

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

5
624
2024

BZHB.RU

ИЗДАЕТСЯ С 1955 ГОДА



Учредитель: Ассоциация «Железобетон»
Адрес: Рязанский просп., д. 22, корп. 2,
г. Москва, 109428, Российская Федерация
Издатель: АО «НИЦ «Строительство»
Адрес: 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 1,
г. Москва, 109428, Российская Федерация
Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).

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

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

ISSN 0005-9889 (Print)

ISSN 3034-1302 (Online)

Основан: Институт НИИЖБ Госстроя СССР
и ВНИИЖБ Госстроя СССР
Минстройматериалов СССР

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

5 (624)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, С.И. ИВАНОВ,
А.Н. ИВАЩЕНКО, П.М. ЛЕОНТЬЕВ, А.И. ПАСТУХОВ

**Возведение сталежелезобетонных арок
из высокопрочного бетона с обеспечением
термической трещиностойкости конструкции.**

5

И.В. БАКЛЫКОВ

**Результаты расчетных исследований железобетонных конструкций
с использованием системы внешнего усиления
на основе композитных материалов**

22

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

З.У. БЕППАЕВ, Л.Х. АСТВАЦАТУРОВА, С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ,
С.А. ВЕРНИГОРА, В.В. ЛОПАТИНСКИЙ

**Подбор составов и исследование свойств
мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов
на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка.**

33

Е.М. ВИШТОРСКИЙ, И.В. БЕЛОВ, А.А. ТКАЧЕВ

**Исследование текучести цементного теста
для гидротехнического бетона
при модифицировании суперпластификаторами**

45

Г.С. СЛАВЧЕВА, С.Н. ЛАПЫРЕВ

**Перспективы аддитивных технологий в строительстве:
ожидания и реальность**

53

В.Р. ФАЛИКМАН, Н.С. ДМИТРИЕВ

**Критический обзор стандартизированных методов испытаний
для определения стойкости бетона к карбонизации.**

61

Авторы

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

Редакция

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

Перепечатка

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

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

Адрес редакции: 2-я Институтская ул., д. 6,
корп. 1, г. Москва, 109428, Российская
Федерация

Тел.: +7(495) 602-00-70, доб. 1022/1023

E-mail: bzhb.ru@yandex.ru

http://bzhb.ru

Свободная цена

Founder of the journal:

«Reinforced concrete» Association

Address: 22, building 2, Ryazansky prospect,
Moscow, 109428, Russian Federation**Publisher:** JSC Research Center of Construction**Address:** 6, bld. 1, 2nd Institutskaya str.,
Moscow, 109428, Russian FederationRegistered by the Federal Service for
Supervision of Communications and
Information Technologies and mass
communications (ROSKOMNADZOR).Mass media registration certificate
PI No. FS77-76959 dated October 09, 2019.Mass media registration certificate
EI No. FS77-86552 dated December 26, 2023.

ISSN 0005-9889 (Print)

ISSN 3034-1302 (Online)

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

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

5 (624)

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

S.S. KAPRILOV, A.V. SHEYNFELD, S.I. IVANOV,
A.N. IVASCHENKO, P.M. LEONTIEV, A.I. PASTUKHOV**Construction of steel-reinforced concrete arches
from high-strength concrete with ensuring
of thermal crack resistance of the structure 5**

I.V. BAKLYKOV

**Results of computational studies of reinforced concrete structures using
an external reinforcement system based on composite materials 22**

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Z.U. BEPPAEV, L.H. ASTVATSATUROVA, S.A. KOLODYAZHNY,
S.A. VERNIGORA, V.V. LOPATINSKY**Selection of compositions and investigation
of properties of fine-grained self-compacting concretes based
on secondary (recycling) crushed stone and sand 33**

E.M. VISHTORSKY, I.V. BELOV, A.A. TKACHEV

**Researching of cement paste fluidity for hydraulic concrete
with superplasticizers modification 45**

G.S. SLAVCHEVA, S.N. LAPYREV

**Prospects of additive technologies in construction:
expectations and reality 53**

V.R. FALIKMAN, N.S. DMITRIEV

**Critical review of standardized test methods
for determining the carbonation resistance of concrete 61****The authors**of published materials are responsible for the
accuracy of the submitted information, the
accuracy of the data from the cited literature
and for using in articles data which are not
open to the public.**The Editorial Staff**can publish the articles as a matter
for discussion, not sharing the point of view
of the author.**Reprinting**and reproduction of articles, promotional and
illustrative materials are possible only with the
written permission of the editor-in-chief.**The Editorial Staff is not responsible
for the content of advertisements
and announcements.****Editorial address:** 6, bld. 1, 2nd Institutskaya
str., Moscow, 109428, Russian Federation**Tel.:** +7(495) 602-00-70, add. 1022/1023**E-mail:** bzhb.ru@yandex.ru**http://bzhb.ru**

Free price

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ТИХОНОВ И.Н., д-р техн. наук, профессор, заведующий центром № 21, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения;

2.1.5 – Строительные материалы и изделия.

Editorial team

ZVEZDOV A.I., Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director General for Research, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TIKHONOV I.N., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Center No. 21, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

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

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

FALIKMAN V.R., Cand. Sci. (Chemical), Doctor of Materials Science, Head of the Center for Scientific and Technical Assistance at Complex facilities Construction, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction (Moscow, Russian Federation)

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

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

2.1.1– Building constructions, buildings and structures;

2.1.5 – Building materials and products.

**С.С. КАПРИЕЛОВ^{1,2}, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД^{1,2,✉}, С.И. ИВАНОВ¹,
А.Н. ИВАЩЕНКО³, П.М. ЛЕОНТЬЕВ⁴, А.И. ПАСТУХОВ¹**

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

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

³ ООО «Инфорспроект», ул. Ленинская слобода, д. 19, г. Москва, 115280, Российская Федерация

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

ВОЗВЕДЕНИЕ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация

Введение. Представлена конструкция и технология непрерывного бетонирования двух массивных наклоненных друг к другу сталежелезобетонных арок (высотой 19 м, пролетом 47 и 81 м) объемом 184 и 283 м³ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла стальная оболочка диаметром 2 и 2,5 м, с проектным классом бетона В70.

Целью комплекса конструкторско-технологических работ являлись расчет и проектирование арок, включая расчет термонапряженного состояния массивных конструкций в начальный период после бетонирования, определение рецептурных и температурно-временных параметров технологии производства бетонных работ и контроля качества бетона.

Материалы и методы. Обеспечение жесткости конструкции осуществлено за счет сталежелезобетонного сечения арок, имеющего в сравнении с металлической конструкцией повышенную до 5,5 раза изгибную и до 3,5 раза осевую жесткости. Особенности технологии возведения и контроля качества бетона арок заключались в следующем: использовалась самоуплотняющаяся бетонная смесь с добавками органоминерального модификатора марки МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения; обеспечивался беспрепятственный теплообмен конструкций с окружающей средой при температуре воздуха 28–33 °С; осуществлялся контроль прочности бетона в конструкции по контрольным образцам, изготовленным из проб смеси, отобранных при бетонировании конструкций.

Результаты. Фактические значения прочности бетона и температурных параметров выдерживания конструкций арок полностью соответствуют проектным требованиям и значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкций, в том числе: прочность бетона на сжатие в конструкциях в проектном возрасте составляет 108,1 и 111,3 МПа, соответствует фактическим классам по прочности на сжатие В_ф94 и В_ф97 и превышает требования проекта; максимальная температура бетона в ядре конструкций составила 57–68 °С; средняя скорость остывания конструкций не превышала 5 °С/сут; перепад температуры по длине конструкций составил 0,6–0,8 °С/м; разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки, а также поверхностью оболочки и окружающей средой не превышала 20 °С.

Выводы. Предложенные подходы, учитывающие особенности расчета, конструирования, технологии возведения и контроля качества бетона, могут использоваться при строительстве технически сложных сталежелезобетонных конструкций в несъемной опалубке.

Ключевые слова: арка, высокопрочный бетон, напорное бетонирование, несъемная опалубка, самоуплотняющийся бетон, сталежелезобетонная конструкция, термонапряженное состояние, технология возведения

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И., Иващенко А.Н., Леонтьев П.М., Пастухов

хов А.И. Возведение сталежелезобетонных арок из высокопрочного бетона с обеспечением термической трещиностойкости конструкции // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 5–21. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-5-21](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-5-21). EDN: IMXZYA

Вклад авторов

Каприелов С.С. – один из разработчиков технологии, осуществлял руководство научно-техническим сопровождением бетонных работ на объекте.

Шейнфельд А.В. – один из разработчиков технологии, контролировал научно-техническое сопровождение бетонных работ на объекте.

Иванов С.И., Пастухов А.И. – авторы расчета термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок.

Иващенко А.Н. – один из авторов проекта сталежелезобетонных конструкций арок.

Леонтьев П.М. – осуществлял оптимизацию, внедрение и контроль технологии бетонных работ на объекте.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.11.2024

Поступила после рецензирования 08.12.2024

Принята к публикации 12.12.2024

**S.S. KAPRIELOV^{1,2}, A.V. SHEYNFELD^{1,2,✉}, S.I. IVANOV¹,
A.N. IVASCHENKO³, P.M. LEONTIEV⁴, A.I. PASTUKHOV¹**

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

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

³ LLC “Inforsproekt”, Leninskaya Sloboda str., 19, Moscow, 115280, Russian Federation

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

CONSTRUCTION OF STEEL—REINFORCED CONCRETE ARCHES FROM HIGH—STRENGTH CONCRETE WITH ENSURING OF THERMAL CRACK RESISTANCE OF THE STRUCTURE

Abstract

Introduction. The design and technology of continuous concreting of two massive steel-reinforced concrete arches inclined to each other (height 19 m, span 47 and 81 m) with a volume of 184 and 283 m³ in a fixed formwork, the function of which was performed by a steel shell with a diameter of 2 and 2.5 m, with a design class of concrete B70 are presented.

The aim of the complex of design and technological works was the calculation and design of arches, including the

calculation of the thermally stressed state of massive structures in the initial period after concreting, and the determination of prescription and temperature-time parameters of concrete production technology and concrete quality control.

Materials and methods. The rigidity of the structure is ensured due to the steel-reinforced concrete section of the arches, which, in comparison with the metal structure, has increased bending stiffness up to 5.5 times and axial stiffness – up to 3.5 times. The features of the technology

for the construction and quality control of concrete arches were as follows: a self-compacting concrete mixture with additives of an organomineral modifier of the MB 2-30C brand, a superplasticizer and a hardening retarder was used; unhindered heat exchange of structures with the environment at the air temperature of 28–33 °C was ensured; the strength of concrete in the structure was monitored according to control samples made from samples of the mixture taken during concreting of structures.

Results. The actual values of concrete strength and temperature parameters of arch structures fully correspond to the design requirements and values determined by the calculation of the thermally stressed state of structures, including: the compressive strength of concrete in structures at the design age is 108.1 and 111.3 MPa, corresponds to the actual classes of compressive strength B₉₄ and B₉₇ and exceeds the requirements of the project; the maximum temperature of concrete in the core of structures was 57–68 °C; the average cooling rate of structures did not exceed 5 °C/day; the temperature difference along the length of the structures was 0.6–0.8 °C/m; the temperature difference between the core and the surface of the steel shell, as well as the surface of the shell and the environment did not exceed 20 °C.

Conclusions. The proposed approaches, taking into account the specifics of calculation, design, technology of construction and quality control of concrete, can be used in the construction of technically complex steel-reinforced concrete structures in fixed formwork.

Keywords: arch, high-strength concrete, pressure concreting, non-removable formwork, self-compacting concrete, steel-reinforced concrete construction, thermally stressed condition, construction technology

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I., Ivaschenko A.N., Leontiev P.M., Pastukhov A.I. Construction of steel-reinforced concrete arches from high-strength concrete with ensuring of thermal crack resistance of the structure. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 5–21. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-5-21](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-5-21). EDN: IMXZYA

Authors contribution statement

Kaprielov S.S. – one of the developers of the technology, he supervised the scientific and technical support of concrete works at the facility.

Sheinfeld A.V. – one of the developers of the technology, he supervised the scientific and technical support of concrete works at the facility.

Ivanov S.I., Pastukhov A.I. – authors of the calculation of the thermal stress state of steel-reinforced concrete structures of arches.

Ivashchenko A.N. – one of the authors of the project of steel-reinforced concrete structures of arches.

Leontiev P.M. – carried out optimization, implementation and control of concrete work technology at the facility.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.11.2024

Revised 08.12.2024

Accepted 12.12.2024

Введение

Архитектурные особенности технически сложных и уникальных сооружений требуют применения новых современных подходов к строительству железобетонных и сталежелезобетонных конструкций, которые заключаются в использовании нестандартных конструктивных решений и методов расчета, новых высококачественных материалов и передовых технологий [1–8].

Примером современного подхода к строительству таких сооружений явилось возведение двух сталежелезобетонных конструкций арок АР3 и АР4 с затяжками, наклоненных друг к другу и объединенных между собой в верхней части системой связей, являющихся основными несущими конструкциями, на которые крепятся колонны многоуровневого перехода на объекте «Технопарк ПАО «Сбербанк» в инновационном центре «Сколково».

Возведению арок предшествовало решение следующих задач:

- расчет и проектирование конструкции;
- расчет термонапряженного состояния конструкции в начальный период после бетонирования;
- определение рецептурных и температурно-временных параметров технологии с разработкой регламента производства бетонных работ и контроля качества бетона.

Особенности конструкции, технологии возведения и контроля качества

Особенности конструкции арок

Геометрия арок подчинена архитектурной концепции всего объекта Технопарка, выполненного британской архитектурной и дизайнерской фирмой Zaha Hadid Architects (ZHA). Форма здания имеет бионический дизайн. Внешняя часть строения представлена плавными обтекаемыми формами, выполненными из прозрачного стекла.

Эти факторы повлияли на конструктивные решения несущих и ограждающих конструкций, в которых практически нет ни одного повторяющегося элемента, в связи с чем арки многоуровневого перехода имеют не самое экономичное конструктивное решение. Так, например, арки не являются симметричными и имеют разные пролеты. Вследствие несимметричности арочных сводов при работе на вертикальную нагрузку в них возникают неравномерные прогибы под малой и большой арками. Соответственно, прогибы получают и надарочные конструкции. Для компенсации неравномерности прогибов на вышележащих конструкциях предусмотрен строительный подъем.

В таких обстоятельствах требовалось обеспечить жесткость конструкций и сооружения в целом. Это могло быть сделано за счет применения в качестве материала сталежелезобетона, имеющего, в сравнении с металлической конструкцией, повышенную до 5,5 раза изгибную и до 3,5 раза осевую жесткости.

При проектировании арок учтено изменение расчетной схемы конструкций в процессе возведения и монтажа. На начальном этапе на вспомогательных подмостях возводятся только металлоконструкции. После монтажа всех элементов арок, связей и затяжек происходит раскружаливание. В этот момент и до окончания бетонирования арок все нагрузки воспринимаются металлокаркасом. После набора прочности бетона в расчетной схеме учитывались жесткость и прочность сталежелезобетонной конструкции.

На основании изложенных выше данных были спроектированы сталежелезобетонные конструкции двух арок АР3 пролетом 47 м, высотой 19,005 м и АР4 пролетом 81 м, высотой 19,060 м, которые опираются на фундаменты через шаровые сегментные опорные части мостового типа (ШСОЧ) с антифрикционными полимерными прокладками. Общий вид конструкций арок приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид конструкций арок
Fig. 1. General view of the arch structures

Оболочка конструкций арок выполнена из стальной трубы круглого сечения (диаметром 2,02 м, толщиной стенки 32 мм – для АР3, диаметром 2,52 и 2,02 м и толщиной стенки 25 мм – для АР4) с внутренними стаб-болтами, усиленной продольными и поперечными ребрами. Армирование сталежелезобетонных конструкций арок АР3 и АР4 предусматривается арматурой класса А500С диаметром 36 мм (продольной) и 20 мм (поперечной) с шагом 175 и 350 мм. Соединение арматуры осуществляется внахлест. Средний

удельный расход арматуры в конструкциях арок АР3 и АР4 составляет 181 кг/м³. Общий объем бетона в конструкции арок составляет 467 м³, в том числе для арок АР3 – 184 м³, АР4 – 283 м³. Основные проектные характеристики бетона в конструкции арок: класс по прочности на сжатие В70, марка по морозостойкости F₂₀₀, марка по водонепроницаемости W6.

План, сечения и армирование сталежелезобетонных конструкций двух арок АР3 и АР4 в осях 12-20/А-В представлены на рис. 2 и 3.

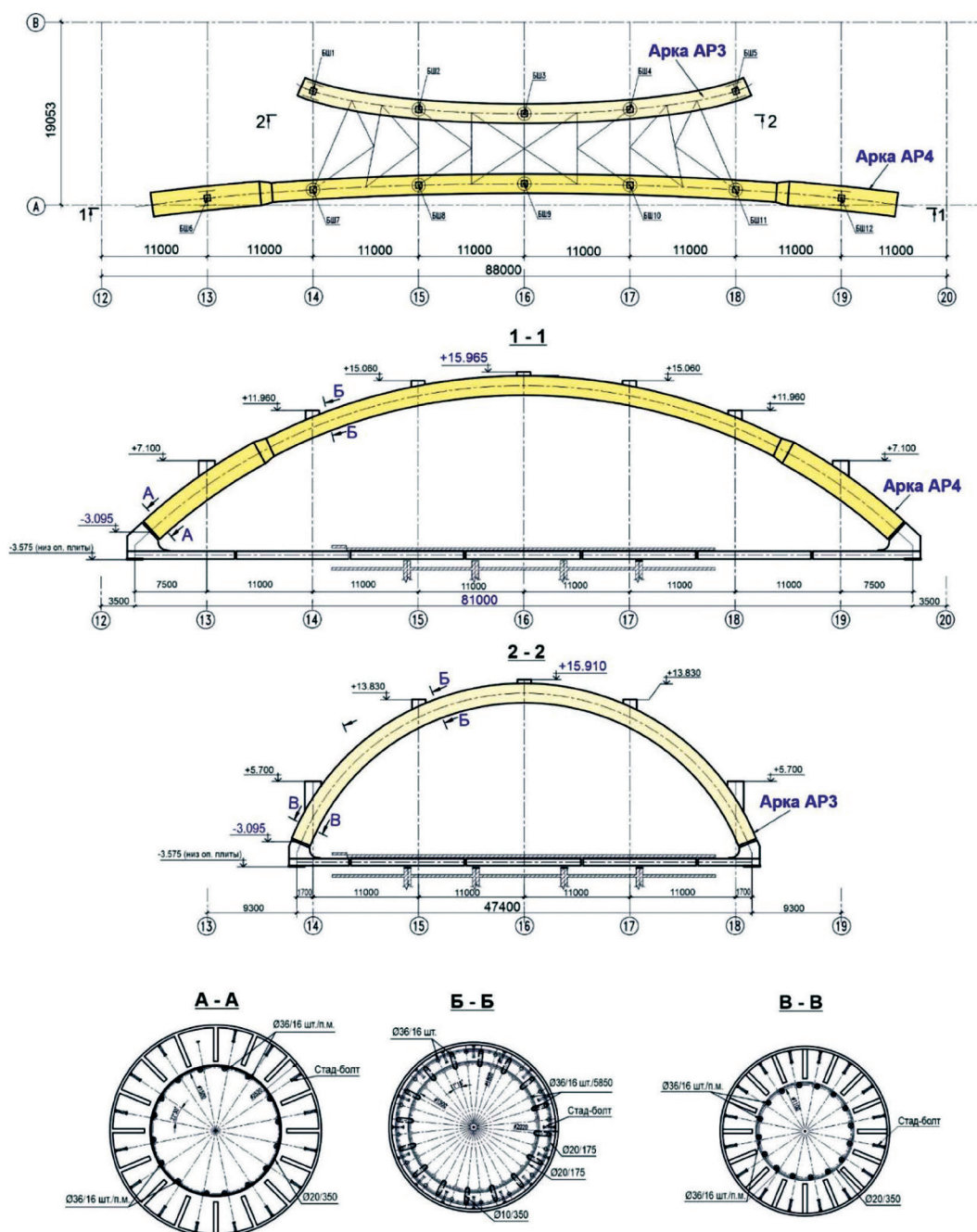
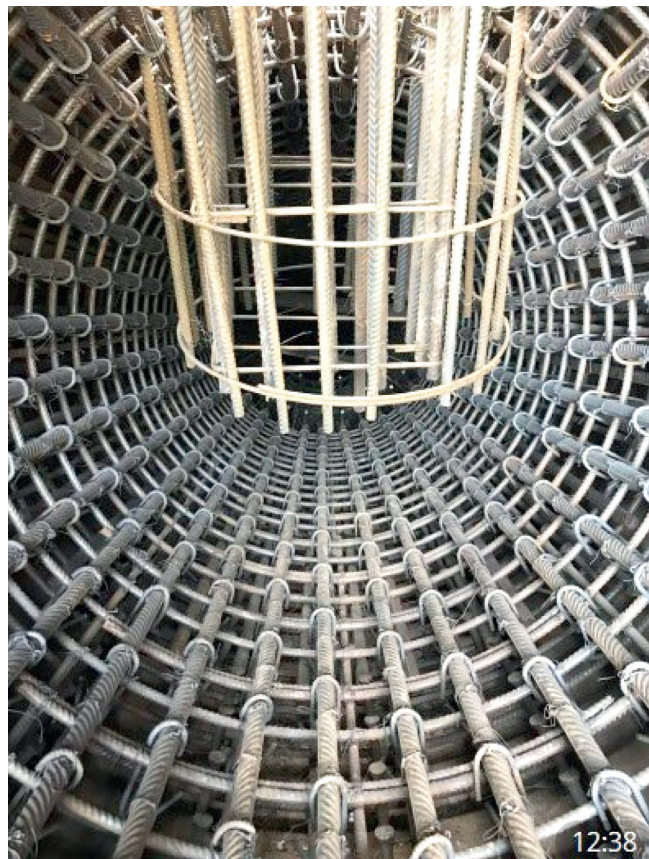


Рис. 2. План и сечения сталежелезобетонных конструкций арок
Fig. 2. Plan and sections of steel-reinforced concrete structures of arches



a (a)



б (b)

Рис. 3. Металлическая оболочка (а) и армирование (б) сталежелезобетонных конструкций арок
Fig. 3. Metal shell (a) and reinforcement (b) of steel-reinforced concrete structures of arches

Особенности технологии возведения

Технология возведения сталежелезобетонных конструкций арок с модулем поверхности $1,98 \text{ м}^2$ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла металлическая оболочка, с учетом высокой прочности бетона и отсутствия доступа к внутреннему пространству, решала три взаимосвязанные задачи:

- обеспечение высокой скорости и равномерности укладки бетонной смеси во внутреннее пространство арок с учетом предотвращения образования рабочих швов бетонирования и деформации металлических оболочек;
- обеспечение сплошности бетона сталежелезобетонных конструкций арок и проектных характеристик бетона в возрасте 56 суток;
- обеспечение термической трещиностойкости конструкций при перепадах и градиентах температур, вызванных экзотермией бетона.

