уровне безопасности и ожидаемом структурном сроке службы. Когда интервалы времени для технического обслуживания конструкции и ожидаемого срока службы конструкции указаны априори, отношение w/c и значения защитного слоя бетона могут быть получены путем использования предлагаемой модели. Целью определения пары этих значений, является к приведению конструкции к поддержанию уровня безопасности, равного целевому индексу надежности в течение указанного периода времени. В этом приложении значения w/c и защитного слоя достигаются, когда индекс надежности, заданный предлагаемой моделью, равен целевому индексу надежности.

Важно подчеркнуть, что эти процедуры не учитывают затраты, связанные ни с процедурой технического обслуживания, ни с производством бетона. Однако эти приложения предлагаемой модели могут быть выполнены, если аналитики заинтересованы в проектировании, учитывая, исключительно, критерий безопасности.

Применение

Для иллюстрации применимости предложенной модели были проведены вероятностные анализы с учетом различных сценариев и свойств бетона для оценки влияния агрессивности окружающей среды, соотношения вода/цемент и толщины защитного слоя на вероятность разрушения конструкций из-за проникновения хлоридов. В каждой из работ исследуется какой-то специфический аспект проблемы [30–57].

Выводы

Представлено исследование вероятностного иницирования коррозии в железобетонных конструкциях с использованием связи между вторым законом диффузии Фика и алгоритмами надежности. В этом случае коррозия начинается, когда химическая защита, окружающая стальные стержни, теряется из-за попадания хлорида. Анализ вероятности возникновения коррозии во времени проводился с учетом двух различных категорий агрессивности среды и нескольких комбинаций защитного слоя и свойств бетона (В/Ц отношение). Как подтверждается представленными результатами, инициация коррозии зависит от нескольких параметров. Однако концентрации хлоридов на поверхности конструкции и значения защитного слоя, как показали, имеют большое значение для вероятностного анализа. В равной степени коэффициент диффузии также важен для измерения сопротивления материала попаданию хлорида и может быть определяющим для выбора оптимальных значений защитного слоя бетона. Долговечность железобетонных конструкций должна быть связана с более реальными значениями защитного слоя бетона, которые, основаны только на международном стандарте по конструкциям из бетона. Этот параметр более реалистично оценивается с использованием вероятностных подходов, учитывая случайность, при явлении деградации, влияющую на долговечность конструкции.

Выбор оптимальных значений защитного слоя сильно зависит от качества бетона, его пористости, что отражается на w/c . Он также зависит от периода времени между конструктивными мероприятиями технического обслуживания. Очевидно, что определение оптимального сочетания между бетонной смесью, толщиной защитного слоя и затратами на строительство/техническое обслуживание/ремонт является следующим вопросом, по созданию более экологичной, безопасной и рациональной конструкции.

Список литературы / References

1. Ueli Angst, Bernhard Elsener, Claus K. Larsen, Øystein Vennesland. Critical chloride content in

reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39, pp. 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>

2. Santiago Guzmán, Jaime C. Gálvez, José M. Sancho. Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, Iss. 8, pp. 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.008>
3. Tianyu Xiang, Renda Zhao Evaluation of the reliability of diffusion of chlorides in fatigue-damaged concrete. *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29, Iss. 7, pp. 1539–1547. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.09.002>
4. Izabela Skrzypczak, Marta Słowik, Lidia Buda-Ozóg. The Application of reliability analysis in engineering practice – reinforced concrete foundation. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193, pp. 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.197>
5. Jung S. Kong, Ayman N. Ababneh, Dan M. Frangopol, Yunping Xi. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2002. Vol. 17, Iss. 3, pp. 305–315. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(02\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(02)00014-0)
6. Trevor J Kirkpatrick, Richard E Weyers, Christine M Anderson-Cook, Michael M Sprinkel. Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, Iss. 12, pp. 1943–1960. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00905-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00905-5)
7. Woo-Yong Jung, Young-Soo Yoon, Young-Moo Sohn Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Iss. 5, pp. 663–677. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01034-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01034-7)
8. Tuutti Kyösti Corrosion of steel in concrete. 1982. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
9. Thirumalai Parthiban, R. Ravi, G.T. Parthiban Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete. *Advances in Engineering Software*. 2006. Vol. 37, Iss. 6, pp. 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.09.004>
10. Michael P. Enright, Dan M. Frangopol. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20, Iss. 11, pp. 960–971. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00190-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00190-9)
11. Duracrete, “Statistical Quantification of the Variables in the Limit Stat Functions,” Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, The EU-Brite EuRam III, January 2000.