Технология бетонирования с регламентированными рецептурными и температурно-временными параметрами основывалась на принципах, которые были отработаны ранее при бетонировании массивных конструкций с аналогичным модулем поверхности менее 2 м^2 [9–11].

Применялась самоуплотняющаяся бетонная смесь марки БСТ В70 ($R_T \geq 87,5 \text{ МПа}$) РК2 ($R_K = (70 \pm 5) \text{ см}$) F1200 W6 ГОСТ Р 59714-2021 [12] с минимизированным для обеспечения подвижности смеси и класса бетона расходом цемента.

Состав бетонной смеси должен обеспечить сохранение подвижности в течение 4 часов с учетом длительности ее транспортировки и укладки в конструкции при высоких температурах смеси ($25\text{--}29 \text{ }^\circ\text{C}$) и окружающей среды ($27\text{--}33 \text{ }^\circ\text{C}$).

Контроль качества поступающей на строительную площадку бетонной смеси должен выполняться из каждого автобетоносмесителя по ГОСТ Р 59715-2022 [13].

Для обеспечения равномерной нагрузки на стальную оболочку арок подача самоуплотняющейся бетонной смеси в каждую конструкцию должна осуществляться двумя автобетононасосами с двух концов одновременно, непрерывно и последовательно в закрепленные за ними места. Схема и порядок укладки бетонной смеси в конструкцию арок представлены на рис. 4.

Контроль за укладкой самоуплотняющейся бетонной смеси во внутреннее пространство стальных оболочек должен осуществляться через отверстия диа-

метром 30 мм в верхней части сечения арок (рис. 4), которые после вытекания из них бетонной смеси заделываются с помощью вкручивания в них металлических болтов с прокладкой и термопарой.

Выдерживание бетона и уход за конструкциями должны осуществляться на основании результатов контроля температуры бетона в разных сечениях по длине арок. Температура бетона определяется в 8-ми сечениях арки АРЗ и 14-ти сечениях арки АР4, расположенных равномерно по длине конструкций – в ядре с помощью хромель-копелевых термопар и прибора «Терем» и на поверхности стальной оболочки с помощью пирометра. Расположение точек контроля температуры бетона в конструкции арок представлено на рис. 4.

Схема ухода за бетоном после бетонирования, принятая на основании расчета термонапряженного состояния конструкций, состоит в следующем. На стадии повышения температуры стальная обо-

лочка конструкции арок не утепляется. Это обеспечивает естественный теплообмен конструкции с окружающей средой и тем самым снижает максимальную температуру в ядре конструкции. На стадии охлаждения конструкции скорость охлаждения бетона в ядре конструкций должна быть не более 5 °С в сутки.

Контроль прочности бетона на сжатие в конструкции арок, в связи с отсутствием доступа, должен осуществляться в возрасте 7, 28 и 56 суток в соответствии с п. 8.1.5 ГОСТ 18105-2018 [14] и п. 4.7 ГОСТ 31914-2012 [15] по контрольным образцам, изготовленным из проб отобранных при бетонировании конструкций в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [16] и ГОСТ 31914-2012 [15].

Оценка прочности бетона арок проводится в проектном возрасте 56 суток в соответствии с ГОСТами [14, 15] путем сравнения проектного (B_{70}) и фактического ($B_{ф}$) классов бетона в конструкции.

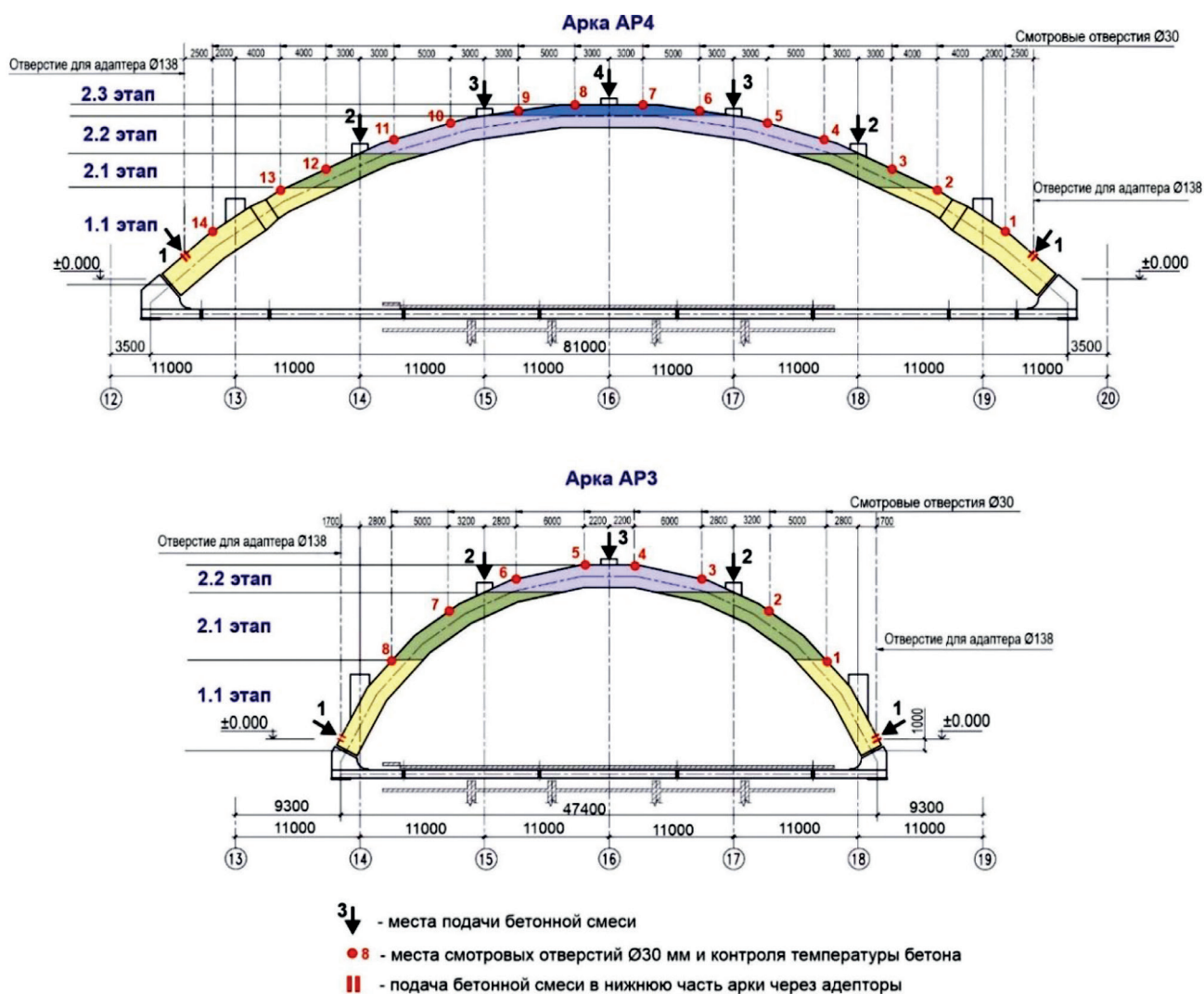


Рис. 4. Схема укладки бетонной смеси по сечению конструкции арок
Fig. 4. Laying of concrete mix along the arch structure section

Фактический класс бетона по прочности на сжатие в конструкции арок должен определяться с учетом характеристик однородности бетона по прочности в соответствии с п. 6.1.1.12 [15]. При этом коэффициент требуемой прочности определяется по [14, табл. А1] в зависимости от фактического коэффициента вариации прочности бетона, но принимается не менее 1,14.

Особенности расчета термонапряженного состояния

Расчет термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок выполнялся по применяемой в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева методике [17] с учетом рекомендаций [18] и возможностей современных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов. Расчет выполнялся по программе Atena [19] в два этапа: сначала определялась кинетика изменения температуры конструкции вследствие экзотермии бетона, а затем на основании полученных данных выполнялся расчет напряжений в бетоне на ранних стадиях твердения.

Основные положения расчета термонапряженного состояния сталежелезобетонных арок были приняты по результатам опубликованных ранее исследований [9, 10, 20–23] с учетом солнечного излучения (100 Вт/м^2), экзотермического процесса твердения бетона и снижения тепловыделения за счет комплексного использования органоминерального модификатора МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения (рис. 5).

По результатам расчета на первом этапе определялась кинетика изменения температуры по сечению сталежелезобетонных арок (рис. 6) в ядре конструкции, на внешней поверхности стальной оболочки и на внутренней границе стальной оболочки и бетона при нахождении конструкции в естественных условиях при температуре окружающего воздуха $28\text{--}33^\circ\text{C}$.

Данные, представленные на рис. 6, показывают, что полученные расчетные температурные параметры твердения бетона без выполнения специальных мероприятий по уходу за конструкциями в целом соответствуют общепринятым ограничениям [24–26]:

- максимальная температура бетона в ядре конструкции не превышает 70°C ;
- средняя скорость остывания бетона в ядре конструкции составляет 5°C/сут ;
- разность температуры между ядром и внутренней поверхностью стальной оболочки не превышает 20°C ;
- разность температуры между внешней поверхностью оболочки и окружающей средой не превышает 20°C .

На втором этапе по результатам расчета термонапряженного состояния фрагмента арки АР4 с учетом кинетики набора прочности бетона, ползучести и релаксации напряжений выявлялись участки потенциально возможного образования термических трещин в бетоне конструкций арок и определялись ширина их раскрытия и глубина распространения.

По данным расчета, представленным на рис. 7, следует, что при нахождении конструкции в есте-

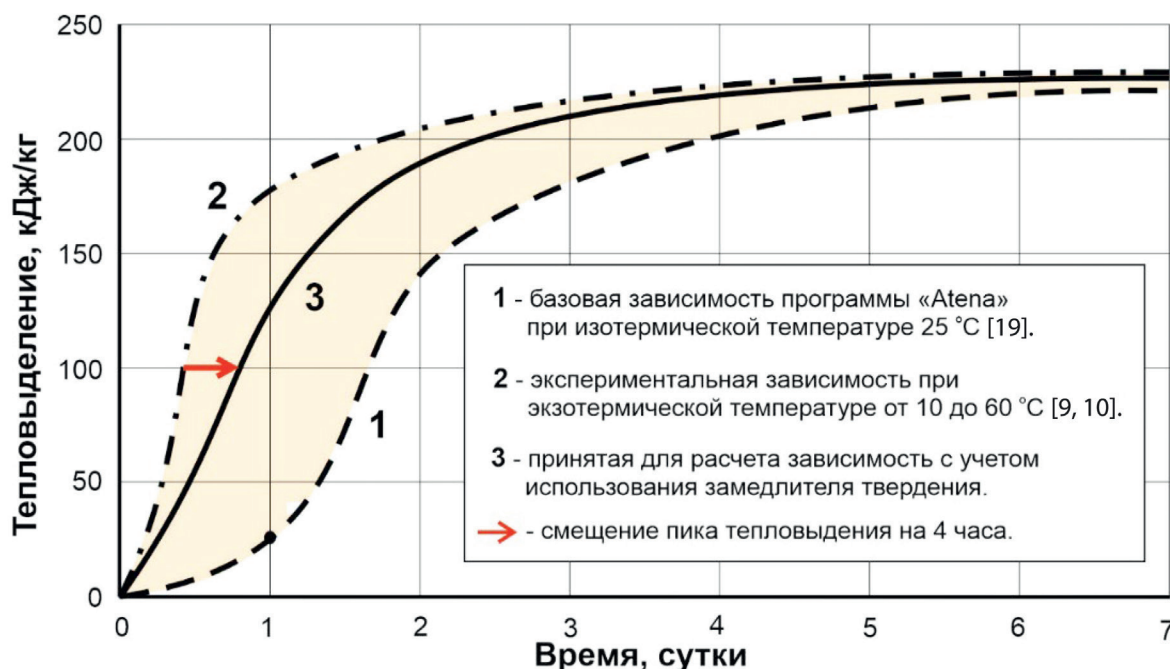


Рис. 5. Кинетика тепловыделения бетона на ранних сроках твердения
Fig. 5. Kinetics of heat release of concrete in the early stages of hardening

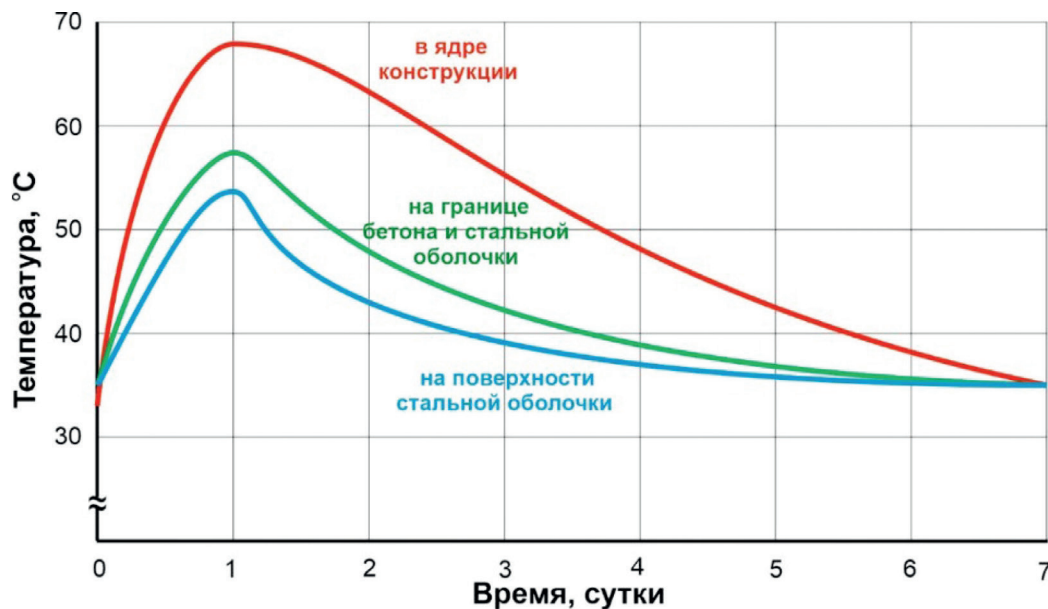


Рис. 6. Кинетика изменения расчетной температуры по сечению сталежелезобетонной арки AP4
Fig. 6. Kinetics of the calculated temperature change along the section of the AR4 steel-reinforced concrete arch

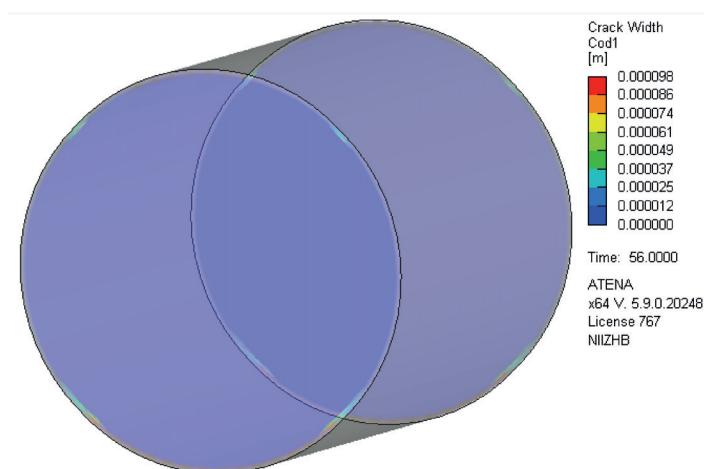


Рис. 7. Изополя участков потенциально возможного образования трещин и ширины их раскрытия в возрасте от 3 до 7 суток после бетонирования

Fig. 7. Isofields of areas of potentially possible crack formation and the width of their opening at the age of 3 to 7 days after concreting

ственных условиях бетон и стальная оболочка при температуре окружающего воздуха 28–33 °С имеют одинаковые деформации, образование трещин в бетоне отсутствует, что обеспечивает термическую трещиностойкость конструкции.

Результаты

Входной контроль качества бетонной смеси

Бетонная смесь производилась и поставлялась заводом ООО «Эркон». Номинальный состав бетонной смеси:

– портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н по ГОСТ Р 31108-2020 [27] – 470 кг/м³;

– органо-минеральный модификатор МБ2-30СА-I-4 по ГОСТ Р 56178-2014 [28] – 110 кг/м³;

– песок с $M_k = 2,4$ по ГОСТ 8736-2014 [29] – 810 кг/м³;

– щебень гранитный фр. 5–10 мм по ГОСТ 8267-93 [30] – 870 кг/м³;

– суперпластификатор Sika ViscoCrete E-55 40 %, раствор плотностью 1,083 г/см³ по ГОСТ 24211-2008 [31] – 6,96 кг/м³;

– замедлитель Sika Retarder-12RU, раствор плотностью 1,15 г/см³ по ГОСТ 24211-2008 [31] – 3,8 кг/м³;

– вода по ГОСТ 23732-2011 [32] – 157 кг/м³.

Входной контроль показал, что технологические характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси

в целом соответствовали регламентированным требованиям (расплыв нормального конуса – 65–75 см, средняя плотность – 2390–2440 кг/м³, расслоение отсутствовало). Фактический состав бетонных смесей, доставленных на строительную площадку, с учетом допустимых отклонений по [12], соответствовал номинальному. Это свидетельствует о том, что самоуплотняющиеся бетонные смеси, уложенные в конструкции арок по технологическим критериям, соответствовали марке БСТ В70 ($R_t \geq 87,5$ МПа) РК2 (РК = (70 ± 5) см) F₂₀₀ W6 по ГОСТ Р 59714-2021 [12].

Укладка бетонной смеси в конструкции

Бетонирование арок осуществлялось ООО «МОСТ» в течение 4–6 часов (в зависимости от объема бетона) со скоростью около 50 м³/час.

Укладка самоуплотняющейся бетонной смеси в конструкцию каждой из арок осуществлялась равными объемами в два этапа. На первом этапе бетонная смесь подавалась в нижние опорные части арок на высоту 8–9 м под давлением методом «снизу вверх» через специальные адаптеры, сваренные в оболочку конструкции (рис. 4 и 8). На втором этапе бетонная смесь подавалась в центральную часть арок методом «сверху вниз» поочередно через доступные окна в опорах в верхней части оболочки конструкции и заполняло пространство под действием силы тяжести (рис. 4 и 9).



Рис. 8. Специальный адаптер, приваренный к оболочке конструкции для напорного бетонирования опорных частей арок методом «снизу вверх»

Fig. 8. A special adapter welded to the shell of the structure for pressure concreting of the supporting parts of the arches using the bottom-up method



Рис. 9. Процесс бетонирования центральной части сталежелезобетонной конструкции арки методом «сверху вниз»

Fig. 9. The process of concreting of the central part of the steel-reinforced concrete arch structure using the top-down method

Выдерживание бетона в конструкциях

В течение 1–1,5 суток на стадии повышения температуры стальная оболочка конструкции арок не утеплялась. На стадии охлаждения конструкции в связи с высокой температурой окружающего воздуха (от 21 до 33 °С), скорость охлаждения бетона в ядре конструкций составляла не более 5 °С в сутки, поэтому специальных мероприятий по регулированию скорости остывания бетона, т. е. утепления арок, не производилось.

Кинетика изменения температуры в сечении с максимальным значением температуры (68 °С) в ядре конструкции арки АР4 (точка 11, рис. 4) в возрасте до 7 суток после бетонирования представлена на рис. 10.

Из приведенных данных видно, что фактические значения температурных параметров выдерживания бетона арок соответствуют регламентированным значениям, основанным на расчете термонапряженного состояния конструкции (рис. 6 и 10), в том числе:

- максимальная температура бетона в ядре конструкции составила 57–68 °С;
- средняя скорость остывания конструкции не превышала 5 °С/сут;
- перепад температуры по длине конструкции составлял 0,6–0,8 °С/м;
- разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки не превышала 18 °С;

– разность температуры между поверхностью оболочки и окружающим воздухом не превышала 20 °С.

Заметим, что в целом температурные параметры выдерживания конструкции сопоставимы с параметрами выдерживания фундаментных плит [9, 10], что свидетельствует об обоснованности выбранного подхода к бетонированию массивных конструкций.

Контроль качества бетона

Прочность бетона определялась по результатам испытания серий контрольных образцов-кубов размерами 100 × 100 × 100 мм, которые твердели в воде на строительной площадке, в возрасте 7, 28 и 56 суток, в том числе:

- в возрасте 7 суток – для арки АР3 по испытаниям 7-ми серий (14 образцов), а для арки АР4 по испытаниям 9-ти серий (18 образцов);
- в возрасте 28 суток – для арки АР3 по испытаниям 11-ти серий (22 образца), а для арки АР4 по испытаниям 16-ти серий (32 образца);
- в возрасте 56 суток (из каждого автобетоносмесителя) – для арки АР3 по испытаниям 21-й серии (42 образца), а для арки АР4 по испытаниям 31-й серии (62 образца).

Обобщенные результаты определения прочности и оценки фактического класса бетона в сталежелезобетонных конструкциях арок АР3 и АР4 приведены в табл. 1.

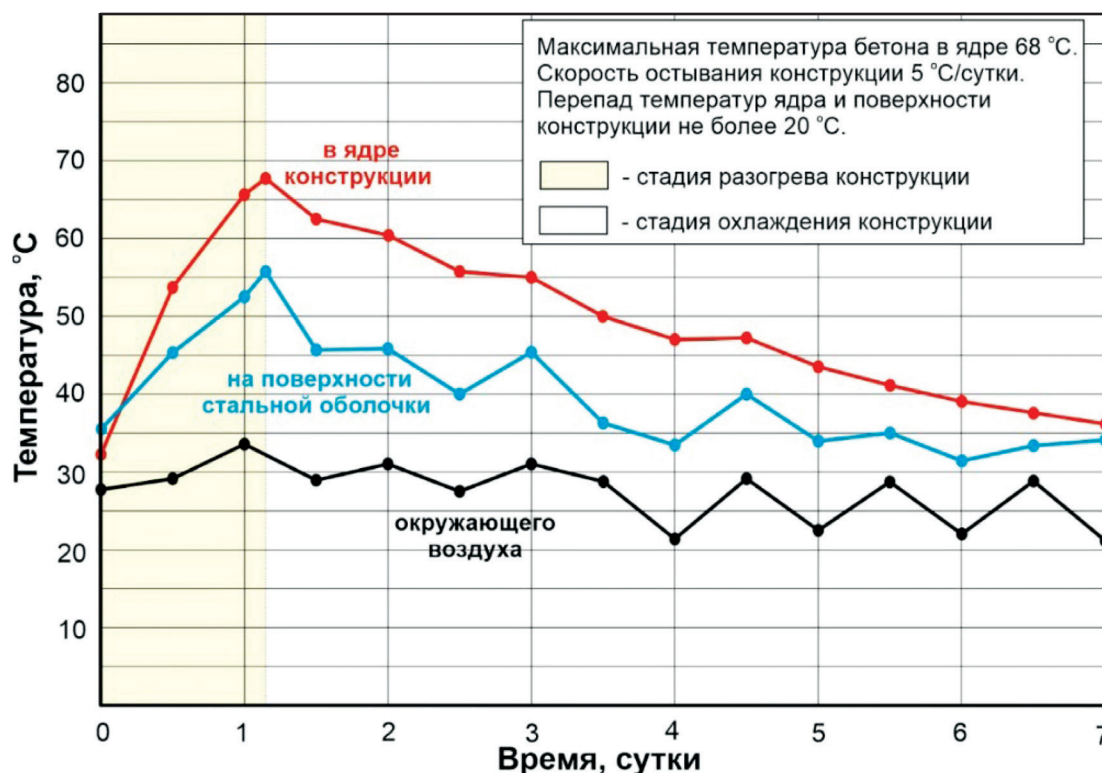


Рис. 10. Кинетика изменения температуры бетона в сечении сталежелезобетонной конструкции арки АР4 (точка 11, рис. 4)
Fig. 10. Kinetics of concrete temperature changes in the section of the steel-reinforced concrete structure of the АР4 arch (point 11, Fig. 4)

Таблица 1

Table 1

**Прочность и фактический класс бетона в сталежелезобетонных конструкциях арок AP3 и AP4
по результатам испытаний контрольных образцов**

**Strength and actual class of concrete in steel-reinforced concrete structures of AR3 and AR4
arches according to the test of control samples results**

Номер серии	Прочность бетона в серии контрольных образцов в возрасте ..., суток			Статистическая оценка прочности бетона в конструкции в возрасте 56 суток			
	7	28	56	R_m , МПа	S_m , МПа	V , %	B_{ϕ} , МПа
Арка АР3							
1	85,3	94,9	101,7	108,1	4,44	4,1	B_{ϕ} 94
2	—	—	99,9				
3	—	102,6	110,0				
4	—	—	105,8				
5	80,6	93,5	103,3				
6	—	—	103,1				
7	—	97,8	104,1				
8	—	—	107,0				
9	—	101,8	105,6				
10	—	—	104,2				
11	92,9	108,4	112,0				
12	—	—	110,5				
13	99,3	107,3	113,2				
14	—	—	114,9				
15	—	—	113,8				
16	90,3	100,9	106,0				
17	—	—	110,9				
18	—	105,8	111,5				
19	—	—	113,5				
20	89,4	99,4	106,9				
21	91,0	103,9	111,2				
Арка АР4							
1	97,5	103,3	109,6	111,3	4,8	4,3	B_{ϕ} 97
2	—	—	123,8				
3	—	111,0	118,4				
4	—	—	109,8				
5	94,7	108,4	115,6				
6	—	—	110,8				
7	85,9	102,4	110,0				
8	—	—	113,5				
9	—	109,0	113,6				

Продолжение таблицы 1

Номер серии	Прочность бетона в серии контрольных образцов в возрасте ..., суток			Статистическая оценка прочности бетона в конструкции в возрасте 56 суток			
	7	28	56	R_m , МПа	S_m , МПа	V , %	B_{ϕ} , МПа
10	–	–	105,3	111,3	4,8	4,3	$B_{\phi 97}$
11	94,0	101,8	107,6				
12	–	–	108,8				
13	–	107,2	112,2				
14	–	–	112,4				
15	94,7	101,6	109,1				
16	–	–	102,7				
17	–	105,4	110,7				
18	87,4	104,6	110,5				
19	–	–	106,5				
20	–	108,9	116,0				
21	–	–	115,6				
22	91,8	111,0	120,0				
23	–	–	112,5				
24	–	107,2	111,7				
25	–	–	110,2				
26	–	–	109,1				
27	91,2	100,0	106,1				
28	–	–	107,8				
29	–	95,6	101,1				
30	96,0	103,8	111,6				
31	–	–	116,2				

Примечания:

Номер серии контрольных образцов соответствует порядковому номеру автобетоносмесителей, доставлявших смесь на строительную площадку;

R_m – средняя прочность бетона;

S_m – среднеквадратическое отклонение прочности бетона;

V – фактический коэффициент вариации прочности бетона;

K_T – коэффициент требуемой прочности, принят 1,14 в соответствии с п. 6.1.1.12 [15];

B_{ϕ} – фактический класс бетона по прочности на сжатие.

Прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР3 находится в диапазоне: в промежуточном возрасте 7 суток – от 80,6 до 99,3 МПа; в промежуточном возрасте 28 суток – от 93,5 до 108,4 МПа; в проектном возрасте 56 суток – от 99,9 до 114,9 МПа. Средняя прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР3 в проектном возрасте 56 суток составляет 108,1 МПа, что при фактическом коэффициенте вариации $V = 4,1 \%$ ($K_T = 1,14$) соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi 94}$.

Прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР4 находится в диапазоне: в промежуточном возрасте 7 суток – от 85,9 до 97,5 МПа; в промежуточном возрасте 28 суток – от 95,6 до 111,0 МПа; в проектном возрасте 56 суток – от 101,1 до 123,8 МПа. Средняя прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР4 в проектном возрасте 56 суток составляет 111,3 МПа, что при фактическом коэффициенте вариации $V = 4,3 \%$ ($K_T = 1,14$) соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi 97}$.

Выводы

1. Спроектирована конструкция и реализована на практике технология непрерывного бетонирования двух массивных сталежелезобетонных арок (высотой 19 м, пролетом 47 и 81 м) объемом 184 и 283 м³ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла стальная оболочка диаметром 2 и 2,5 м, с проектным классом бетона В70. Нестандартное конструктивное решение наклоненных друг к другу двух арок с элементами связи под различными углами подчинено архитектурной концепции всего объекта Технопарка, выполненного архитектурной и дизайнерской фирмой Zaha Hadid Architects. Технология производства бетонных работ обеспечила заданные проектом характеристики бетона и термическую трещиностойкость конструкции.

2. Расчет термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок по программе Atena с учетом солнечного излучения, фактических изменений скорости гидратации и тепловыделения при экзотермическом процессе разогрева бетона по сечению конструкции позволил спрогнозировать основные параметры ухода за конструкциями, которые использовались при разработке технологии производства работ.

3. Особенности технологии возведения и контроля качества бетона сталежелезобетонных арок, относящихся к категории массивных конструкций, являлись:

- использование самоуплотняющихся бетонных смесей с добавками органоминерального модификатора марки МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения;

- обеспечение беспрепятственного теплообмена конструкций с окружающей средой при температуре воздуха 28–33 °С;

- осуществление контроля прочности бетона в конструкции арок с внешней стальной оболочкой по контрольным образцам, изготовленным из проб смеси, отобранных при бетонировании конструкций.

4. Фактические значения прочности бетона и температурных параметров выдерживания сталежелезобетонных конструкций арок полностью соответствуют проектным требованиям и значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкций, в том числе:

- прочность бетона на сжатие в конструкциях в проектном возрасте составляет 108,1 и 111,3 МПа, соответствует фактическим классам по прочности на сжатие В_ф 94 и В_ф 97 и превышает требования проекта;

- максимальная температура бетона в ядре конструкций составила 57–68 °С;

- средняя скорость остывания конструкций не превышала 5 °С/сут;

- перепад температуры по длине конструкций составил 0,6–0,8 °С/м;

- разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки, а также поверхностью оболочки и окружающей средой не превышала 20 °С.

5. Предложенные подходы, учитывающие особенности расчета, конструирования, технологии возведения и контроля качества бетона конструкций арок Технопарка ПАО «Сбербанк» в инновационном центре «Сколково», могут использоваться при строительстве технически сложных сталежелезобетонных конструкций в несъемной опалубке.

Список литературы

1. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. Москва: Стройиздат, 1974. 144 с.
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2015. Т. 7. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf> (доступ свободный).
3. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 6 (21). С. 89–103.
4. Ерофеев В.И., Хазов П.А., Ситникова А.К. Прочность и устойчивость композитных железобетонных и трубобетонных образцов при статическом нагружении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25. № 2. С. 141–153. DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153>
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
6. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. ЧАСТЬ II // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Высокопрочные бетоны в конструкциях фундаментов высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 3. С. 53–57.
8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 18–24.
9. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической тре-

- щиностойкости // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Обеспечение термической трещиностойкости массивной конструкции переходной плиты перекрытия // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 12. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.12.23-30>
 11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>
 12. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
 13. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 14. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
 15. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
 16. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.
 17. Болгов А.Н., Невский А.В., Иванов С.И., Сокуров А.З. Численное моделирование температурных напряжений в бетоне массивных конструкций в период твердения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 4. С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
 18. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. Москва: РААСН, НИИЖБ, 2005.
 19. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.
 20. Шифрин С.А., Кардумян Г.С. Использование органоминеральных модификаторов серии МБ для снижения температурных напряжений в бетонируемых массивных конструкциях // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 88–93.
 21. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS [Термическое растрескивание массивных бетонных конструкций. Отчет о состоянии дел технического комитета RILEM 254-CMS]. *RILEM State-of-the-Art Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
 22. Sargam Y., Faytarouni M., Riding K., Wang K., Jähren C., Shen J. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
 23. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона. Харьков, 2002. 180 с. ISBN 966-637-066-2.
 24. Bisch Philippe. Behavior and Assessment of Massive Structures: Cracking and Shrinkage. Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 August 2017. *Workshop Proceedings*. 2017, no. 12, pp. 11–15.
 25. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
 26. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-Art Report on Controlling of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004, vol. 2, no. 2, pp. 141–154. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>
 27. ГОСТ Р 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
 28. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
 29. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
 30. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
 31. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2010.
 32. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.

References

1. Kikin A.I., Sanzharovsky R.S., Trull V.A. Structures made of steel pipes filled with concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974, 144 p. (In Russian).
2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell. *“SCIENCE STUDIES” Online journal*. 2015, vol. 7, no. 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf> (access is free). (In Russian).
3. Duvanov I.A., Salmanov I.D. Tubular concrete columns in the construction of high-rise buildings and structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014, no. 6 (21), pp. 89–103. (In Russian).
4. Erofeev V.I., Khazov P.A., Sitnikova A.K. Strength and stability of composite concrete and pipe-concrete structures under static load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture*. 2023,

- vol. 25, no. 2, pp. 141–153. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153>
5. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of tall buildings. *Vysotnye Zdaniya = Tall Buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
6. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of B80 and B90 classes in monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2008, no. 3, pp. 9–13. (In Russian).
7. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. High-strength concretes in constructions of foundations of the high-rise complex «OKO» in MIBC «Moscow-City». *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2017, no. 3, pp. 53–57. (In Russian).
8. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. Experience in production and quality control of high-strength concrete used in construction of high-rise complex «OKO» in MIBC «Moscow-City». *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2018, no. 1, pp. 18–24. (In Russian).
9. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Ivanov S.I. The experience of concreting a massive dense-reinforced structure with the provision of thermal crack resistance. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023, no. 10, pp. 15–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>
10. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I. Ensuring thermal crack resistance of the massive structure of the transition floor slab. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023, no. 12, pp. 23–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.12.23-30>
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of concrete technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2022, no. 10, pp. 41–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>
12. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. (In Russian).
13. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
14. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standardinform Publ., 2019. (In Russian).
15. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situ-casting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standardinform Publ., 2014. (In Russian).
16. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standardinform Publ., 2013. (In Russian).
17. Bolgov A.N., Nevskii A.V., Ivanov S.I., Sokurov A.Z. Numerical modeling of thermal stresses in concrete of massive structures during the hardening period. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2022, no. 4, pp. 6–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
18. Guidelines for concrete heating in monolithic structures. Moscow: RAASN, NIIZHB, 2005. (In Russian).
19. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.
20. Shifrin S.A., Kardumyan G.S. The use of organomineral modifiers of the MB series to reduce temperature stresses in concreted massive structures. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2007, no. 9, pp. 9–11. (In Russian).
21. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS. *RILEM State-of-the-Art Reports*, 2019. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
22. Sargam Y., Faytarouni M., Riding K., Wang K., Jähren C., Shen J. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, vol. 11, DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
23. Usharov-Marshak A.V. Cementometry of cement and concrete. Kharkiv, 2002, 180 p. ISBN 966-637-066-2.
24. Bisch Philippe. Behavior and Assessment of Massive Structures: Cracking and Shrinkage. Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 August 2017. *Workshop Proceedings*. 2017, no. 12, pp. 11–15.
25. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
26. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-Art Report on Controlling of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004, vol. 2, no. 2, pp. 141–154. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>
27. State Standard R 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2020. (In Russian).
28. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2015. (In Russian).
29. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2019. (In Russian).
30. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2018. (In Russian).

31. State Standard 24211-2008. Admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2010. (In Russian).
32. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2012. (In Russian).

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

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

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

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

Andrey V. Sheynfeld✉, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow

State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Сергей Ильич Иванов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций (№ 7), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

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

Андрей Николаевич Иващенко, инженер, генеральный директор, ООО «Инфорспроект», Москва

Andrey N. Ivaschenko, Engineer, General Director, LLC "Inforsproekt", Moscow

Павел Михайлович Леонтьев, ведущий инженер, ООО «Предприятие Мастер Бетон», Москва

Pavel M. Leontiev, Leading Engineer, LLC "Master Concrete Enterprise", Moscow

Александр Игоревич Пастухов, инженер лаборатории напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций (№ 7), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander I. Pastukhov, Engineer of Laboratory of Straining Concretes and Self-stressed Structures (No. 7), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

И.В. БАКЛЫКОВАО «Институт Гидропроект», Волоколамское шоссе, д. 2, г. Москва, 125993,
Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО УСИЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Введение. В ходе исследования выполнено расчетное обоснование прочности железобетонной балки, усиленной композитными материалами. На первом этапе разработана упругая конечно-элементная модель для анализа распределения напряжений и расчета необходимой площади армирования. На втором этапе включена нелинейная деформационная модель бетона, учтен процесс трещинообразования. Итерационные расчеты показали достижение предельного состояния конструкции. На третьем этапе была создана модель с внешним композитным армированием. Усиление уменьшило прогиб с 7,36 до 6,47 мм, снизило напряжения в арматуре на 17,46 % и увеличило несущую способность на 32 %. Планируются экспериментальные исследования, включая учет динамических воздействий и температурно-влажностных факторов.

Цель. Исследование эффективности применения композитных материалов на основе полимеров, армированных волокнами, для усиления железобетонных конструкций; сравнение напряженно-деформированного состояния усиленной и неусиленной конструкций.

Материалы и методы. Расчетные исследования железобетонных конструкций выполнялись методом конечных элементов на основе нелинейных моделей в программном комплексе ANSYS.

Результаты. Результатом работы стал анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции с внешним композитным армированием и без него, оценивший эффективность усиления в повышении прочности и долговечности. Основная задача – моделирование и анализ таких конструкций, включая влияние композитов на снижение напряже-

ний, уменьшение прогибов и увеличение несущей способности.

Выводы. Результаты показали, что применение композитных материалов для внешнего армирования железобетонных конструкций эффективно снижает напряжения в арматуре, уменьшает прогиб и предотвращает образование трещин под композитным покрытием. Максимальные растягивающие напряжения в арматуре снизились на 17,46 %, а несущая способность конструкции увеличилась на 32 % (с 126,75 до 167,31 кН).

Ключевые слова: железобетонные конструкции, расчетные исследования, напряженно-деформированное состояние, усиление конструкции, система внешнего армирования, композитный материал, нелинейный бетон, трещинообразование, гидротехническое сооружение

Для цитирования: Баклыков И.В. Результаты расчетных исследований железобетонных конструкций с использованием системы внешнего усиления на основе композитных материалов // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 22–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH

Вклад автора

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

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.11.2024

Поступила после рецензирования 01.12.2024

Принята к публикации 05.12.2024

RESULTS OF COMPUTATIONAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING AN EXTERNAL REINFORCEMENT SYSTEM BASED ON COMPOSITE MATERIALS

Abstract

Introduction. In the course of the study, a calculated justification of the strength of a reinforced concrete beam reinforced with composite materials was performed. At the first stage, an elastic finite element model was developed to analyze the stress distribution and calculate the required reinforcement area. At the second stage, a nonlinear deformation model of concrete is included, the cracking process is taken into account. Iterative calculations have shown the achievement of the limiting state of the structure. At the third stage, a model with external composite reinforcement was created. The reinforcement reduced the deflection from 7.36 to 6.47 mm, reduced the stresses in the reinforcement by 17.46 % and increased the bearing capacity by 32 %. Experimental studies are planned, including consideration of dynamic effects and temperature and humidity factors.

Aim. The main aim of this study is to investigate the effectiveness of fiber-reinforced polymer-based composite materials for reinforced concrete structures strengthening. The stress-strain states of reinforced and unreinforced structures were also compared.

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

Results. The analysis of the stress-strain state of the reinforced concrete structure with and without external composite reinforcement was carried out, allowing for an assessment of the effectiveness of composite reinforcement for improving the strength and durability of the structure. The study models and analyzes the stress-strain state of such structures when using external reinforcement and evaluates the impact of composite mate-

rials on stress and deflection reducing, and load-bearing capacity of the structure increasing.

Conclusions. The study results indicate that using of composite materials for external reinforcement of reinforced concrete structures effectively reduces reinforcement stresses, decreases deflection, and prevents crack formation under composite covering. Maximum tensile stresses in the reinforcement were reduced by 17.46 %, and the load-bearing capacity of the structure increased by 32 % (from 126.75 to 167.31 kN).

Keywords: reinforced concrete structures, computational studies, stress-strain state, structural reinforcement, external reinforcement system, composite material, nonlinear deformation of concrete, crack formation, hydraulic structure

For citation: Baklykov I.V. Results of computational studies of reinforced concrete structures using an external reinforcement system based on composite materials. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 22–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 01.11.2024

Revised 01.12.2024

Accepted 05.12.2024

Введение

Благодаря своим отличным свойствам и высоким показателям надежности [1, 2] использование композитов на основе полимеров, армированных волокнами, для ремонта и усиления конструкций значительно увеличилось [3–5]. В настоящее время системы внешнего армирования находят широкое

применение для усиления конструкций гидротехнических сооружений [6–12].

Для моделирования разрушения бетона использована трехмерная модель Menetrey–Willam [13], представляющая собой трехпараметрическую поверхность разрушения, описываемую следующим выражением:

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[\sqrt{1,5} \times \frac{\rho}{f'_c} \right]^2 + m \times \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \times f'_c} \times r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \times f'_c} \right] - c = 0, \quad (1)$$

где

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для арматуры и композитного материала принято линейное деформирование.

Цель

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции, сравнительный анализ аналитических методов расчета железобетонных конструкций и метода конечных элементов, а также оценка влияния применения композитных материалов на повышение несущей способности конструкции.

Материалы и методы

В работе применяются аналитические методы расчета и метод конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций.

Результаты

В данной работе проведено исследование железобетонной конструкции, работающей в условиях изгибающих нагрузок. Для этого была разработана и представлена общая пространственная модель конструкции, которая демонстрируется на рис. 1, и арматурный каркас (рис. 2). Модель учитывает основные особенности конструкции и позволяет проанализировать ее поведение под воздействием изгибающих моментов, а также оценить напряженно-деформированное состояние элементов при усилении композитным материалом.