12. Kim Anh T. Vu, Mark G. Stewart. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*. 2000. Vol. 22. Iss. 4, pp. 313–333. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(00)00018-7)
13. Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, Saleem Akhtar. Estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 1 (5), pp. 92–96. DOI: 10.12691/ajcea-1-5-1
14. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion. *Journal of Infrastructure Systems*. 1998. Vol. 4, pp. 146–155.
15. Allen C. Estes, Dan M. Frangopol. Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results. *Journal of Bridge Engineering*. 2003. Vol. 8 (6). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(374)
16. Q. Suo, M. Stewart. Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information. *Materials Science*. 2009. Vol. 94, pp. 1340–1348, DOI:10.1016/j.res.2009.02.011
17. Crank J. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, London. 1975. 414 p.
18. Dhir R.K., Jones M.R., Ng S.L.D. Prediction of total chloride content profile and concentration/time-dependent diffusion coefficients for concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1998. Vol. 50. Iss. 1, pp. 37–48. <https://doi.org/10.1680/mac.1998.50.1.37>
19. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. Department of mechanical engineering technical university of Denmark. June–September, 2007.
20. Abraham M. Hasofer, Niels C. Lind. Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974. Vol. 100. Iss. 1.
21. LiuyangFengXudongQian An adaptive learning approach to determine and update crack sizes from strain relaxation data for welded plate joints. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 259. 108165. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108165>
22. Edson Denner Leonel, Alaa Chateauneuf, Wilson Sergio Venturini. Probabilistic crack growth analyses using a boundary element model: Applications in linear elastic fracture and fatigue problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2012. Vol. 36. Iss. 6, pp. 944–959. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.12.016>
23. Leonela E.D., Chateauneuf A., Venturini W.S., Bressolette P. Coupled reliability and boundary element model for probabilistic fatigue life assessment in mixed mode crack propagation. *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Iss. 11, pp. 1823–1834. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.05.001>
24. Rüdiger Rackwitz, Bernd Flessler. Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*. 1978. Vol. 9. Iss. 5, pp. 489–494. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90046-9)
25. Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins. Reliability of structures. CRC Press. 2019 407 p.
26. Brazilian Association of Technical Standards. ABNTNBR 6118. Concrete Structural Design – Procedures. Rio de Janeiro, 2003.
27. Papadakis V.G., Roumeliotis A.P., Fardis M.N., Vagenas C.G. Mathematical modelling of chloride effect on concrete durability and protection measures. *Concrete repair, rehabilitation and protection*. 1996. No. 6, 165–174.
28. Edson Denner Leonel, Wilson Sergio Venturini, Alaa Chateauneuf A BEM model applied to failure analysis of multi-fractured structures. *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18. Iss. 6, pp. 1538–1549 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.05.014>
29. JCSS Probabilistic Model Code. ISBN 978-3-909386-79-6. jcsc-lc.org/jcsc-probabilistic-model-code/
30. Леонович С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании. *Бетон и железобетон*. 1988. № 10.
30. Leonovich S.N. Durability of centrifuged reinforced concrete structures during cyclic freezing and thawing. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1988. No. 10.
31. Leonovich S.N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: «Test Methods Development and Harmonization of Standards», 1996. *Intern. Congress «Concrete in The Service of Mankind»*. Dundee, Scotland, UK.
32. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Милованов А.Ф., Пирадов К.А., Сейланов Л.А. Разрушение бетона и его долговечность. Мн.: Тыздзень. 1997. 170 с.
32. Guzeev E.A., Leonovich S.N., Milovanov A.F., Piradov K.A., Seilanov L.A. Razrusheniye betona i yego dolgovechnost' [Destruction of concrete and its durability]. Minsk: Tydzen. 1997. 170 p.
33. Leonovich S.N. The non-destructive diagnostic methods of concrete-lined tunnels, *Proc. of World Tunnel Congress*. Vienna, Austria. 1997.
34. Leonovich S.N. The influence of structure of concrete on frost-salt resistance. *Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL)*. Weimar, Germany. 1997. Vol. 2.

35. Leonovich S.N. Calculation of durability of concrete monuments using fracture mechanics. *Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege. Aedificatio Publishers*. 1999. Helt 6.
36. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения. Мн.: Тьдзень 2000. 266 с.
36. Leonovich S.N. Treshchinostoykost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh elementov v terminakh silovykh i energeticheskikh kriteriyev mekhaniki razrusheniya. [Crack resistance and durability of concrete and reinforced concrete elements in terms of force and energy criteria of fracture mechanics]. Minsk: Tydzen. 2000. 266 p.
37. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при карбонизации. *Материалы 6 Межд. научно-методич. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь»*. Минск. 2000.
37. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the durability of reinforced concrete structures during carbonization. *Materials of the 6th International scientific and methodological seminar "Prospects for the development of new technologies in construction and training of engineering personnel in the Republic of Belarus"*. Minsk. 2000. (In Russian).
38. Leonovich S.N. Hypotheses of frost destruction and fracture mechanics of concrete. *Proc. 24 – 2nd Int. RILEM Workshop Frost Resistance of concrete: from nanostructure and Pore Solution to Macroscopic Behaviour and Testing*. Essen, Germany. 2002.
39. Leonovich S.N. Frost-resistance of expansive (self-stressed) concrete (Fracture mechanics Approach). *Prof. of Intern. Conference «Non-traditional Concrete»*. Brno, Czechia. 2002.
40. Leonovich S.N. Fracture mechanism for estimation of freeze – thaw resistance of concrete. *15. Internationale Baustofftagung*. 24–27 September 2003. Weimar.
41. RILEM Technical Committee 200-HTC. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures – modelling and applications. *Mater Struct.* 40, 841–853 (2007). <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9285-2>
42. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Зайцев Ю.В. Опыт использования неразрушающего контроля бетона на объекте монолитного строительства «Минск-Арена» (Республика Беларусь) // *Вестник отделения строительных наук*. 2008. Вып. 12. Белгород. С. 113–124.
42. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Zaitsev Yu.V. About the use of non-destructive testing of concrete at the Minsk-Arena monolithic construction facility (Republic of Belarus). *Vestnik of the Department of Construction Sciences*. 2008. Iss. 12. Belgorod, pp. 113–124. (In Russian).
43. Леонович С.Н. Метод определения состояния арматуры эксплуатируемых железобетонных конструкций // *Строительная наука и техника*. 2008. № 4 (19).
43. Leonovich S.N. Method of determining the state of reinforcement of operated reinforced concrete structures. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2008. No. 4 (19).
44. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность несущих конструкций АЭС с позиции механики разрушения // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2009. № 4. С. 13–15.
44. Leonovich S.N. Fracture resistance and durability of NPP supporting structures from the point of view of fracture mechanics. *Vestnik of the Belarusian National Technical University*. 2009. No. 4, pp. 13–15. (In Russian).
45. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю. Конструкции и изделия железобетонные эксплуатируемые. Метод определения состояния арматуры (потенциометрический метод) // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 8.
45. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu. Manufactured reinforced concrete structures and products. Method for determining the state of reinforcement (potentiometric method). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2009. No. 8. (In Russian).
46. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н., Шнайдер У. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии. Минск: БНТУ, 2011. 382 с.
46. Zaitsev Yu.V., Leonovich S.N., Schneider U. Struktura, prochnost' i mekhanika razrusheniya betonov pri dvukhosnom i trekhosnom szhatii [Structure, strength and fracture mechanics of concrete under biaxial and triaxial compression]. Minsk: BNTU, 2011. 382 p.
47. Леонович С.Н., Прасол А.В. Модели периода иницирования коррозии арматуры // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 74–75.
47. Leonovich S.N., Prasol A.V. Models of the period of reinforcement corrosion initiation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 9, pp. 74–75. (In Russian).
48. Leonovich S.N., Prasol A.V. The impact of hlorides on reinforced concrete structures: modeling of penetration into concrete. *Science and Technology*. 2012. No. 2, p. 34.
49. Рудницкий В.А., Крень А.П., Леонович С.Н. Способ определения класса прочности арматуры