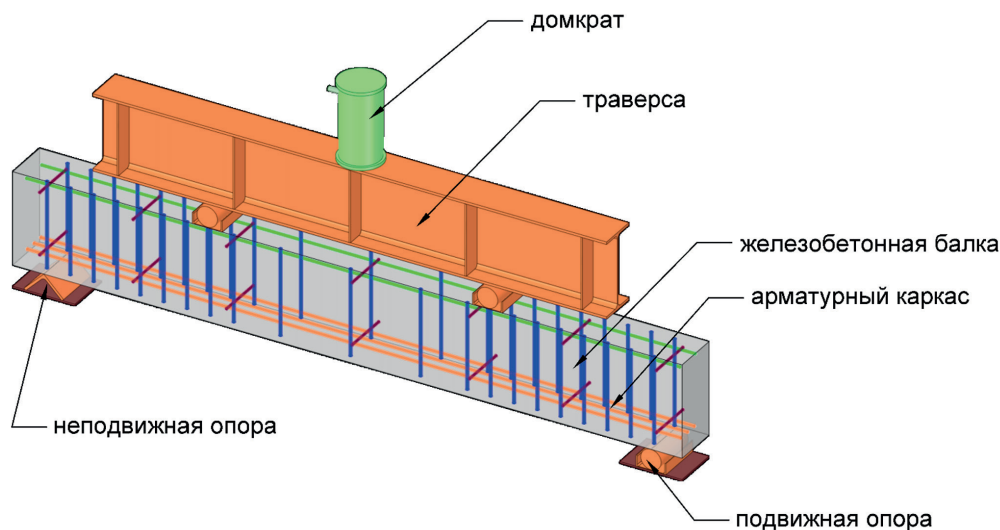


Рис. 1. Общая модель железобетонной конструкции
Fig. 1. General model of reinforced concrete structure

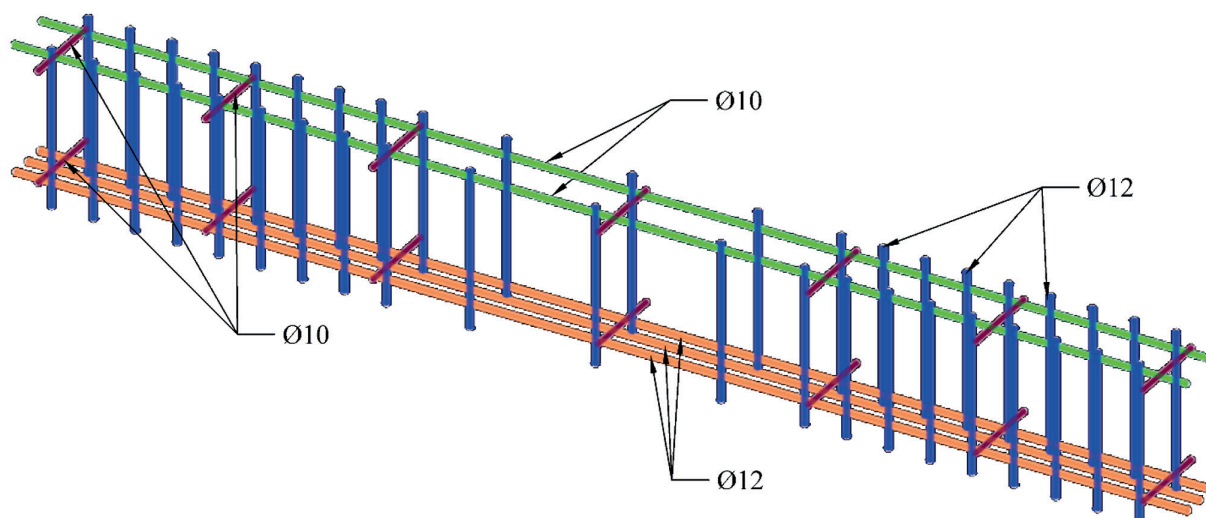


Рис. 2. Общий вид арматурного каркаса железобетонной конструкции
Fig. 2. General view of the reinforcement framework of reinforced concrete construction

$L = 2,15$ м – длина балки.

$h = 0,30$ м – высота балки.

$b = 0,15$ м – ширина балки.

В качестве бетона был принят тяжелый бетон класса В25 ($R_{bt} = 18,50$ МПа, $R_{btr} = 1,55$ МПа, $R_b = 14,50$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа, $E_b = 30\,000$ МПа).

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

Композитный материал типа CarbonWrap Tape ($R_{f,n} = 3600$ МПа, $R_f = 2400$ МПа, $E_f = 230\,000$ МПа).

Диаграммы деформирования бетона и арматуры представлены на рис. 3.

Расчетная схема приложения нагрузки представлена на рис. 4.

Суммарная расчетная сила $P = 2 \times N = 450$ кН.

На первом этапе необходимо проверить прочность конструкции и определить армирование.

Расчетный момент от действия собственного веса бетона составляет:

$$M_{с.в.} = 477,680 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 0,48 \text{ кН} \times \text{м}.$$

Расчетный момент от сосредоточенных сил в центре пролета:

$$\begin{aligned} M_F &= N \times a = 63\,380 \frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \times 0,525 \text{ м} = \\ &= 33\,274,50 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33,27 \text{ кН} \times \text{м}. \end{aligned}$$

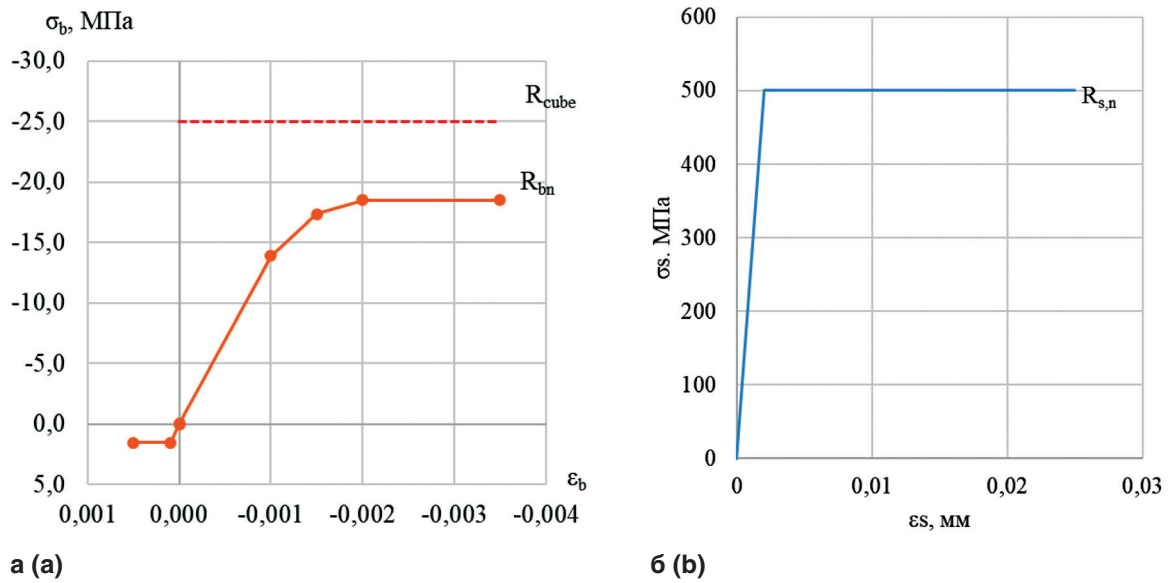


Рис. 3. Расчетные диаграммы деформирования: а – бетона класса В25; б – арматуры А500С
Fig. 3. Calculated deformation diagrams: a – concrete of B25 class; b – A500C reinforcement

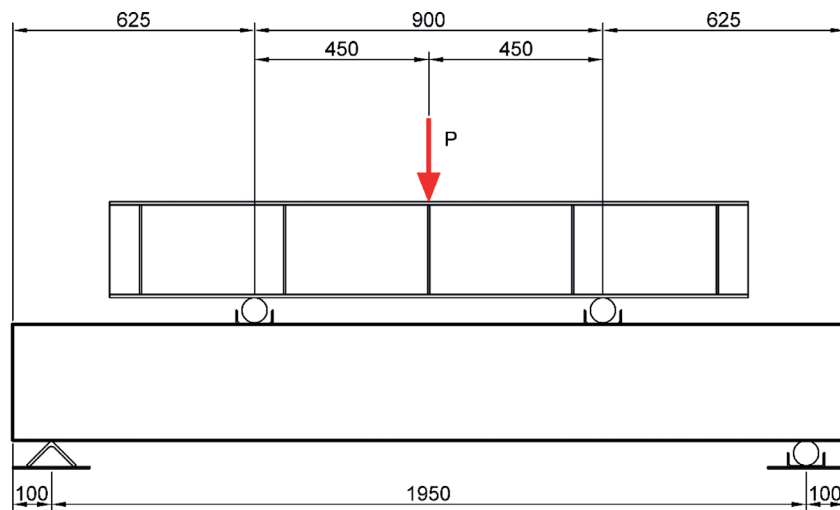


Рис. 4. Расчетная схема
Fig. 4. Calculation scheme

Суммарный момент в центре пролета от действия собственного веса и сосредоточенных сил:

$$M_A = M_{c.b.} + M_F = 477,68 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} + 33\,274,50 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33\,752,18 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33,75 \text{ кН} \times \text{м}.$$

По полученному моменту M_A определим армирование при всех коэффициентах (γ_{lc} , γ_n , γ_c , γ_b , γ_s), равных 1,0, как для чистого изгиба.

$$h_0 = h - a = 0,300 \text{ м} - 0,064 \text{ м} = 0,260 \text{ м},$$

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \times \gamma_{lc} \times \gamma_n \times M}{\gamma_c \times \gamma_b \times R_b \times b}} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \times M}{R_b \times b}} = 0,26 - \sqrt{0,26^2 - \frac{2 \times 33\,752,18}{14\,500\,000 \times 0,15}} = 0,069 \text{ м} = 69 \text{ мм}.$$

При $x = 0,069 < 2a' = 0,08$,

$$A_s = \frac{\gamma_b \times R_b \times b \times x}{\gamma_s \times R_s} = \frac{R_b \times b \times x}{R_s} = \frac{14\,500\,000 \times 0,15 \times 0,069}{450\,000\,000} = 0,0003324 \text{ м}^2 = 3,324 \text{ см}^2.$$

Требуемая площадь армирования $A_s = 3,324 \text{ см}^2$ соответствует стержням армирования 3 Ø 12 с фактической площадью $A_{с,ф} = 3,390 \text{ см}^2$.

Для определения необходимого армирования и проверки прочности конструкции были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния (рис. 5) с учетом упругой работы материалов. В результате данных расчетов был получен изгибающий момент M , на основе которого определена требуемая площадь армирования A_s . Проведение расчетов позволило определить оптимальное количество арматуры для обеспечения необходимой прочности конструкции при заданных нагрузках.

Интегрируя горизонтальные напряжения по высоте в центре пролета, получаем значение изгибающего момента $M = 33,75 \text{ кН} \times \text{м}$. На основе данного момента и с использованием формул для изгиба была рассчитана требуемая площадь армирования в пролете, со-

ставившая $A_{с,МКЭ} = 3,32 \text{ см}^2$, что хорошо коррелирует с аналитическим решением $A_s = 3,324 \text{ см}^2$.

На следующем этапе был проведен проверочный расчет железобетонной конструкции с учетом образования трещин в бетоне и определением напряжений в арматуре. Такой подход позволяет точнее оценить поведение конструкции при повышенных нагрузках, обеспечивая расчет необходимых параметров армирования для обеспечения долговечности и прочности конструкции в предельном состоянии.

Как видно из рис. 6, максимальный прогиб конструкции составил 7,36 мм, что находится в пределах допустимых значений. Для данной конструкции предельное значение прогиба составляет $l/150 = 2150/150 = 14,33 \text{ мм}$. Таким образом, фактический прогиб менее чем в два раза ниже допустимого, что свидетельствует о надежности и прочности конструкции при заданной нагрузке.

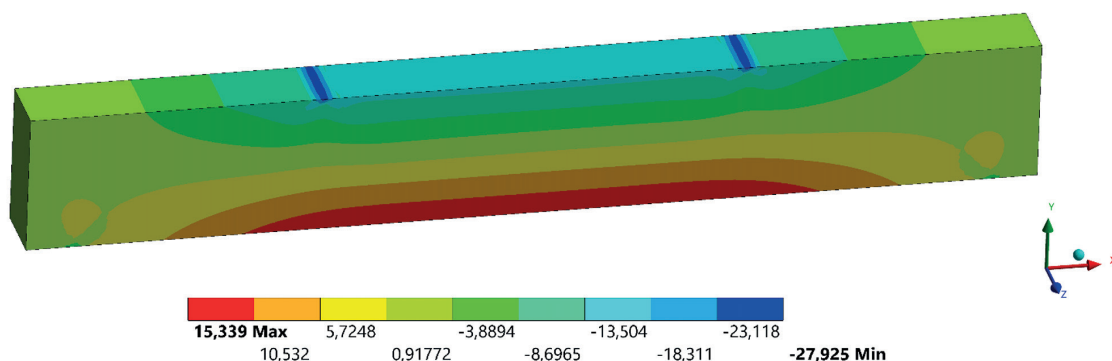


Рис. 5. Этап 1. Горизонтальные напряжения, МПа
Fig. 5. Stage 1. Horizontal stresses, MPa

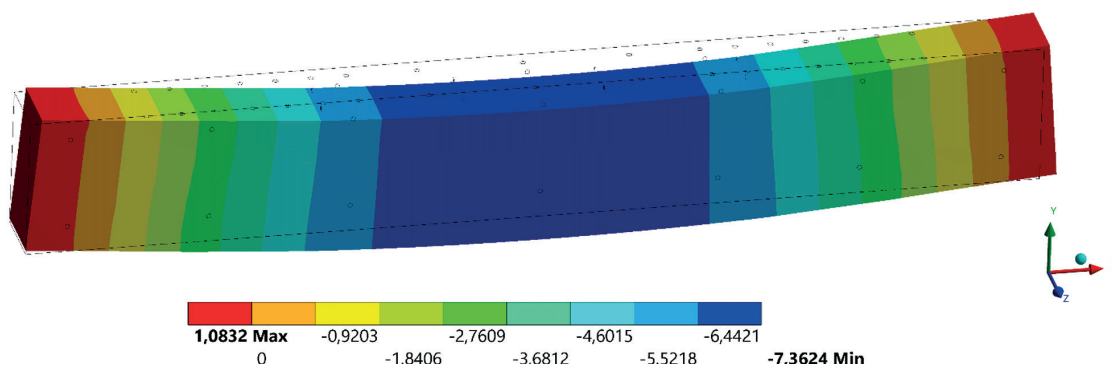


Рис. 6. Этап 2. Расчетные прогибы железобетонной конструкции, мм
Fig. 6. Stage 2. Calculated deflections of reinforced concrete structure, mm

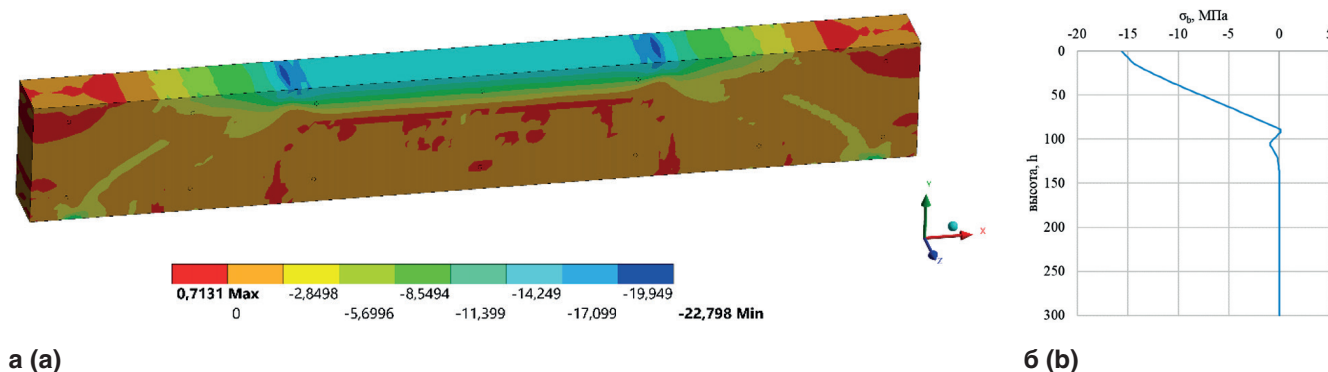


Рис. 7. Этап 2. Горизонтальные напряжения в бетоне, МПа:

а – результаты НДС; б – эпюра сжимающих напряжений по высоте, МПа

Fig. 7. Stage 2. Horizontal stresses in concrete, MPa: а – stress-strain state results; б – plot of compressive stresses in height, MPa

Из рис. 7 видно, что сжимающие напряжения в бетоне в пролетной части конструкции достигли значения -14,49 МПа, что не превышает предельное сопротивление бетона сжатию, равное $R_b = 14,50$ МПа. В нижней растянутой зоне конструкции напряжения значительно снизились из-за появления трещин и стали близки к предельному сопротивлению бетона на растяжение $R_{bt} = 1,05$ МПа. Это свидетельствует о том, что конструкция остается в допустимых пределах по прочности при приложенной нагрузке, несмотря на возникновение трещин в растянутой зоне.

Из рис. 8 видно, что напряжения в нижней растянутой арматуре составили 432,75 МПа, что находится вблизи предельного сопротивления арматуры, равно $R_s = 435$ МПа. Это указывает на то, что арматура почти достигла предела прочности, обеспечивая эффективное восприятие растягивающих нагрузок, приложенных к конструкции.

Анализ характера трещинообразования, представленный на рис. 9, показывает наличие как нормальных, так и наклонных трещин. Расчетные результаты свидетельствуют о том, что сжимающие напряжения в бетоне, а также растягивающие напряжения в арматуре приближаются к их предельным сопротивле-

ниям. В связи с этим рассмотрим вариант усиления конструкции путем применения системы внешнего армирования, при котором исходная конструкция, не имеющая трещин, будет оклеена композитным материалом.

На рис. 10 показана модель усиленной конструкции, где для повышения прочности использованы хомуты, а вдоль нижней грани добавлена укрепляющая лента. Усиление выполнено следующим образом: один слой хомутов толщиной 0,128 мм и три слоя ленты на нижней грани конструкции общей толщиной 0,384 мм ($3 \times 0,128$ мм).

Результаты расчетов показывают, что максимальные вертикальные перемещения (прогиб) усиленной конструкции составляют 6,47 мм, что значительно меньше по сравнению с прогибом в неусиленном варианте, где он достигал 7,36 мм.

Как видно из рис. 11, на участках конструкции, покрытых слоями композитного материала (хомутами), значения сжимающих напряжений меньше, чем на открытых участках бетона. Это указывает на то, что система внешнего армирования эффективно снижает напряжения в усиленных зонах, перераспределяя нагрузку и повышая общую прочность конструкции.

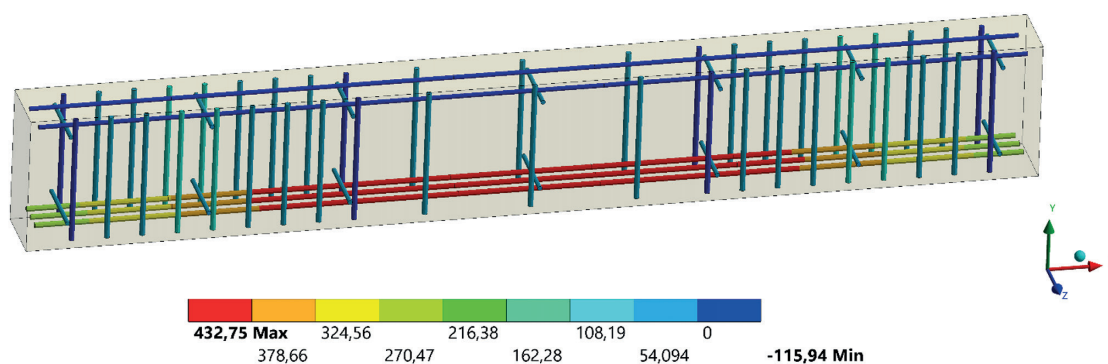


Рис. 8. Этап 2. Напряжения в арматуре, МПа

Fig. 8. Stage 2. Stresses in the reinforcement, MPa

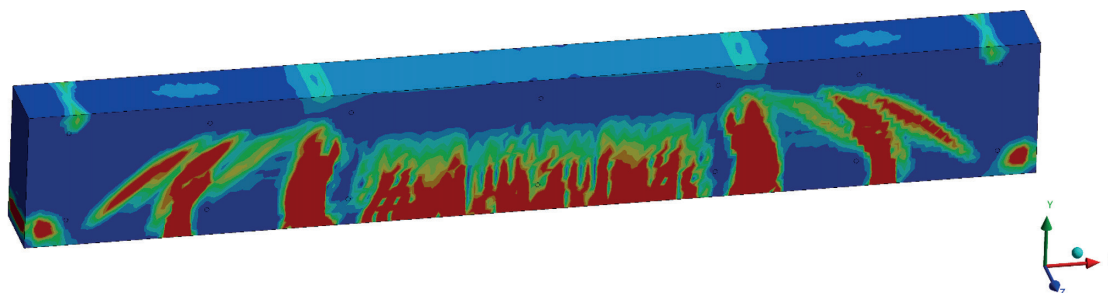


Рис. 9. Этап 2. Характер трещинообразования
Fig. 9. Stage 2. The pattern of cracking

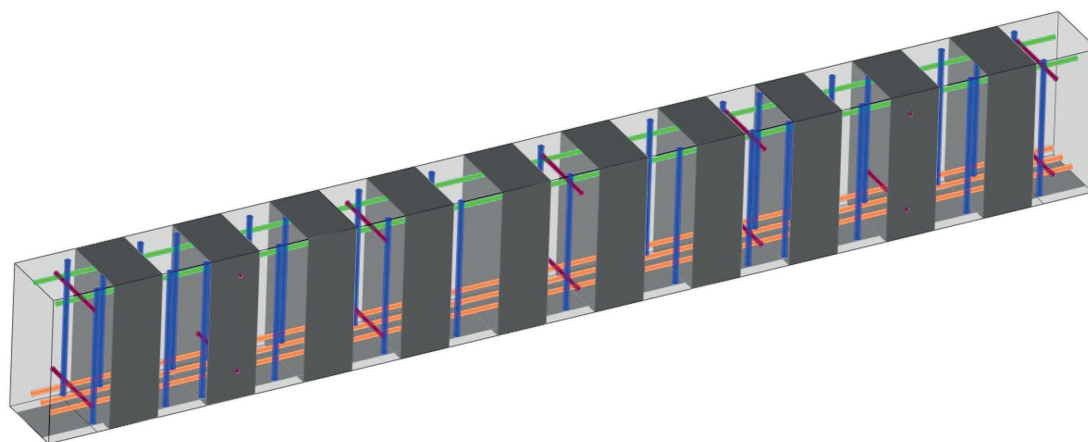


Рис. 10. Схема усиления композитным материалом
Fig. 10. Composite material reinforcement scheme

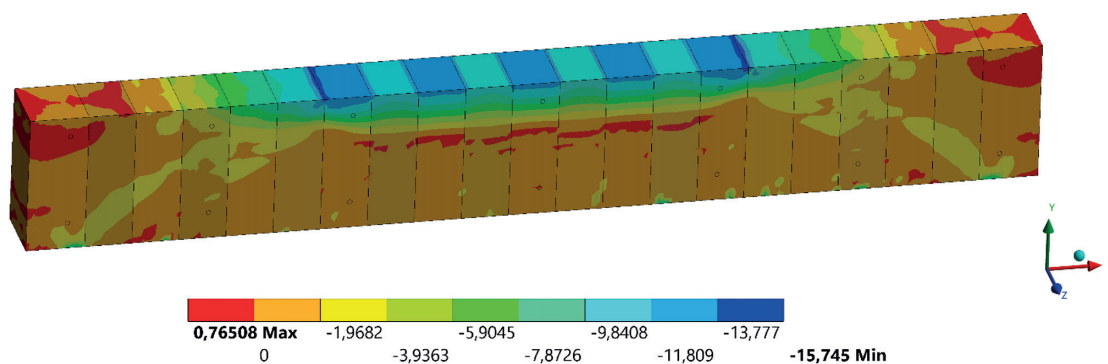


Рис. 11. Этап 3. Горизонтальные напряжения в бетоне, МПа
Fig. 11. Stage 3. Horizontal stresses in concrete, MPa

На рис. 12 также демонстрируется, что трещины в бетоне сосредоточиваются вдоль граней, покрытых композитным материалом (хомутами), тогда как под самими хомутами трещинообразование практически отсутствует, в отличие от неусиленной конструкции. Это подтверждает эффективность внешнего армирования в предотвращении появления трещин в усиленных участках.

Распределение напряжений в арматуре после усиления аналогично представленному на рис. 8, однако

максимальные растягивающие напряжения в рабочей арматуре в нижней части конструкции снизились до 357,2 МПа, тогда как в неусиленном состоянии они составляли 432,75 МПа. Таким образом, благодаря применению системы внешнего армирования напряжения в рабочей арматуре снизились на 17,46 %, что способствует увеличению долговечности и надежности конструкции.

Напряжения в композитном материале, как видно из рис. 13, составляют 705,4 МПа, что значительно

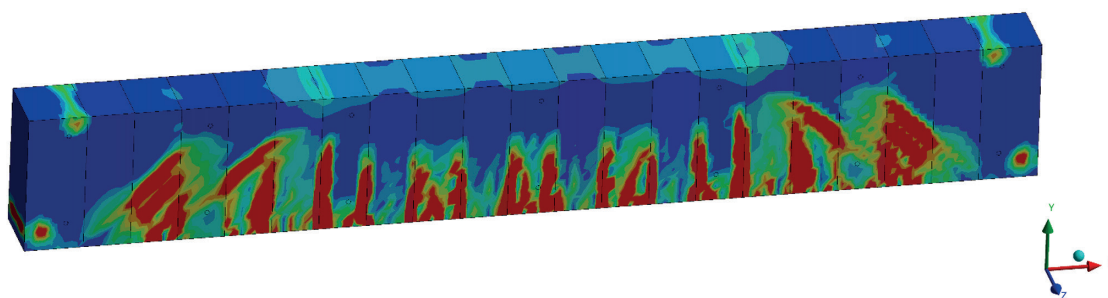


Рис. 12. Этап 3. Характер трещинообразования
Fig. 12. Stage 3. The pattern of cracking

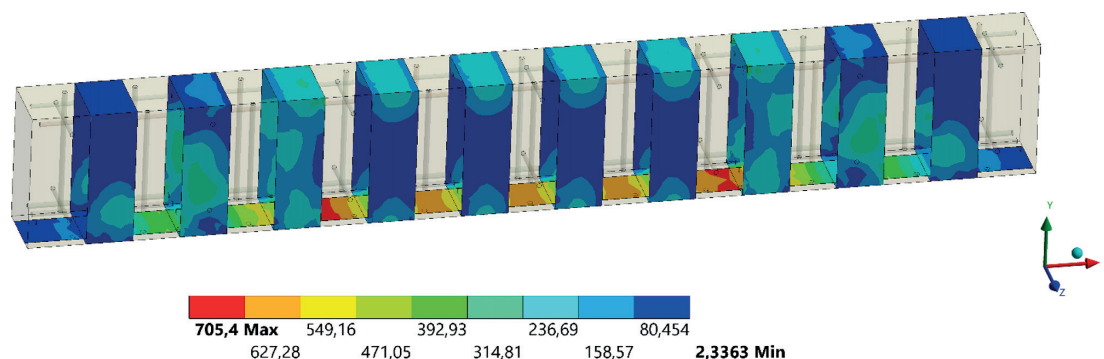


Рис. 13. Этап 3. Напряжения в композитном материале, МПа
Fig. 13. Stage 3. Stresses in composite material, МПа

ниже предела прочности композита $R_f = 2400$ МПа. Это подтверждает перераспределение части нагрузок с рабочей арматуры на композитный материал. Таким образом, использование системы внешнего армирования эффективно уменьшает нагрузку на арматуру, снижая ее напряжения и увеличивая общую несущую способность и долговечность конструкции. При этом несущая способность конструкции увеличилась с 126,75 до 167,31 кН, т. е. в 1,32 раза.

Выводы

В ходе исследования выполнено расчетное обоснование прочности железобетонной балки, усиленной композитными материалами с использованием метода конечных элементов.

На первом этапе исследования разработана упругая конечно-элементная модель, описывающая поведение бетона с начальным модулем деформации, без учета стержневой арматуры и трещинообразования. Проведен анализ распределения упругих напряжений под действием статических нагрузок. На основании полученных напряжений, через их интегрирование по вертикальному сечению в пролетной зоне, определены внутренние усилия (действующие моменты). В дальнейшем на основе определенных усилий с учетом работы железобетона на III стадии и примени-

ем формул чистого изгиба выполнен расчет необходимой площади армирования.

На втором этапе исследования была разработана конечно-элементная модель, включающая:

- нелинейную деформационную модель бетона;
- учет процессов трещинообразования;
- рабочее стержневое армирование, рассчитанное на первом этапе.

Проведены итерационные расчеты напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции. В результате определены фактические прогибы конструкции (7,36 мм), действующие напряжения в бетоне сжатой зоны (14,49 МПа) и стержнях арматуры (432,75 МПа), а также характер трещинообразования.

Результаты расчетов под действием статических нагрузок показали, что напряжения в арматурных стержнях (432,75 МПа) достигают предела текучести, соответствующего нормативному сопротивлению арматуры (435 МПа). Одновременно в сжатой зоне бетона в центре пролета напряжения (14,49 МПа) также достигают нормативного сопротивления материала (14,50 МПа). Это свидетельствует о достижении предельного состояния железобетонной конструкции при заданной нагрузке и конструктивных параметрах (3 Ø 12).

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что эпюра напряжений в сжатой зоне бето-

на имеет треугольную форму, а высота сжатой зоны составляет около 100 мм. В то же время при аналитических расчетах требуемого армирования, в соответствии с нормативной документацией, используется упрощенная прямоугольная эпюра сжатой зоны бетона, принимаемая со значением сопротивления бетона. В этих расчетах высота сжатой зоны составляет 69 мм.

Таким образом, высота сжатой зоны бетона, определенная в аналитических расчетах, меньше, чем в расчетах напряженно-деформированного состояния. Однако величины сжимающей силы в сжатой зоне бетона остаются сопоставимыми в обоих случаях.

На следующем этапе исследований была создана конечно-элементная модель, аналогичная разработанной на втором этапе, но дополненная системой внешнего армирования из композитного материала. Целью модели стало изучение влияния композитного армирования на несущую способность конструкции.

Усиление конструкции за счет внешнего армирования привело к уменьшению максимального прогиба с 7,36 до 6,47 мм, что свидетельствует о повышении жесткости конструкции. Кроме того, растягивающие напряжения в рабочей арматуре снизились на 17,46 % (с 432,75 до 357,2 МПа), что способствует увеличению ее несущей способности.

Композитный материал уменьшает вероятность образования трещин в усиленных зонах, концентрируя их по краям покрытия и предотвращая трещинообразование под слоем композита.

Использование композитного материала позволило перераспределить часть напряжений с арматуры, что подтверждается полученными напряжениями в композите, составляющими 705,4 МПа (меньше его предельной прочности).

В результате усиления несущая способность конструкции возросла с 126,75 до 167,31 кН, что на 32 % выше, чем в неусиленном состоянии.

Таким образом, использование системы внешнего армирования на основе композитных материалов является эффективным методом усиления железобетонных конструкций, особенно для условий высоких нагрузок и в условиях трещинообразования.

В дальнейшей работе планируется проведение натурных экспериментальных исследований для верификации результатов расчетных исследований. Особое внимание будет уделено учету динамических воздействий, анализу деградации железобетонных конструкций, влиянию температурно-влажностных факторов, а также расчетам, учитывающим наличие строительных межблочных швов.

Список литературы / References

1. Jawdhari A., Peiris A., Harik I. Experimental study on RC beams strengthened with CFRP rod panels. *Engineering Structures*. 2018, vol. 173, pp. 693–705.
2. Jawdhari A., Harik I. Finite element analysis of RC beams strengthened in flexure with CFRP rod panels. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 163, pp. 751–766.
3. Pham T.M., Hadi M.N.S., Youssef J. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression. *Journal of Composites for Construction*. 2015, vol. 19, no. 6, p. 04015015.
4. Erki M.-A., Meier M.U. Impact loading of concrete beams externally strengthened with CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*. 1999, vol. 3, no. 3, pp. 117–124.
5. White T.W., Soudki K.A., Erki M.-A. Response of RC beams strengthened with CFRP laminates and subjected to a high rate of loading. *Journal of Composites for Construction*. 2001, vol. 5, no. 3, pp. 153–162.
6. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Pashchenko F.A. Results of studies on strengthening retaining walls with composite materials. *Power Technology and Engineering*. 2021, vol. 55, no. 3, pp. 373–379.
7. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Пащенко Ф.А. Результаты исследований усиления подпорных стен композитными материалами // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 4. С. 35–42.
7. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Pashchenko F.A. The results of research of retaining walls strengthening with composite materials. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*. 2021, no. 4, pp. 35–42. (In Russian).
8. Пащенко Ф.А., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д. Экспериментальное обоснование усиления подпорных стен. В сборнике: Инженерные системы. Труды научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов. В 2-х томах. Под общей редакцией М.Ю. Мальковой. 2020. С. 15–21.
8. Pashchenko F.A., Lisichkin S.E., Rubin O.D., Experimental substantiation of reinforcement of retaining walls. In the collection: Engineering systems. Proceedings of the scientific and practical conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the Peoples' Friendship University of Russia. In 2 volumes. Under the general editorship of M.Yu. Malkova. 2020, pp. 15–21. (In Russian).
9. Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В., Бекин Н.В., Фролов К.Е. Расчетное обоснование технического решения по усилению железобетонного перекрытия машинного зала ГЭС // *Строительство: наука и образование*. 2019. Т. 9. № 1 (31). С. 4.
9. Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Bekin N.V., Frolov K.E. Estimated justification of technical decision on strengthening reinforced concrete machine hall floor. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*. 2019, vol. 9, no. 1 (31), p. 4. (In Russian).

10. Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е., Лисичкин А.С. Обоснование решения по усилению железобетонных конструкций после кратковременных ударных нагрузок, на примере ГЭС Айурикин // *Строительство: наука и образование*. 2019. Т. 9. № 3 (33). С. 6.
10. Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Frolov K.E., Lisichkin A.S. Grounds for the decision to strengthen reinforced concrete structures after short-term impulse loads, using Alluriquin HPP as an example. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*. 2019, vol. 9, no. 3 (33), p. 6. (In Russian).
11. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Разработка методики расчета прочности изгибаемых балочных элементов ГТС, усиленных внешним армированием из углеродного волокна, в продольных сечениях. В сборнике: ДОКЛАДЫ ТСХА. Материалы международной научной конференции. 2018. С. 184–188.
11. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Development of a methodology for calculating the strength of bent girder elements of GTS reinforced with external carbon fiber reinforcement in longitudinal sections. In the collection: REPORTS OF THE TAA. Materials of the international scientific conference. 2018, pp. 184–188. (In Russian).
12. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций ГТС, имеющих межблочные строительные швы, усиленных внешним армированием из углеродного волокна // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 9 (120). С. 1067–1079.
12. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. The results of the experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures with interconnect construction joints, reinforced by external reinforcement of carbon fiber. *Vestnik MGSU = Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2018, vol. 13, no. 9 (120), pp. 1067–1079. (In Russian).
13. Menetrey P., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. Vol. 92, pp. 311–318.

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

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

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

**З.У. БЕППАЕВ[✉], Л.Х. АСТВАЦАТУРОВА, С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ,
С.А. ВЕРНИГОРА, В.В. ЛОПАТИНСКИЙ**

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

ПОДБОР СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ (РЕЦИКЛИНГОВЫХ) ЩЕБНЯ И ПЕСКА

Аннотация

Введение. Замена традиционных (природных) заполнителей на промышленные отходы при производстве бетонов является одним из важнейших резервов экономии материальных и энергетических ресурсов в строительной индустрии Российской Федерации. Лом бетонных, железобетонных конструкций и изделий, который образуется при сносе физически и морально устаревших зданий и сооружений, а также при их разрушении после природных катастроф и вооруженных конфликтов, относится с точки зрения утилизации в технологии бетонов к наиболее перспективным отходам. Использование бетонных отходов практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций) и создать условия для выполнения важных социальных, экономических и экологических задач.

Цель. Подбор составов и исследование нормируемых параметров самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (бетонных) щебня и песка с использованием в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка, а также сравнение их свойств с аналогичными по составу самоуплотняющимися бетонами на основе природного щебня и песка.

Материалы и методы. Для проведения исследований в качестве крупного заполнителя использовали рециклинговый (бетонный) и гранитный (природный) щебень по ГОСТ 8267-93. В качестве мелкого заполнителя использовали рециклинговый (бетонный) и природный песок по ГОСТ 8736-2014. В качестве минеральной добавки применяли мелкие фракции рециклингового песка. В качестве вяжущего приме-

няли портландцемент по ГОСТ 31108-2020. В качестве добавки применяли суперпластификатор «Полипласт Таргет» по ГОСТ 24211-2008. Воду затворения применяли по ГОСТ 23732-2011.

Результаты. Реологические свойства, морозостойкость и истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей идентичны аналогичным показателям самоуплотняющихся бетонов на основе традиционных заполнителей. Прочность, плотность и марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей ниже аналогичных показателей мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе традиционных заполнителей.

Выводы. По результатам проведенной работы выявлено, что вторичные (рециклинговые) щебень и песок, а также мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка (удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг) пригодны для производства самоуплотняющихся бетонов. Самоуплотняющиеся бетоны на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка могут наравне с самоуплотняющимися бетонами на основе традиционных щебня и песка применяться в строительной отрасли Российской Федерации.

Ключевые слова: рециклинг, продукты утилизации бетонных и железобетонных конструкций, самоуплотняющийся бетон, мелкозернистые самоуплотняющиеся бетонные смеси, рециклинговые щебень и песок, минеральные добавки

Для цитирования: Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Подбор составов и исследование свойств мелко-

зернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 33–44. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-33-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-33-44). EDN: MNCZEZ

Вклад авторов

Беппаев З.У. – руководство работой, анализ результатов, подготовка статьи.

Аствацатурова Л.Х. – анализ результатов, подготовка и оформление статьи.

Колодяжный С.А. – выполнение экспериментальной части, подготовка статьи.

Вернигора С.А., Лопатинский В.В. – выполнение экспериментальной части.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2024

Поступила после рецензирования 03.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

**Z.U. BEPPAEV✉, L.H. ASTVATSATUROVA, S.A. KOLODYAZHNY,
S.A. VERNIGORA, V.V. LOPATINSKY**

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

SELECTION OF COMPOSITIONS AND INVESTIGATION OF PROPERTIES OF FINE—GRAINED SELF—COMPACTING CONCRETES BASED ON SECONDARY (RECYCLING) CRUSHED STONE AND SAND

Abstract

Introduction. The replacement of traditional (natural) aggregates with industrial waste in the production of concrete is one of the most important reserves for saving material and energy resources in the construction industry of the Russian Federation. Scrap of concrete, reinforced concrete structures and products, which is formed during the demolition of physically and morally outdated buildings and structures, as well as during their destruction after natural disasters and armed conflicts, is one of the most promising wastes from the point of view of recycling in concrete technology. The use of concrete waste will practically ensure the implementation of the most important principle of waste-free technological processes (in the production of prefabricated and monolithic concrete and reinforced concrete structures) and create conditions for the fulfillment of important social, economic and environmental tasks.

Aim. Selection of compositions and study of the standardized parameters of self-compacting concretes based on recycled (concrete) crushed stone and sand using fine

fractions of recycled sand as a mineral additive, as well as comparing their properties with self-compacting concretes based on natural crushed stone and sand of a similar composition.

Materials and methods. For the research, recycled (concrete) and granite (natural) crushed stone according to State Standard 8267-93 were used as coarse aggregates. Recycled (concrete) and natural sand according to State Standard 8736-2014 were used as fine aggregates. Fine fractions of recycled sand were used as a mineral additive. Portland cement according to State Standard 31108-2020 was used as a binder. The superplasticizer Polyplast Target according to State Standard 24211-2008 was used as an additive. The mixing water was used according to State Standard 23732-2011.

Results. The rheological properties, frost resistance and abrasion resistance of fine-grained self-compacting concretes based on recycled aggregates are identical to those of self-compacting concretes based on the traditional aggregates. The strength, density and waterproof grade of fine-grained self-compacting concretes based on recycled

aggregates are lower than those of fine-grained self-compacting concretes based on traditional aggregates.

Conclusions. Based on the results of the work carried out, it was revealed that secondary (recycled) crushed stone and sand, as well as fine fractions of secondary (recycled) sand (with a specific surface area of at least 230 m²/kg), are suitable for the production of self-compacting concretes. Self-compacting concretes based on secondary (recycled) crushed stone and sand can be used in the construction industry of the Russian Federation along with self-compacting concretes based on traditional crushed stone and sand.

Keywords: recycling, recycling products of concrete and reinforced concrete structures, self-compacting concrete, fine-grained self-compacting concrete mixtures, recycled crushed stone and sand, mineral additives

For citation: Beppaev Z.U., Astvatsurova L.H., Kolodyazhny S.A., Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. Selection of compositions and investigation of properties of fine-grained self-compacting concretes based on secondary (recycling) crushed stone and sand. *Beton i Zhelezobeton*

[Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 33–44. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-33-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-33-44). EDN: MNCZEZ

Authors contribution statement

Beppaev Z.U. – management of work, analysis of results, preparation of an article.

Astvatsurova L.H. – analysis of results, preparation and design of the article.

Kolodyazhny S.A. – implementation of the experimental part, preparation of the article.

Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. – execution of the experimental part.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10.2024

Revised 03.11.2024

Accepted 07.11.2024

Введение

Замена традиционного сырья на промышленные отходы при производстве строительных материалов обычно приводит к снижению качества конечной продукции. В связи с этим отходы и побочные продукты промышленности за редким исключением традиционно рассматриваются как низкокачественное сырье. Эффективное использование отходов возможно только при разработке новых или модификации существующих технологий, в которых учитываются потенциальные возможности сырья для достижения необходимых свойств получаемой из отходов продукции.

Лом бетонных, железобетонных конструкций и изделий, который образуется при сносе физически и морально устаревших зданий и сооружений, а также при их разрушении после природных катастроф и вооруженных конфликтов, относится с точки зрения утилизации в технологии бетонов к наиболее перспективным отходам. При дроблении бетонного лома образуются рециклинговые (вторичные) щебень и песок. В настоящее время имеется опыт использования рециклингового (бетонного) лома в виде щебня в качестве крупного заполнителя для низкопрочных бетонов и для засыпки дорожных оснований. Однако при переработке бетонного лома в щебень образуются мелкие и ультрамелкие пески дробленого бетонного лома, объемы которых составляют 30–35 % от переработанного бетона. Эти пески из дробленого бетонного лома представляют собой частицы размером от 0 до 5 мм. На дробильно-сортировочных площадках образуются огромные отвалы этого песка, которые в строительной индустрии страны не используются. При этом такие пески либо выбрасываются

на загородные полигоны, либо остаются в отвалах на данной площадке, загрязняя окружающую среду.

Рациональным решением такой важной экологической проблемы будет являться утилизация песков бетонного лома путем их использования в качестве мелких заполнителей и активных микрозаполнителей, в том числе для уменьшения расхода цемента в бетонных и растворных смесях общестроительного назначения. При этом одной из наиболее перспективных областей применения рециклингового (вторичного) песка с размерами зерен менее 1 мм является их использование в качестве минеральной добавки для самоуплотняющегося бетона (СУБ). В рецептуре самоуплотняющихся бетонов используются большие объемы ультрамелких и мелких фракций наполнителей, которые обеспечивают раздвижку зерен мелкого заполнителя, что наряду с применением высокоэффективных суперпластификаторов является необходимым условием высокой текучести смеси.

Повышение подвижности бетонной смеси без снижения прочностных и основных физико-механических характеристик бетона было и остается одной из актуальнейших задач, стоящих перед производителями и потребителями бетона. Это связано как с экономией материальных, энергетических и трудовых ресурсов при использовании более подвижных бетонных смесей, так и с повышением качества готовых конструкций и изделий за счет более однородной структуры бетона и лучшего качества поверхности.