- в железобетоне: пат. 16278 Респ. Беларусь: МПК(2006.01) G 01N 3/40; заявитель Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»; Дата публ.: 2012.08.30
49. Rudnitsky V.A., Kren A.P., Leonovich S.N. Method for determining the strength class of reinforcement in reinforced concrete: Pat. 16278 Rep. Belarus: IPC(2006.01) G 01N 3/40; applicant State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus»; Publication date: 2012.08.30 (In Russian).
 50. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю., Степанова А.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2016. 390 с.
 50. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A., Chernyakevich O.Yu., Stepanova A.V. Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh: monografiya [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects: monograph: in 2 hours. Part 1]. Minsk: BNTU, 2016. 390 p. (In Russian).
 51. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений хабаровского края. *Инновации в бетоневедении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сборник статей по материалам Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И.Н. Ахвердова и С.С. Атаева*. Минск, 9–10 июня 2016. Белорусский национальный технический университет. Ч. 1. С. 243–247.
 51. Shaly E.E., Kim L.V., Leonovich S.N. Probabilistic calculation of the depth and propagation of the carbonization front in the concrete of hydraulic structures of the Khabarovsk Territory. *Innovations in concrete science, construction production and training of engineering personnel: a collection of articles based on the materials of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of I.N. Akhverdov and S.S. Ataev*. Minsk, June 9–10, 2016. Belarusian National Technical University. Part 1, pp. 243–247. (In Russian).
 52. Леонович С.Н. Моделирование капиллярной усадки и трещинообразование бетона в раннем возрасте // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 4. С. 265–277.
 52. Leonovich S.N. Modeling of capillary shrinkage and cracking of concrete at an early age. *Nauka i tekhnika*. 2018. Vol. 17. No. 4, pp. 265–277. (In Russian).
 53. Леонович С.Н. Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 6. С. 502–507.
 53. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the crack resistance of concrete at an early age with capillary shrinkage according to a generalized criterion. *Nauka i tekhnika*. 2018. Vol. 17. No. 6, pp. 502–507. (In Russian).
 54. Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Ким Л.В. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы // *Наука и техника*. 2019. Т. 18. № 4. С. 284–291.
 54. Leonovich S.N., Shalyi E.E., Kim L.V. Reinforced concrete under the influence of carbonization and chloride aggression: a probabilistic model for calculating and predicting service life. *Nauka i tekhnika*. 2019. Vol. 18. No. 4, pp. 284–291. (In Russian).
 55. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Алгоритм прогнозирования срока службы: нагрузка, карбонизация, хлоридная агрессия // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021. № 3 (126). С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-17-20>
 55. Shaly E.E., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Service life prediction algorithm: load, carbonization, chloride aggression. *Vestnik of the Brest State Technical University*. 2021. No. 3 (126), pp. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-17-20>
 56. Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Полонина Е.Н. Долговечность портовых железобетонных конструкций (Дальний Восток и Сахалин): монография. М.: ИНФРА-М. 2022. 315 с.
 56. Leonovich S.N., Shalyi E.E., Polonina E.N. Dolgovechnost' portovykh zhelezobetonnykh konstruksiy (Dal'niy Vostok i Sakhalin): monografiya [Durability of port reinforced concrete structures (Far East and Sakhalin): monograph]. Moscow: INFRA-M. 2022. 315 p.
 57. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Синергетическое влияние наночастиц SiO₂ и углеродных нанотрубок на свойства бетона // *Доклады Национальной Академии Наук Беларуси*. 2022. Т. 66. № 1. С. 109–112.
 57. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N. Synergistic effect of SiO₂ nanoparticles and carbon nanotubes on the properties of concrete. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022. Vol. 66. No. 1, pp. 109–112. (In Russian).

Указатель статей, опубликованных в журнале «БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН» в 2022 г.

InterConPan-2022. Технологический суверенитет для индустриального домостроения в Российской Федерации	№ 4–5. С. 7
Баранник Н.В., Котов С.В., Потапова Е.С., Малахин С.С. Определение химического состава компонентов бетона методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой	№ 1. С. 22
Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Применение золы ТЭС для получения высокопрочных бетонов и снижения расхода цемента	№ 2. С. 3
Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Определение физико-технических характеристик рециклингового щебня из боя керамического кирпича с выявлением перспектив его применения в качестве заполнителей для бетонов	№ 1. С. 36
Болгов А.Н., Сокуров А.З., Невский А.В. О разработке нового свода правил СП 513.1325800 «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования»	№ 4–5. С. 72
Дьячков В.В., Слышенков С.О. Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабба»	№ 6. С. 25
Жоробаев С.С., Кузнецова И.С. Эффективный способ конвективного прогрева монолитных железобетонных конструкций при зимнем бетонировании	№ 3. С. 23
Звездов А.И., Кузеванов Д.В., Волков Ю.С. Профессор А.А. Гвоздев. К 125-летию со дня рождения	№ 4–5. С. 3
Зенин С.А., Болгов А.Н., Сокуров А.З., Кудинов О.В. Прочность на продавливание плоских плит перекрытий в зонах опирания на торцы стен	№ 2. С. 35
Зенин С.А., Кудряков К.Л., Кудинов О.В. Оценка влияния бетонов на заполнителях по ГОСТ 32703–2014 на прочностные и деформативные свойства изгибаемых железобетонных конструкций	№ 1. С. 10
Итоги «Российской строительной недели-2022»	№ 2. С. 8
Кузнецова И.С., В.Г. Рябченкова, Акопян Д.В. Огнестойкость плитных конструкций из фибробетона с добавкой стеклопластиковой макрофибры	№ 2. С. 10
Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Рянзина Ю.С. Новый государственный стандарт на методы испытаний бетонов при температурных воздействиях	№ 6. С. 8
Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В., Журавская А.В., Малюк В.В. Влияние карбонизации на диффузионность хлоридов в бетоне: анализ эксперимента и применение в расчете	№ 3. С. 30
Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В., Малюк В.В., Колодей А.В. Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии: анализ методологии и приложений	№ 6. С. 40
Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Анализ результатов обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин, 1927–2018 гг.)	№ 1. С. 3
Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин)	№ 2. С. 30
Международная научно-практическая конференция BetONconf'2022	№ 6. С. 39
Международный строительный форум и выставка 100+ TechnoBuild	№ 6. С. 38
Мелихов В.И. Институту «ВНИИЖЕЛЕЗОБЕТОН» – 70 лет	№ 3. С. 3

Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели	№ 4–5. С. 66
Резаев Р.О., Дмитриев А.А., Чернявский Д.В. Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Ч. I (Теория)	№ 4–5. С. 25
Резаев Р.О., Дмитриев А.А., Чернявский Д.В. Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Ч. II (Практика)	№ 6. С. 12
Ремнев В.В. Возможности применения грунтобетонов для изготовления фундаментных и дорожных плит	№ 1. С. 17
Ремнев В.В. Эффективный бетон повышенной термостойкости для теплозащитных покрытий стартовых сооружений ракетно-космических комплексов	№ 1. С. 43
Ремнёв В.В. Возможность применения в бетонах строительных материалов повторного использования	№ 3. С. 20
Ремнёв В.В. Возможность применения монолитных пенобетонов в системах аварийного торможения воздушных судов	№ 2. С. 41
Садовская Е.А., Леонович С.Н. Коэффициенты перехода для нанофибробетона	№ 3. С. 41
Садовская Е.А., Леонович С.Н. Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний	№ 4–5. С. 46
Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Методика испытаний буронабивных свай сейсмоакустическим и ультразвуковым методами	№ 2. С. 20
Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А., Miao Jijun Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами	№ 4–5. С. 52
Солнцев В.А., Жадобин П.А., Харитонов Л.П. Исследование водопоглощения бетона, находящегося в воде под давлением, с целью оценки балластирующих свойств бетонного покрытия морских трубопроводов	№ 2. С. 25
Строцкий В.Н., Савин В.И., Полетаев В.В. Деформационные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике	№ 4–5. С. 38
Титов М.Ю., Кузнецова И.С., Бейлина М.И., Шабалин В.А. Применение отходов металлургической промышленности для получения жаростойких бетонов	№ 1. С. 31
Титов М.Ю., Титова Л.А., Бейлина М.И. Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов	№ 6. С. 33
Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания	№ 3. С. 10
Фаликман В.Р., Анцибор А.В. Развитие методов контроля в прочности бетонов и растворов в новом ГОСТ Р 70307–2022 «Бетоны мелкозернистые и растворы строительные. Методы определения прочности в тонкостенных и тонкослойных конструкциях»	№ 6. С. 3
Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Современные методы оценки реакционной способности заполнителей	№ 4–5. С. 15
Черныгов Е.А. Исследование работы с бетоном трехпроводочных канатов	№ 4–5. С. 60
Чествуем ровесника НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, доктора технических наук, профессора Е.А. Чистякова!	№ 3. С. 15

Требования к подготовке научно-технической статьи

Журнальная научно-техническая статья – это сочинение небольшого размера (до пяти журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Жилищное строительство» для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.
2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.
3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.
4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние **2–3 года** в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.
2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние пять лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

Технические требования к предоставляемым материалам

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) предоставляется отдельными файлами и должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Все шрифты в кривых. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 85 мм по ширине, цветовая модель **Grayscale** .

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы», ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»[®] был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