Резкому увеличению подвижности бетонной смеси способствовали разработанные (изобретенные) в 20–30-х гг. прошлого века пластификаторы для бетона на лигносульфонатной основе. С применением пластификаторов стали получать «литые бетонные

смеси», которые применяли для строительства массивных сооружений, проблематичных с точки зрения уплотнения бетонной смеси. Однако «литая» консистенция бетонной смеси в то время достигалась значительным увеличением водоцементного отношения и расхода цемента по сравнению с «трамбованным» и «пластичным» бетоном, что не позволяло получить высокопрочный материал. Дальнейшее развитие высокоподвижных смесей получили в конце 60-х – в начале 70-х годов прошлого века. Тогда был изобретен суперпластификатор для бетона на меламина- и нафталинформальдегидной основе, позволяющий получить подвижную бетонную смесь с относительно малым водоцементным отношением. Опыт применения подобных материалов показал преимущества введения суперпластификаторов в бетонную смесь. Однако были выявлены и отрицательные факторы – большинство суперпластификаторов первого поколения, особенно при больших дозировках, замедляло схватывание и твердение бетонной смеси. При транспортировке бетонов в течение 60–90 минут эффект от действия добавки снижался и уменьшалась подвижность, подача смеси по трубопроводу к месту укладки на расстояние свыше 200–250 м вызывало расслоение смеси. В результате время выполнения работ по бетонированию возрастало, ухудшалось качество поверхности изделий и снижалась прочность бетона. В 80–90-х гг. XX века в Японии профессором Хаймой Окамурой была разработана высокоэффективная добавка – суперпластификатор нового поколения на базе эфиров полиакрилатов и поликарбоксилатов, значительно повышающая реологические свойства бетонной смеси. Ему удалось создать бетон с высокой подвижностью при низком содержании воды. Совместно с Окамурой в создании и развитии высокоподвижных бетонов принимали участие профессора К. Маекава и К. Озава [1]. С начала 1990-х гг. самоуплотняющийся бетон стал объектом интенсивных научных исследований во многих странах Европы. В 2000–2001 годах в Институте строительных исследований в городе Аахен под руководством профессора В. Брамесхубера были проведены глубокие исследования свойств самоуплотняющегося бетона, по результатам которых в ноябре 2003 года Немецким комитетом по железобетону был опубликован нормативный документ, где самоуплотняющийся бетон был официально допущен и разрешен к использованию в Европе. В этом документе были изложены термины и связи самоуплотняющегося бетона с другими европейскими нормативными документами и материалами, а также методы их диагностики [2]. В этих работах для производства самоуплотняющихся бетонных смесей использовались природные заполнители.

Возможности применения рециклинговых (вторичных) щебня и песка в качестве заполнителей, а также мелких фракций песка в качестве минеральной добавки для производства самоуплотняющихся бетонов

были изучены рядом отечественных авторов [3–6]. В проведенных исследованиях для самоуплотняющихся бетонов применяли рециклинговый (вторичный) щебень с природным песком или рециклинговый (вторичный) щебень с равными долями рециклингового (вторичного) и природного песка. Кроме того, в этих работах были рассмотрены вопросы применения тонкодисперсных песков из бетонного лома для производства строительных растворов. Анализ результатов проведенных исследований показал, что замена гранитного щебня на рециклинговый (вторичный) щебень из бетонного лома в самоуплотняющемся бетоне приводит к снижению плотности и прочности на 10–15 %. Самоуплотняющийся бетон, полученный на основе рециклингового (вторичного) щебня из бетонного лома, имеет меньший модуль упругости. Несмотря на ряд проведенных работ по тематике самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) заполнителей, вопросы, связанные с морозостойкостью, водонепроницаемостью и истираемостью таких бетонов, практически не изучены. Кроме того, не изучены вопросы, связанные с возможностью применения тонкодисперсных рециклинговых песков из бетонного лома в качестве минеральной добавки (наполнителя) для производства самоуплотняющихся бетонов с различными заполнителями.

Целью работы являлся подбор составов и исследование нормируемых параметров мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (бетонных) щебня и песка с использованием в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка, а также сравнение их свойств с аналогичными по составу самоуплотняющимися бетонами на основе природного щебня и песка.

Материалы и методы

Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка, а также на основе традиционных (природных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка в качестве крупного заполнителя применяли рециклинговый (вторичный) щебень (продукт дробления бетона на гранитном щебне), выпускаемый ООО «РЕ-ГРАД», фракций 5–10 мм (марка по дробимости 600, средняя насыпная плотность 1283 кг/м³, водопоглощение 8,35 %), а также гранитный (природный) щебень производства АО «Каменногорское карьероуправление» фракций 5–10 мм (марка по дробимости 1400, средняя насыпная плотность 1421 кг/м³, водопоглощение 1,95 %). Все остальные нормируемые характеристики рециклингового (вторичного) щебня были сопоставимы с характеристиками гранитного (природного) щебня и соответствовали ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1–4)» [7].

В качестве мелкого заполнителя применяли рециклинговый (вторичный) песок (мелкие фракции с размерами зерен 1–5 мм, полученные при дроблении бетона на гранитном щебне), выпускаемый ООО «РЕГРАД» (модуль крупности 2,53, насыпная плотность 1354 кг/м³, влажность 8,2 %), а также природный песок производства АО «Богаевский карьер» (модуль крупности 2,39, насыпная плотность 1734 кг/м³, влажность 4,6 %). Все нормируемые характеристики обоих песков соответствовали ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [8].

В качестве минеральной добавки в обоих составах самоуплотняющихся бетонов применяли мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка с насыпной плотностью 1210 кг/м³ и удельной поверхностью 225–230 м²/кг. В качестве химической добавки применяли суперпластификатор «Полипласт Таргет» производства ООО «ПОЛИПЛАСТ Новомосковский», соответствующий ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» [9].

В качестве вяжущего в обоих составах самоуплотняющихся бетонов применяли портландцемент ЦЕМ II/B-Ш 42,5Н производства ООО «Хайдельберг-ЦементРус», соответствующий ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [10].

Для приготовления бетонов применяли воду, соответствующую ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» [11].

Для проведения экспериментальных исследований были подобраны идентичные (по расходу цемента и заполнителей) мелкозернистые самоуплотняющиеся бетонные смеси на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка, а также на основе традиционных (природных) щебня и песка с минеральной добавкой (в обоих бетонах) из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка. Были определены нормируемые реологические (расплыв, растворотделение, вязкость, текучесть) свойства самоуплотняющихся бетонных смесей, по значениям которых были определены марки по удобоукладываемости (РК), вязкости (V) и текучести (Т) этих смесей в соответствии ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний» [12]. Далее из этих мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей для определения прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости были изготовлены бетонные образцы.

Прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка определяли в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [13]. Плотность

бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности» [14]. Морозостойкость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» [15]. Водонепроницаемость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» [16]. Истираемость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 13087-2018 «Бетоны. Методы определения истираемости» [17].

Результаты

Составы мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка приведены в табл. 1.

Сравнение реологических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка приведено в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что реологические свойства мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка практически идентичны и соответствуют требованиям ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия (EN 206:2013+A2:2021, NEQ)» [18]. Средняя плотность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 8,5 % больше плотности мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка. Расход воды для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка на 14 % больше расхода воды для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка при равных реологических показателях. Это обусловлено большим водопоглощением рециклинговых (вторичных) щебня и песка по сравнению с природными щебнем и песком.

Общие виды мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей на основе природных и рециклинговых щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе определения их реологических свойств приведены на рис. 1–4.

Сравнение основных физико-механических (прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости) характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе

Таблица 1

Table 1

Составы мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка, а также на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка
Compositions of fine-grained self-compacting concretes based on recycled (secondary) crushed stone and sand, as well as on the basis of natural crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of recycled (secondary) sand

Тип бетона	Расход компонентов на 1 м ³ бетонной смеси ¹						Плотность смеси, кг/м ³
	цемент	щебень	песок	вода	минеральная добавка	химическая добавка	
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	<u>400</u> 0,33	<u>900</u> 0,63	<u>760</u> 0,44	<u>202</u> 0,20	<u>180</u> 0,15	<u>7,54</u> 0,007	2226
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	<u>400</u> 0,33	<u>810</u> 0,63	<u>614</u> 0,44	<u>230</u> 0,23	<u>50</u> 0,04	<u>6,32</u> 0,006	2051

Примечание: ¹В числителе приведены значения расхода компонентов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона по массе, кг/м³, в знаменателе – по объему, м³/м³.

Таблица 2

Table 2

Сравнение реологических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Comparison of the rheological properties of fine-grained self-compacting concretes based on natural crushed stone and sand, as well as on the basis of recycled (secondary) crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of secondary (recycled) sand

Тип бетона	Среднее значение распыла смеси, см/марка по удобоукладываемости	Раствороотделение, %/марка по удобоукладываемости	Марка бетонной смеси по вязкости	Текущность смеси/марка по текущести
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	68/PK2	2,7 %/PK1	V2	2,38/T4
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	69/PK2	3,4 %/PK1	V2	2,8/T4

традиционных и вторичных (рециклинговых) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка приведено в табл. 3.

Анализ полученных результатов показал, что:

– прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с ми-

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка выше прочности мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 30 %;

– плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с ми-



Рис. 1. Расплав мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка при определении ее удобоукладываемости

Fig. 1. Spread of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand when determining its workability



Рис. 2. Определение текучести мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 2. Determination of the fluidity of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand



Рис. 3. Расплав мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка при определении ее удобоукладываемости

Fig. 3. Spread of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on recycled (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of secondary (recycled) sand when determining its workability



Рис. 4. Определение текучести мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 4. Determination of the fluidity of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка выше плотности мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 9 %;

- марки по морозостойкости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных

и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка идентичны между собой и соответствуют F₂₀₀;

- марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой

Таблица 3
Table 3

Сравнение основных физико-механических (прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости) характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка
Comparison of the basic physical and mechanical (strength, density, frost resistance, water resistance and abrasion) characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on natural and recycled (secondary) crushed stone and sand using fine fractions of recycled sand as a mineral additive

Тип бетона	Прочность на сжатие, МПа/ класс бетона	Плотность, кг/м³	Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости	Марка по истираемости
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	37,1–40,1/B30	2216	F ₂₀₀	W16	G1
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	27,3–30,6/B22,5	2035	F ₂₀₀	W10	G1

фракции рециклингового (вторичного) песка составляет W16. Марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка составляет W10;

– марки по истираемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с ми-

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка идентичны между собой и соответствуют марке G1.

Общие виды образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе определения их основных физико-механических характеристик приведены на рис. 5–10.



Рис. 5. Общий вид образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм для определения основных физико-механических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Fig. 5. General view of cube samples 100 × 100 × 100 mm to determine the basic physical and mechanical characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand



Рис. 6. Общий вид образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм для определения основных физико-механических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Fig. 6. General view of cube samples 100 × 100 × 100 mm to determine the basic physical and mechanical characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand



Рис. 7. Определение морозостойкости образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 7. Determination of frost resistance of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand



Рис. 8. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка после их испытаний на морозостойкость

Fig. 8. General view of samples made of fine-grained self-seal concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand after testing them for frost resistance



Рис. 9. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе их испытаний на водонепроницаемость

Fig. 9. General view of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand in the process of testing them for water resistance



Рис. 10. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка после их испытаний на водонепроницаемость

Fig. 10. General view of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand after testing them for water resistance

Выводы

1. Реологические свойства (удобоукладываемость, расслаиваемость, вязкость и текучесть) экспериментально подобранных аналогичных по расходу цемента и заполнителей мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей на основе природных и рециклинго-

вых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка практически идентичны и соответствуют требованиям ГОСТ Р 59714-2021 [18].

2. Прочность исследованных мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных за-

полнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет от 37,1 до 40,1 МПа и соответствует классу бетона В30. Прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет от 27,3 до 30,6 МПа и соответствует классу бетона В22,5.

3. Плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет 2216 кг/м³. Плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет 2035 кг/м³.

4. Морозостойкость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке F₁200.

5. Водонепроницаемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке W16. Водонепроницаемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке W10.

6. Истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке G1. Истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке G1.

7. Снижение прочности, плотности и марки по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка по сравнению с аналогичными показателями мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка обуславливается большим (на 7–9 %) водопоглощением рециклинговых щебня и песка по сравнению с природными заполнителями.

8. Мелкие фракции рециклингового песка с удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг пригодны для применения в качестве минеральной добавки для производства самоуплотняющихся бетонов. Мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка по дисперсности, по содержанию вредных примесей, по стойкости к химическому воздействию щелочей

цемента соответствуют требованиям ГОСТ Р 56592-2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» [19]. Для определения механизма и степени проявления или отсутствия активности мелких фракций вторичного (рециклингового) песка необходимо проведение комплекса дополнительных исследований.

9. Исследованные мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны на основе традиционных и рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка (в соответствии с ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» [20]) относятся к бетонам средней прочности (класс прочности при сжатии $B \leq B50$), к тяжелым бетонам (марки по средней плотности более D2000 до D2500), к бетонам средней морозостойкости (марки по морозостойкости более F50 до F300), к бетонам средней и высокой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости от W4 до W12 и более W12), к бетонам низкой истираемости (марка по истираемости G1).

10. Полученные в результате проведенных исследований результаты позволяют констатировать, что рециклинговые щебень и песок, а также мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка (удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг) могут применяться для производства самоуплотняющихся бетонов.

11. Для более широкого применения мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей необходимо провести дальнейшие исследования с целью выявления характеристик долговечности таких бетонов. В связи с тем, что рециклинговый щебень в настоящее время начинает использоваться в различных областях строительной индустрии РФ, а рециклинговый (вторичный) песок с размерами зерен 1–5 мм в строительной индустрии страны практически не используется, весьма перспективными исследованиями являются разработки составов и изучение нормируемых эксплуатационных свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природного щебня и рециклингового (вторичного) песка. Перспективными являются также исследования свойств мелких и ультрамелких фракций вторичного (рециклингового) песка (с размерами зерен менее 1 мм) для их широкого применения в качестве минеральной добавки не только для производства самоуплотняющихся бетонов, но и для производства традиционных бетонов, а также строительных растворов с уменьшением расхода цемента при их изготовлении.

12. При применении в самоуплотняющихся бетонах рециклинговых заполнителей их стоимость (с учетом перерасхода цемента, пластификаторов и воды) по сравнению с самоуплотняющимися бетонами на природных заполнителях ориентировочно будет снижаться на 25–30 %. Использование рециклинговых заполнителей для изготовления «новых» бетон-

ных, а также железобетонных конструкций и изделий соответствует стандартам «зеленого (экологического) строительства» по ресурсосбережению, бережливому производству и энергосбережению. Применение рециклинговых заполнителей при производстве бетонов уменьшает негативное воздействие на окружающую среду за счет безотходности производства и сокращения количества отвалов. Кроме того, повторное применение рециклинговых заполнителей позволит увеличить скорость и объемы строительства зданий и сооружений, что особенно актуально при восстановлении населенных пунктов после природных катастроф и вооруженных конфликтов, в том числе в новых регионах Российской Федерации.

Список литературы

1. Okamura Hajime, Ouchi Masahiro Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003, vol. 1, no. 1, pp. 5–15.
2. Self-Consolidating Concrete: Reported by ACI Committee 237 / American Concrete Institute. April 2007. [Farmington Hills]: ACI, 2007, 32 p.
3. Коровкин М.О., Шестернин А.И., Ерошкина Н.А. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 3. С. 35.
4. Файзрахманова И.И., Халиуллина М.И., Леклу А.Н., Амири О. Использование тонкодисперсных отсевов бетонного лома в цементных композициях для получения строительных растворов // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4. С. 395–401.
5. Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 4. С. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16>
6. Павлов А.В., Коровяков В.Ф. Влияние добавки молотого бетонного лома на кинетику изменения прочности цементно-песчаного раствора // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6879
7. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1–4). Москва: Стандартинформ, 2018.
8. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
9. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2010.
10. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.

11. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
12. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
13. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2018.
14. ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Москва: Стандартинформ, 2021.
15. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2014.
16. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
17. ГОСТ 13087-2018. Бетоны. Методы определения истираемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
18. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия (EN 206:2013+A2:2021, NEQ). Москва: Стандартинформ, 2021.
19. ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
20. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2013.

References

1. Okamura Hajime, Ouchi Masahiro Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003, vol. 1, no. 1, pp. 5–15.
2. Self-Consolidating Concrete: Reported by ACI Committee 237 / American Concrete Institute. April 2007. [Farmington Hills]: ACI, 2007, 32 p.
3. Korovkin M.O., Shesternin A.I., Eroshkina N.A. The use of crushed concrete scrap as filler for self-compacting concrete. *Engineering journal of Don*. 2015, no. 3, p. 35. (In Russian).
4. Faizrakhmanov I.I., Khaliullin M.I., Leklou A.N., Amiri O. Use the fine screenings of concrete waste in a cement composition for producing mortar. *News KSUAE*. 2016, no. 4, pp. 395–401. (In Russian).
5. Naruts V.V., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Use of structural characteristics in self-compacting concrete mix design with recycled concrete aggregates. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020, no. 4, pp. 8–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16>
6. Pavlov A.V., Korovyakov V.F. The influence of the addition of ground concrete scrap on the kinetics of changes in the strength of cement-sand mortar. *Engineering journal of Don*. 2021, no. 3. (In Russian). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6879

7. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications (with Changes No. 1–4). Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
8. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
9. State Standard 24211-2008. Admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).
10. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
11. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
12. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
13. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
14. State Standard 12730.1-2020. Concretes. Methods of determination of density. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
15. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
16. State Standard 12730.5-2018. Concretes. Methods for determination of water tightness. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
17. State Standard 13087-2018. Concretes. Methods of abrasion test. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
18. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications (EN 206:2013+A2:2021, NEQ). Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. State Standard R 56592-2015. Mineral admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
20. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).

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

Замир Узаирович Беппаев✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: beton61@mail.ru

Zamir U. Beppaev✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: beton61@mail.ru

Лидия Хореновна Аствацатурова, старший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Lydia H. Astvatsaturova, Senior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Сергей Алексеевич Колодяжный, научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergei A. Kolodyazhny, Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Сергей Анатольевич Вернигора, младший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey A. Vernigora, Junior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Владислав Владимирович Лопатинский, инженер лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladislav V. Lopatinsky, Engineer of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Е.М. ВИШТОРСКИЙ^{1,2}, И.В. БЕЛОВ^{1,✉}, А.А. ТКАЧЕВ¹

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Тимирязевская ул., д. 49, Москва, 127550, Российская Федерация

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРАМИ

Аннотация

Введение. Обеспечение надежной работы гидротехнических сооружений неразрывно связано с обеспечением прочности и долговечности их конструкций. Для работы гидротехнических сооружений характерны длительные сроки эксплуатации, поэтому обеспечение долговечности является основой надежной эксплуатации сооружений. В современной практике проектирования бетонов существует несколько методов повышения плотности, прочности и влагостойкости бетона, в том числе использование пластифицирующих добавок.

Цель. Изучение текучести цементного теста, модифицированного современными химическими добавками-пластификаторами.

Материалы и методы. В качестве вяжущего материала использован портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н. Для определения показателей текучести цементного теста применялись суперпластификаторы отечественного и импортного производства: BASF MasterGlenium ACE 430, BASF MasterGlenium 808 PAV, Sika Sikament BV 3М, СП Основит Сэйфскрин SPP1. Методика включала комплексный обзор литературных источников, стандартизованных методик определения распыла цементного теста (с помощью прибора Суттарда) и подбора составов.

Результаты. Установлено, что использование эффективных суперпластификаторов в оптимальных дозировках позволяет значительно повысить текучесть цементного теста. Применение BASF MasterGlenium ACE 430 в дозировке 1,5 % увеличивает начальный распыл в 5,5 раза, а через 120 минут диаметр распыла превышает контрольный состав в 4,5 раза. Использование BASF MasterGlenium 808 PAV в дози-

ровке 0,9 % повышает начальный распыл в 2,9 раза, достигая максимума (236 мм) через 60 минут.

Выводы. Применение эффективных суперпластификаторов в оптимальных дозировках позволяет значительно улучшить текучесть цементного теста, что важно для обеспечения качественного бетонирования сложных гидротехнических конструкций. Результаты исследования вносят вклад в развитие технологий повышения надежности и долговечности гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: гидротехнический бетон, портландцемент, суперпластификатор, водоцементное отношение, химическая добавка, текучесть во времени, распыл

Для цитирования: Вишторский Е.М., Белов И.В., Ткачев А.А. Исследование текучести цементного теста для гидротехнического бетона при модифицировании суперпластификаторами // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 45–52. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-45-52](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-45-52). EDN: BPRIUM

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 16.09.2024

Поступила после рецензирования 28.10.2024

Принята к публикации 07.11.2024

E.M. VISHTORSKY^{1,2}, I.V. BELOV^{1,✉}, A.A. TKACHEV¹

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

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

RESEARCHING OF CEMENT PASTE FLUIDITY FOR HYDRAULIC CONCRETE WITH SUPERPLASTICIZERS MODIFICATION

Abstract

Introduction. Ensuring reliable operation of hydraulic structures is inextricably linked with ensuring the strength and durability of their structures. Hydraulic structures are characterized by long service life, therefore ensuring durability is the basis for reliable operation of structures. In the modern implementation of a concrete project, there are several methods for increasing the density, strength and moisture resistance of concrete, incl. the use of plasticizing additives.

Aim. The study of the fluidity of cement paste modified with modern chemical plasticizer additives.

Materials and methods. Portland cement of CEM I 42.5N type was used as a binding material. To determine the fluidity indicators of cement paste, superplasticizers of domestic and imported production were used: BASF MasterGlenium ACE 430, BASF MasterGlenium 808 PAV, Sika Sikament BV 3M, JV Osnovit Safescreen SPP1. The methodology included the comprehensive use of a literature review, standardized methods for determining the spread of cement paste (using the Suttard device) and selection of compositions.

Results. It has been established that the use of effective superplasticizers in optimal dosages can significantly increase the fluidity of cement paste. The use of BASF MasterGlenium ACE 430 at a dosage of 1.5 % increases the initial spread by 5.5 times, and after 120 minutes the diameter of the spread is 4.5 times greater than the control composition. Using BASF MasterGlenium 808 PAV

at a dosage of 0.9 % increases the initial spread by 2.9 times, reaching a maximum of 236 mm after 60 minutes.

Conclusions. The use of effective superplasticizers in optimal dosages can significantly improve the fluidity of cement paste, that is important for ensuring high-quality concreting of complex hydraulic structures. The results of the study contribute to the development of technologies for increasing the reliability and durability of hydraulic structures.

Keywords: hydraulic concrete, Portland cement, superplasticizer, water-cement ratio, chemical admixture, flowability over time, spreading

For citation: Vishtorsky E.M., Belov I.V., Tkachev A.A. Researching of cement paste fluidity for hydraulic concrete with superplasticizers modification. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 45–52. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-45-52](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-45-52). EDN: BPRIUM

Authors contribution statement

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

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 16.09.2024

Revised 28.10.2024

Accepted 07.11.2024

Введение

Обеспечение надежной работы гидротехнических сооружений (ГТС) неразрывно связано с обеспечением прочности и долговечности их конструкций [1]. Для ГТС характерны длительные сроки эксплуатации, поэтому обеспечение долговечности является основой надежной эксплуатации сооружений.

В современной практике проектирования бетонов существует несколько методов повышения плотности, прочности и влагостойкости бетона:

- выбор оптимального фракционного состава заполнителя. При этом соотношение различных фракций заполнителя должно быть таким, чтобы минимизировать пустоты между зернами;

- выбор вяжущего для гидротехнического бетона. При производстве применяют различные виды цемента, такие как портландцемент, пластифицированный цемент, гидрофобный цемент, сульфатостойкий цемент и пуццолановый цемент. Кроме того, рекомендовано использовать активные минеральные добавки, такие как микрокремнезем и зола-унос, в качестве замены части цемента для уменьшения тепловыделения и повышения прочности бетона;

- снижение количества воды и использование пластифицирующих добавок для изменения удобоукладываемости бетонной смеси.

На уменьшение срока службы гидротехнических бетонов в значительной степени влияет неправильное использование минеральных и химических добавок, а также нарушение технологии изготовления, перевозки и укладки смеси. Главным недостатком гидротехнического бетона является его разрушение под воздействием влажности. Основным критерием качества гидротехнического бетона является его

устойчивость к воздействию агрессивной внешней среды. Необходимо также обеспечить минимальное выделение тепла при гидратации портландцемента. Решить эту задачу можно путем использования пластифицирующих добавок [2].

Цель. Исследование текучести цементного теста, модифицированного современными химическими добавками-пластификаторами.

Характеристика материалов и методы исследований. В качестве вяжущего материала принят портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н, выпускаемый АО «ЛИПЕЦКЦЕМЕНТ» (Липецкая область, г. Липецк, улица Ковалева, владение 126 Б), который отвечает требованиям ГОСТ 31108-2020 [3], а также ГОСТ 30515-2013 [4].

При определении показателей текучести цементного теста использованы суперпластификаторы отечественного и импортного производства: BASF MasterGlenium ACE 430, BASF MasterGlenium 808 PAV, Sika Sikament BV 3М, СП Основит Сэйфскрин SPP1.

Методика проведения исследовательских работ включала обзор литературы и анализ ранее выполненных научно-исследовательских работ и практического опыта в данном направлении. Определение показателей расплыва цементного теста выполнялось с помощью прибора Суттарда [5].

Измерение диаметра расплыва цементного теста представлено на рис. 1.

Количество введенного суперпластификатора в цементное тесто принималось в соответствии с рекомендациями производителей. Водоцементное отношение было принято из условий равнозначности расплыва смеси контрольного состава № 1 и составов, включающими суперпластификаторы [6].

Составы цементного теста приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Составы цементного теста
Cement paste compositions

№ состава	В/Ц	Компоненты цементного теста				
		ПЦ, гр	BASF MasterGlenium ACE 430, % от m_c	BASF MasterGlenium 808 PAV, % от m_c	СП Основит Сэйфскрин SPP1, % от m_c	Sika Sikament BV 3М, % от m_c
1	0,32	500	–	–	–	–
2	0,27	500	1,5	–	–	–
3	0,27	500	1	–	–	–
4	0,27	500	–	0,9	–	–
5	0,27	500	–	0,5	–	–
6	0,27	500	–	–	2	–
7	0,27	500	–	–	1	–
8	0,27	500	–	–	–	1
9	0,27	500	–	–	–	0,5



Рис. 1. Измерение диаметра расплыва цементного теста
Fig. 1. Measuring the diameter of the spread of cement paste

Результаты исследования

Согласно полученным данным, результаты которых визуализированы на рис. 1–4, установлено, что начальный расплыв цементного теста контрольного состава № 1 составляет 50 мм, измерения диаметра расплыва через 30 минут выдерживания показывают увеличение диаметра до 125 мм, после этого в течение

следующих 30 минут выдерживания теста диаметр уменьшается до 102 мм. Дальнейшее измерение диаметра расплыва цементного теста: в 90 минут снижается до 95 мм, при измерении в 120 минут – до 72 мм [7].

Изменение диаметра расплыва цементного теста приведено на рис. 2–5.

Введение химической добавки, на основе эфира поликарбоксилата BASF MasterGlenium ACE 430 (состав № 2) в максимальной дозировке 1,5 % от массы цемента, повышает диаметр начального расплыва цементного теста в 5,5 раза ($D = 282$ мм), дальнейшее выдерживание смеси в специальных условиях позволяет отслеживать тенденцию снижения расплыва до 120 минут. При этом диаметр расплыва теста по истечении 120 минут больше диаметра состава № 1 в 4,5 раза и равен 321 мм [8].

Также выявлено, что введение той же самой химической добавки, BASF MasterGlenium ACE 430 (состав № 3) в минимальной дозировке 1 % от массы цемента, повышает диаметр начального расплыва цементной смеси в 5,8 раза ($D = 291$ мм). В течение выдержки в специальных условиях порядка 120 минут с измерением расплыва каждые 30 минут диаметр «лепешки» цементного теста в 120 минут на 3 мм больше начального значения расплыва и равняется 294 мм, что больше диаметра контрольного состава в 4,1 раза [9].

В составе № 4 при использовании суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилата и полиакрила BASF MasterGlenium 808 PAV в максимально-рекомендуемой дозировке 0,9 % от массы цемента начальный диаметр расплыва цементного теста увеличивается в 2,9 раза ($D = 143$ мм) относительно контрольного состава № 1. После выдержки в течение 30 минут диаметр расплыва повышается

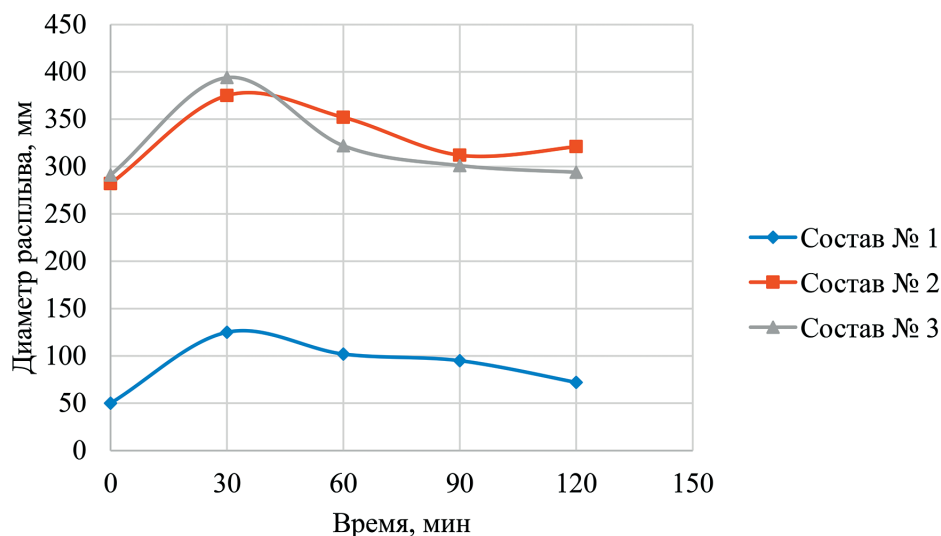


Рис. 2. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы 1, 2, 3)
Fig. 2. Change in the diameter of the cement paste spread over time (compositions 1, 2, 3)

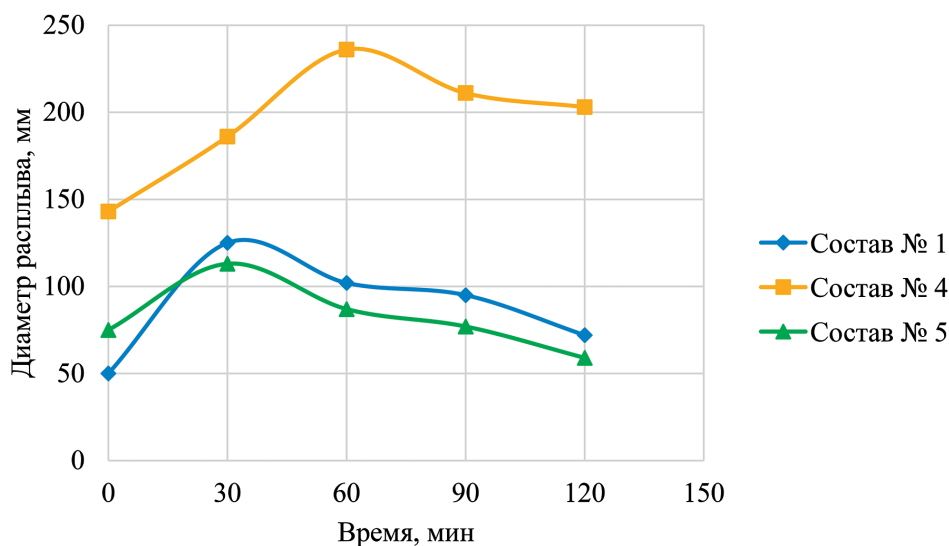


Рис. 3. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы 1, 4, 5)
Fig. 3. Change in the diameter of the cement paste spread over time (compositions 1, 4, 5)

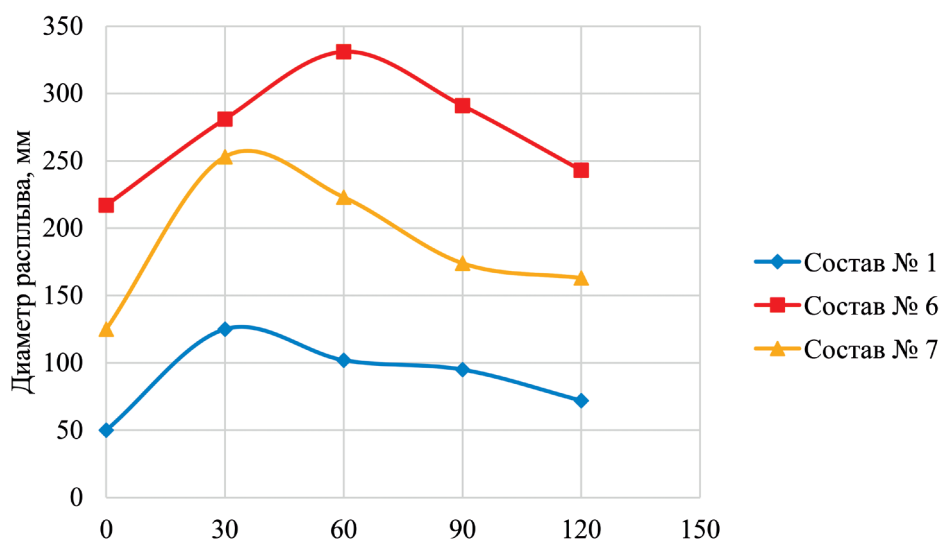


Рис. 4. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы 1, 6, 7)
Fig. 4. Change in the diameter of the cement paste spread over time (compositions 1, 6, 7)

до 186 мм, тем не менее по истечении следующих 30 минут (60 минут) диаметр равен 236 мм. Последующее выдерживание цементного теста до 90 минут снижает диаметр расплыва до 211 мм, а при достижении 120 минут – 203 мм [10].

Исследования показывают, что если ввести этот же суперпластификатор BASF MasterGlenium 808 PAV (состав № 5) в минимальной дозировке 0,5 % от массы цемента, то начальный диаметр расплыва цементной смеси увеличивается относительно начального диаметра контрольного состава всего в 1,5 раза ($D = 75$ мм). При измерении диаметра расплыва цементной смеси через 30 минут показатели вырастают

до 113 мм, что в 2,3 раза больше контрольного состава. Через 60 минут от начала затворения состава диаметр расплыва уменьшается до 87 мм, что в 1,4 раза больше контрольного состава. Результат измерений диаметра расплыва в 90 минут выдерживания состава в 1,5 раза больше и равен 77 мм, а в 120 минут – 59 мм, что показывает увеличение диаметра в 1,2 раза [11].

Установлено, что введение суперпластификатора СП Основит Сэйфскрин SPP1 (состав № 6) в цементное тесто в максимальной дозировке 2 % от массы цемента на начальном этапе в 4,4 раза больше контрольного состава ($D = 217$ мм) сокращает расход

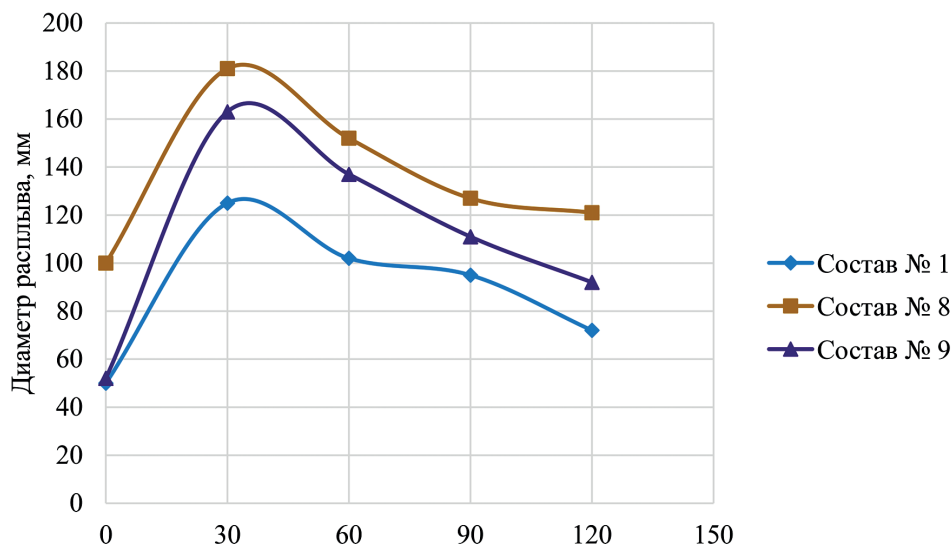


Рис. 5. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы 1, 8, 9)

Fig. 5. Change in the diameter of the cement paste spread over time (compositions 1, 8, 9)

цемента, повышает прочность и долговечность готовой конструкции. В течение первых 30 минут диаметр расплыва увеличивается до 2,3 раза от исходного диаметра расплыва, что равно 281 мм. При достижении 60 минут выдерживания смеси диаметр расплыва цементного теста вырастает до 3,3 раза от диаметра расплыва контрольного состава и составляет 331 мм. По истечении 90 минут диаметр расплыва равен 291 мм, что больше в 3,1 раза диаметра расплыва контрольного состава. На 120 минуте выдерживания теста в специальных условиях с момента затворения диаметр расплыва больше контрольного состава в 3,4 раза от контрольного и составляет 243 мм [12].

Введение того же суперпластификатора СП Основит Сэйфскрин SPP1 (состав № 7), только в минимальной дозировке 1 % от массы цемента, при измерении диаметра расплыва цементной смеси показывает практически такие же значения, как и у контрольного состава. Диаметр расплыва сразу после затворения цементной смеси водой равен 125 мм. После 30 минут выдерживания теста в специальных условиях диаметр расплыва возрастает до 253 мм. Через 60 минут с момента затворения диаметр расплыва равен 223 мм, через 90 минут – 174 мм, а в 120 минут диаметр расплыва цементного теста равен 163 мм.

Применение универсального пластификатора для всех видов работ с бетоном и раствором Sika Sikament BV 3M (состав № 8) в максимальной дозировке 1 % от массы цемента, рекомендуемой производителем, позволяет снизить расход цемента [13]. При измерении диаметра расплыва цементного теста сразу после затворения расплыв больше контрольного состава в 2 раза и равен 100 мм [14]. После 30 минут выдерживания цементного теста в специальных условиях диаметр расплыва увеличивается

в 1,4 раза ($D = 181$ мм). Через 60 минут диаметр понижается до 152 мм, что больше контрольного состава в 1,5 раза. В 90 минут – 127 мм (больше контрольного состава в 1,3 раза). При достижении 120 минут выдерживания диаметр расплыва становится в 1,7 раза больше контрольного состава – 121 мм [15].

Использование того же универсального пластификатора Sika Sikament BV 3M (состав № 9) в минимальной дозировке 0,5 % от массы цемента показывает практически такие же значения, как и у контрольного состава. Диаметр расплыва сразу после затворения портландцемента водой равен 52 мм. Через 30 минут выдерживания теста в специальных условиях диаметр расплыва повышается до значения 163 мм. Через 60 минут с момента затворения диаметр расплыва равен 137 мм, через 90 минут – 111 мм, а в 120 минут диаметр расплыва равен 92 мм.

Выводы

На основании полученных данных наиболее перспективным суперпластификатором является BASF MasterGlenium ACE 430. Введение его в цементное тесто в количестве 1 % от массы цемента позволяет получить диаметр начального расплыва цементной смеси 291 мм.

Следует отметить суперпластификатор BASF MasterGlenium 808 PAV. Его введение в цементное тесто в количестве 0,9 % от массы цемента позволяет получить диаметр начального расплыва цементной смеси 143 мм. Использование этих суперпластификаторов в строительстве и ремонте гидротехнических сооружений позволяет увеличить время подвижности цементного теста, повысить трещиностойкость, удобоукладываемость, морозостойкость. Планируется проведение дальнейших исследований указанных

суперпластификаторов в составе цементного камня, модифицированного сульфодериватной добавкой.

Список литературы

1. Вишторский Е.М., Белов И.В., Назарова А.В. Высокофункциональные цементные бетоны для гидротехнического строительства // *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2023. № 1 (67). С. 49–53.
2. Охапкин Г.В. Обоснование рациональных технических решений по ремонту площадных разрушений бетона гидротехнических сооружений в зоне переменного уровня: автореферат... дисс. канд. техн. наук. Москва, 2019.
3. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
4. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
5. Вороненко М.Э., Скибина А.А., Егорова Е.В., Лахтарина С.В., Петрик И.Ю. Тяжелый бетон для гидротехнических сооружений // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (153). С. 49–53.
6. Коваленко Д.С. Цементные композиты, модифицированные расширяющими добавками // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 1 (141). С. 162–169.
7. Аманбаев А.А. Результаты разработки технологии подводного ремонта железобетонных конструкций ГТС // *Тезисы докладов «Девятая научно-техническая конференция. Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии»*. Санкт-Петербург, 22–24 октября, 2015.
8. Nemova D., Murgul V., Golik A., Chizhov E., Pukhkal V., Vatin N. Reconstruction of administrative buildings of the 70s: the possibility of energy modernization. *Journal of Applied Engineering Science*. 2014, vol. 12 (1), pp. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes12-5610>
9. Stevanovic I., Stanojevic D., Nedic A. Setting the after sale process and quality control at car dealerships to the purpose of increasing clients satisfaction. *Journal of Applied Engineering Science*. 2013, vol. 11 (2), pp. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes11-3821>
10. Вишторский Е.М., Ткачев А.А., Назарова А.В., Коваленко Д.С. Строительные материалы: учебное пособие. Москва: Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. 98 с.
11. Егорова Е.В. Самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональным модификатором на основе отходов промышленности: автореферат... дисс. канд. техн. наук. Макеевка, 2016.
12. Халюшев А.К. Эксплуатационные свойства бетонов на основе модифицированных композици-

онных цементов // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2012. Т. 8. № 3. С. 149–158.

13. Bajenov U.M., Lukutcova N.P., Karpikov E.G. Fine-aggregate concrete have modified by the complex microdisperse additive. *Herald of Moscow State Building University*. 2013, no. 2, pp. 94–100.
14. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов: учебно-практическое пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 386 с.
15. Вишторский Е.М. Назарова А.В. Исследование влияния органоминеральной добавки на основе отхода производства минеральных удобрений на свойства цементного камня // *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2021. № 12 (54). С. 30–33.

References

1. Vishtorsky E.M., Belov I.V., Nazarova A.V. High-performance cement concrete for hydro-engineering construction. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2023, no. 1 (67), pp. 49–53. (In Russian).
2. Okhapkin G.V. Justification of rational technical solutions for the repair of areal destruction of concrete of hydraulic structures in a zone of variable level: abstract... diss. of the Cand. Sci. (Engineering). Moscow, 2019. (In Russian).
3. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
4. State Standard 30515-2013. Cements. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
5. Voronenko M.E., Skibina A.A., Egorova E.V., Lakhtarina S.V., Petrik I.Yu. Heavy concrete for hydraulic structures. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022, no. 1 (153), pp. 49–53. (In Russian).
6. Kovalenko D. Cement composites modified with expanding additives. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020, no. 1 (141), pp. 162–169. (In Russian).
7. Amanbaev A.A. Results of the development of technology for underwater repair of reinforced concrete structures of hydraulic structures. *Abstracts of the reports "The Ninth Scientific and Technical Conference. Hydropower. Hydraulic engineering. New developments and technologies"*. St. Petersburg, October 22–24, 2015. (In Russian).
8. Nemova D., Murgul V., Golik A., Chizhov E., Pukhkal V., Vatin N. Reconstruction of administrative buildings of the 70s: the possibility of energy modernization. *Journal of Applied Engineering Science*. 2014, vol. 12 (1), pp. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes12-5610>

9. Stevanovic I., Stanojevic D., Nedic A. Setting the after sale process and quality control at car dealerships to the purpose of increasing clients satisfaction. *Journal of Applied Engineering Science*. 2013, vol. 11 (2), pp. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes11-3821>
10. Vishtorsky E.M., Tkachev A.A., Nazarova A.V., Kovalenko D.S. Building materials: a textbook. Moscow: Russian State Agrarian University of the Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2024, 98 p. (In Russian).
11. Egorova E.V. Self-compacting concretes with a multifunctional modifier based on industrial waste: abstract... diss. of the Cand. Sci. (Engineering). Makeyevka, 2016. (In Russian).
12. Khaljushev A.K. Exploitation properties of concrete with the modified composite cements. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2012, vol. 8, no. 3, pp. 149–158. (In Russian).
13. Bajenov U.M., Lukutova N.P., Karpikov E.G. Fine-aggregate concrete have modified by the complex microdisperse additive. *Herald of Moscow State Building University*. 2013, no. 2, pp. 94–100.
14. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Computational forecasting of properties and design of concrete compositions: an educational and practical guide. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2016, 386 p. (In Russian).
15. Vishtorsky E.M., Nazarova A.V. Influence of organomineral additives on the basis of waste production of mineral fertilizers on the properties of cement stone. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2021, no. 12 (54), pp. 30–33. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Михайлович Вишторский, канд. техн. наук, доцент кафедры сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости, Российский государственный аграрный университет – МСХА

им. К.А. Тимирязева; доцент кафедры испытаний сооружений, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: vishtorsky@gmail.com

Evgeny M. Vishtorsky, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Agricultural Construction and Real Estate Expertise, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Associate Professor of the Department of Testing Constructions, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: vishtorsky@gmail.com

Игорь Викторович Белов✉, аспирант, ассистент кафедры сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва
e-mail: bivik.1995@yandex.ru

Igor V. Belov✉, Postgraduate Student, Assistant at the Department of Agricultural Construction and Real Estate Expertise, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow
e-mail: bivik.1995@yandex.ru

Александр Анатольевич Ткачев, канд. техн. наук, доцент кафедры сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва
e-mail: tkachevaa@yandex.ru

Aleksandr A. Tkachev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Agricultural Construction and Real Estate Expertise, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow
e-mail: tkachevaa@yandex.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Г.С. СЛАВЧЕВА^{1,✉}, С.Н. ЛАПЫРЕВ²

¹ Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, д. 84,
г. Воронеж, 394006, Российская Федерация

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

ПЕРСПЕКТИВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОЖИДАНИЯ И РЕАЛЬНОСТЬ

Аннотация

Введение. Строительные аддитивные технологии в настоящее время относятся к технологиям формирующихся рынков будущего, то есть технологические решения еще не сформированы, но потенциально способны обеспечить в перспективе значительный объем потребления.

Цель. На основе анализа 20-летнего периода развития науки и практики в области строительных аддитивных технологий выявить основные достижения и нерешенные проблемы, обозначить перспективы развития.

Потенциал аддитивных технологий в строительстве связан с возможностью создания строительных объектов бионического дизайна, который предполагает сочетание свободы внешней формы и организованного внутреннего пространства конструкций объекта, в котором масса материала располагается только по линиям действующих напряжений. Это может обеспечить радикальное снижение массы материала в объеме конструкции, изменить принципы проектирования и строительства.

Практика применения строительных аддитивных технологий в современном строительстве. На основе анализа типичных реализованных проектов показано, что к настоящему времени их внедрение ограничивается малоэтажным жилищным строительством, созданием объектов функционально-декоративного и специального назначения. В настоящее время роботизированный процесс 3D-печати используется только для возведения оболочки вертикальных конструкций строительных объектов, остальные конструкции данных объектов изготавливаются по традиционной технологии бетонного литья, что определяет их высокую стоимость.

Нерешенные проблемы и факторы, сдерживающие внедрение строительных аддитивных технологий, состоят в отсутствии методов проектирования, нор-

мативной базы, эффективных универсальных технологических комплексов, достаточной номенклатуры составов смесей для печати. Представлены подходы к решению данных проблем.

Перспективы развития. К рациональным направлениям внедрения строительных аддитивных технологий на текущем технологическом уровне отнесено следующее: возведение малых строительных объектов, особенно на территориях с суровыми климатическими условиями, где отсутствует развитая база строительной индустрии; внедрение строительных аддитивных технологий в индустриальное домостроение для отделки фасадов зданий; внедрение печати элементов декоративной инфраструктуры жилых комплексов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, строительство, архитектура, проектирование, нормирование, материалы для 3D-печати

Для цитирования: Славчева Г.С., Лапырев С.Н. Перспективы аддитивных технологий в строительстве: ожидания и реальность // Бетон и железобетон. 2024. № 5 (624). С. 53–60. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-53-60](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-53-60). EDN: KOBCF

Вклад авторов

Славчева Г.С. – концепция, анализ и систематизация данных, написание текста статьи.

Лапырев С.Н. – сбор, подготовка и обработка исходных данных.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.10.2024

Поступила после рецензирования 07.11.2024

Принята к публикации 14.11.2024

PROSPECTS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: EXPECTATIONS AND REALITY

Abstract

Introduction. Additive technologies in construction are currently considered to be technologies for emerging future markets, i. e. technological solutions that have not yet been formed but are potentially capable of providing a significant volume of consumption in the future. The aim of this paper is to analyse the 20-year period of science and practice development in the field of additive technologies in construction, to identify the main achievements and unresolved problems, and to outline the prospects for development.

The potential of additive technologies in construction is associated with the possibility of creating bionic design of construction objects, which implies a combination of freeform and organised internal space of object structures, in which the mass of material is located only along the lines of load. This can lead to a radical reduction of material mass in the volume of the structure and change the principles of design and construction.

The practice of application of construction additive technologies in modern construction. On the basis of the analysis of typical implemented projects it is shown that its introduction so far is limited to low-rise housing construction, creation of objects of functional-decorative and special purpose. At present, the robotic process of 3D printing is used only for the construction of the shell of vertical structures of building objects; other structures of these objects are made by the traditional technology of concrete casting, which determines their high cost.

Unresolved problems and factors hindering the introduction of construction additive technologies consist in the lack of design methods, regulatory framework, effective universal technological complexes, sufficient nomenclature

of mixtures for printing. Approaches to solving these problems are presented.

Development prospects. The rational directions of introduction of building additive technologies at the present technological level are: construction of small building objects, especially in territories with severe climatic conditions, where there is no developed base of building industry; introduction of building additive technologies in industrial house-building for finishing of building facades and printing of elements of decorative infrastructure of residential complexes.

Keywords: additive technologies, construction, architecture, design, standardization, 3D printable materials

For citation: Slavcheva G.S., Lapyrev S.N. Prospects of additive technologies in construction: expectations and reality. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 53–60. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-53-60](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-53-60). EDN: KOBCF

Authors contribution statement

Slavcheva G.S. – concept, data analysis and systematization, writing the text of the article.

Lapyrev S.N. – collection, preparation and processing of initial data.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.10.2024

Revised 07.11.2024

Accepted 14.11.2024

Введение

Согласно постановлению Правительства РФ от 14.07.2021 г. об утверждении «Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.» [1], строительные аддитивные технологии (АТ) квалифицированы как технологии для рынков будущего, то есть технологические решения еще не сформированы, но потенциально способны обеспечить значительный объем потребления в перспективе. Строительные АТ (3D-печать) – это разновидность аддитивного производства, определяемая в ПНСТ 495-2020 [2] как «процесс возведения конструкций зданий и сооружений, основанный на создании объекта строительства по электронной геометрической модели путем добавления материала для аддитивного строительного производства, как правило, слой за слоем».

Жизненный цикл 3D-печати включает стадии, аналогичные стадиям жизненного цикла традиционного строительства:

- проектирование строительных объектов в зависимости от назначения;
- технологический процесс строительства;
- эксплуатация строительных объектов в различных условиях.

Принципиальные отличия от традиционных имеют проектная и технологическая стадии, которые включают создание цифровой 3D-модели строительного объекта, «разрезание» ее на 2D-слои с использованием соответствующего программного обеспечения, программирование работы исполнительного механизма для последовательного нанесения слоев материала при роботизированном возведении строительного объекта в соответствии с его 3D-моделью. Потенциал и условия реализации аддитивных технологий в строительстве делятся на следующие составляющие [3–5]:

– архитектура и проектирование объектов применительно к возможностям и особенностям данной технологии;

– создание оборудования и технологических комплексов;

– создание материалов, адаптированных к технологическим условиям печати и эксплуатации в тонких слоистых 3D-печатных конструкциях.

Период развития науки и практики в области строительных АТ составляет уже более 20 лет, поэтому настало время подвести некоторые итоги и попытаться оценить достижения и проблемы.

Потенциал аддитивных технологий в строительстве

В начале становления данных технологий позиционировались их новые возможности, которые трудно реализовать традиционными строительными методами:

– архитектура и проектирование: свобода формы конструкций и зданий, создание изогнутых элементов любой конфигурации, создание пустотелых конструкций заданной внутренней структуры;

– оборудование и технологические комплексы: автоматизация и роботизация строительных процессов, отказ от опалубки и форм, сокращение затрат энергии, труда, сроков строительства;

– материалы: изготовление на одном и том же оборудовании различной их номенклатуры непосредственно на стройплощадке, использование широкого спектра сырьевых материалов.

Предполагалось, что развитие и внедрение аддитивных технологий принципиально изменят архитектурный облик зданий, типологию конструкций, позволят роботизировать все строительные процессы, включая отделочные работы и установку инженерных систем (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Возможности аддитивных технологий в строительстве (по материалам семинара «Freeform Construction», Великобритания, Loughborough University, 29.07.2005) [6]
The possibilities of additive technologies in construction (based on the materials of the Freeform Construction seminar, Great Britain, Loughborough University, 07.29.2005) [6]

Элемент архитектурно-строительной системы		Возможности 3D-аддитивных технологий
Проектирование		Индивидуальный эргономичный дизайн (нет более прямых линий и углов!)
Несущие и ограждающие конструкции	структура	Свободное создание внутренней структуры в объеме конструкции
	форма	Свобода формы (создание изогнутых элементов любой конфигурации)
Отделка		Совмещение процесса возведения здания и его отделки, роботизация процесса отделки, вариативность дизайна и повышение точности контроля качества отделки
Системы остекления		Структурные системы остекления
Инженерные системы		Совмещение процесса возведения здания и прокладки инженерных сетей, уменьшение количества соединительных элементов

Таким образом, на начальном этапе становления строительных АТ существовало представление, что данные технологии совершат переворот в строительстве за счет существенного снижения стоимости строительных объектов путем роботизации и, как результат, сокращения сроков строительства, снижения материалоемкости и трудозатрат.

Практика применения строительных АТ в современном строительстве

Реализация аддитивных технологий к настоящему времени ограничивается малоэтажным жилищным строительством, созданием объектов функционально-декоративного и специального назначений.

Типичным является возведение одноэтажных жилых домов по индивидуальным проектам и массовой застройки площадью 40–200 м² непосредственно на строительной площадке. Наиболее значимые проекты печати домов реализованы компаниями ICON (США) [7], Contour Crafting (США) [8], Andrei Rudenko (США) [9], «АМТ-Спецавиа» [10], «ЗД СТРОЙ» (Россия) [11], WinSun (Китай) [12].

По данным компаний, по сравнению с традиционным способом строительства снижение себестоимости 1 м² жилья составило 25–30 %, экономия материалов – 20–60 %, экономия трудозатрат – 45–55 %, за счет роботизации строительных процессов уменьшение веса конструкций – 30–50 %. Однако на сайтах компаний указанные данные представлены без базы для сравнения. Одновременно умалчивается, что в настоящее время роботизированный процесс 3D-печати возможно использовать только для возведения оболочки вертикальных конструкций строительных объектов (стен, колонн). За исключением стен и колонн, остальные конструкции данных объектов (перекрытия, балки, лестницы и т. д.) изготавливаются по традиционной технологии бетонного литья.

Типичными 3D-печатными объектами функционально-декоративного назначения являются элементы городской инфраструктуры, а также элементы декора фасадов. Их производство реализовано как в построечных, так и в производственных условиях. В построечных условиях реализована печать павильонов, садово-парковых объектов, малых архитектурных форм компаниями Branch Technology [13] (США), Contour Crafting (США) [8] и др.

В производственных условиях 3D-печать довольно массово используется для создания малых архитектурных форм (скамеек, вазонов, других арт-объектов благоустройства), а также элементов декора фасадов. Наиболее интересными являются проекты компаний WinSun (Китай) [12], Bruil (Нидерланды) [14]. Данные компании разработали и производят фасадные панели ограждения балконов, отличающиеся оригинальным бионическим дизайном.

Главным преимуществом использования строительных АТ для создания объектов функционально-де-

коративного назначения является уникальность дизайна каждого изделия или строительного объекта. При этом очевидно, что, в отличие от традиционной технологии бетонного литья, при 3D-печати нет необходимости в формах и опалубке, отсюда неограниченность номенклатуры декоративных объектов и изделий. Их можно изготавливать в соответствии с запросами клиента без дополнительных затрат на переналадку линии, без затрат на содержание парка форм. Одновременно возможность печати пустотелых конструкций существенно снижает материалоемкость изделий и конструкций по сравнению с аналогичными полнотелыми конструкциями, изготовленными традиционным бетонным литьем. При толщине печатного слоя 3–5 см объем бетона составляет не более 20 % от геометрического объема изделий.

Применительно к задачам специального строительства реализованы отдельные пилотные проекты.

Компания CyBe (Нидерланды) реализовала проекты изготовления канализационных люков индивидуального дизайна, элементов искусственных пустотелых рифов [15]. Компанией Andrei Rudenko (США) прорабатывается проект возведения башен для солнечных и ветровых энергетических установок в построечных условиях, изготовления элементов тяговых градилен, ветряных турбин [9]. Компания XtreeE (Франция) специализируется на цеховой печати изделий и конструкций [16]. Реализованы проекты печати элементов мостового настила, колец туннеля с последующей сборкой их на строительной площадке, напечатано 37 элементов искусственных рифов. Компания WASP (Италия) специализируется на печати в построечных условиях купольных объектов площадью 50–100 м², которые могут блокироваться друг с другом. Напечатанные ограждающие конструкции являются пустотелыми, при возведении объектов используются местные глиняные грунты, что приводит к существенной экономии затрат на материалы [17]. Компания ICON (США) реализовала проекты печати объектов военного назначения, казарм, учебных тренировочных центров [7].

Для перечисленных проектов в качестве главных преимуществ использования строительных АТ, по сравнению с традиционными способами строительства, компании выдвигают высокую скорость возведения объектов, их модульность, пустотелость конструкций, возможность использования местных сырьевых материалов.

Таким образом, можно констатировать, что за 20-летний период существования аддитивные строительные технологии нашли ограниченное применение в практике строительства, реализованы отдельные пилотные проекты в обозначенных сферах применения.

Нерешенные проблемы и факторы, сдерживающие внедрение строительных АТ

Архитектура и проектирование. Существующие и нормированные методы расчета и проектирова-

ния предназначены для полнотелых конструкций традиционных зданий, сооружений. В традиционных нормированных методах расчета строительных конструкций (СП 63.13330.2018 [18]) по предельным состояниям первой и второй групп конструкция рассматривается как полнотелая, в расчет включается все сечение конструкции. Методы расчета и проектирования пустотелых 3D-печатных конструкций отсутствуют. Именно отсутствие данных методов и соответствующих строительных норм является одним из главных факторов, сдерживающих массовое применение строительных АТ.

Дополнительным фактором сдерживания является противоречие между сложившимися потребительскими стереотипами об облике зданий и зданиями бионического дизайна (свободной формы, без прямых углов и линий), которые потенциально возможно возводить с использованием АТ. Достаточно сложно определить и предсказать потребность рынка в строительных объектах нетрадиционной бионической типологии.

Оборудование, технологические процессы. Существующие технологические комплексы не могут обеспечить возведение на одном и том же оборудовании строительных объектов и конструкций из широкой гаммы материалов. 3D-печать в строительных объектах используется только для возведения оболочки вертикальных конструкций, преимущественно стен, армирование и отделка которых осуществляется традиционным ручным способом.

Низкая эффективность технологических комплексов обусловлена:

- отсутствием серийно производимых смесителей, обеспечивающих получение высоковязкой, однородной смеси (используются типовые смесители для подвижных бетонов и растворов);
- отсутствием систем эффективной перекачки высоковязкой смеси (используются типовые насосы для подвижных бетонов и растворов);
- не предусмотрена возможность переналадки и доукомплектования различными исполнительными механизмами, например для финишной отделки, печати различными смесями.

Не решена проблема армирования. Реальные реализованные проекты строительства с использованием АТ армировались вручную. Имеющиеся пилотные проекты создания роботов-арматурщиков предусматривают, что в процессе печати потребуются две разные установки: одна для печати арматуры или для вставки арматурных элементов в экструдированный слой, а другая непосредственно для печати бетона, что значительно увеличит стоимость комплексов для печати и эксплуатационные расходы. В настоящее время роботы-арматурщики для строительных АТ созданы в исследовательской лаборатории Gramazio Kohler Research (Швейцария), их применение находится на стадии пилотной реализации [19].

Проблемой масштабирования технологии также является высокая цена крупноформатных принтеров, их низкая мобильность, большие затраты на их монтаж, эксплуатацию и обслуживание.

Материалы. Несмотря на то что это наиболее исследованный компонент строительных АТ, не решены следующие проблемы:

- Используются мелкозернистые и микрозернистые смеси с высоким расходом вяжущего. Это увеличивает стоимость материала, увеличивает вероятность усадки и растрескивания строительных конструкций.
- Не решены вопросы физико-климатической стойкости, долговечности строительных 3D-печатных объектов. В тонких слоях напечатанных конструкций деградация в результате силовых и физико-климатических воздействий может протекать иначе, чем в традиционных полнотелых массивных конструкциях. Кроме того, особенности послойного формирования структуры 3D-печатных объектов могут приводить к возникновению межслойных эффектов, существенно влияющих на их механическое поведение, физико-климатическую стойкость и долговечность.

Несовершенство нормативной базы. Как указывалось выше, главной проблемой, сдерживающей расширение применения строительных АТ, является отсутствие принципиально новых способов и, соответственно, норм проектирования пустотелых конструкций с учетом их слоистости. Решение данной проблемы необходимо, чтобы перейти от традиционных полнотелых армированных строительных конструкций к пустотелым конструкциям, в которых материал будет располагаться только по линиям действующих напряжений, а его объем будет составлять не более 10–20 % от объема конструкции.

Одновременно отсутствуют единые нормативные требования к свойствам смесей и композитов в жизненном цикле 3D-печати, методам их испытаний, которые учитывали бы особенности технологического процесса и структуры слоистых материалов. Существующие ГОСТы на методы испытаний всех свойств бетонов основаны на применении в испытаниях монолитных образцов. Слоистые 3D-печатные композиты имеют существенную анизотропию свойств вдоль и поперек слоев. Поэтому эксплуатационное поведение печатных композитов может существенно отличаться от такого поведения традиционных бетонов монолитной структуры. Это необходимо учитывать и нормировать для проведения испытаний. Также слоистость структуры и анизотропию свойств принципиально важно учесть при определении параметрических рядов и нормировании расчетных характеристик, используемых при проектировании конструкций.

Отсутствуют нормированные методы технологического контроля и управления качеством, учитывающие особенности строительных АТ. Они должны быть разработаны, чтобы обеспечить стабильные

и надежные свойства печатных элементов, необходима их совместимость с существующими строительными нормами.

Таким образом, пока еще не существует единой оптимальной системы, регулирующей весь жизненный цикл строительных АТ «проектирование – производство – эксплуатация». Вместо этого в каждом конкретном случае используется набор решений, каждое из которых обусловлено типом и размером строительного объекта, местом применения (строительная площадка или заводские условия). В результате, несмотря на популистские утверждения компаний, работающих в области строительных АТ, качество и долговечность 3D-печатных объектов уступают объектам, возводимым по традиционным строительным технологиям при сопоставимой стоимости, затратах труда и времени.

Результатом является отсутствие интереса у крупных промышленных застройщиков к данной технологии. Одновременно и крупные машиностроительные компании не заинтересованы вкладывать интеллектуальные и материальные ресурсы в разработку технологических комплексов для печати из-за низкой емкости рынка.

Пути решения проблем и перспективы

На текущем уровне развития и технологических возможностей эффективным может быть использование АТ для малых строительных объектов, где не требуется значительное армирование и одновременно могут быть необходимы сложная геометрия и пустотелость. К таким объектам относятся:

- одноэтажные здания площадью до 100 м² купольного типа;
- элементы обустройства (стойки, элементы резервуаров и тоннелей, подпорные стены);
- элементы гражданской декоративной инфраструктуры (малые архитектурные формы, ограждения и т. д.);
- элементы декора фасадов зданий.

Строительные АТ могут быть эффективными для применения на территориях с суровыми климатическими условиями, а также там, где отсутствует развитая база строительной индустрии и имеется запрос на гибкие, мобильные, роботизированные «безлюдные» технологии.

При этом важно подчеркнуть, что имеется возможность внедрения строительных АТ в промышленное домостроение для отделки фасадов зданий и печати элементов декоративной инфраструктуры жилых комплексов. Для этого не требуется существенная переналадка технологических линий, возможно использование действующих смесительных узлов и линий доставки смесей. Необходима только организация поста 3D-печати для отделки фасадов и (или) печати малых архитектурных форм. При этом можно реализовать индивидуальные проекты комплексного

дизайна каждого жилого комплекса без дополнительных затрат.

Для расширения технологических возможностей и области применения строительных АТ на практике нуждаются в проработке и последующем нормировании следующие группы первоочередных вопросов:

– *Разработка новых методов расчета и проектирования* бионических пустотелых 3D-печатных конструкций с заданной несущей способностью. Если будет решен данный принципиальный вопрос, то в долгосрочной перспективе возможно использование АТ для создания всех конструкций зданий и сооружений со значительным снижением их массы.

– *Совершенствование нормативной базы.* Определение требований и нормирование технологических характеристик смесей для 3D-печати, процедур контроля их приготовления, методов испытаний и контроля их качества. Определение требований и нормирование к методам испытаний физико-механических и деформативных свойств слоистых 3D-печатных композитов. Определение требований и нормирование комплекса расчетных характеристик 3D-печатных композитов.

– *Разработка технологических комплексов* для 3D-печати, отвечающих требованиям:

- универсальности, то есть печати широкой номенклатуры конструкций из различных смесей;
- открытой архитектуры, то есть возможности переналадки и доукомплектования;
- мобильности.

Таким образом, для реализации обозначенного 20 лет назад потенциала строительных аддитивных технологий нужна системная целенаправленная работа и взаимодействие проектировщиков, строителей, материаловедов-технологов, машиностроителей. Только на этой основе достижимо расширение технологических возможностей и области применения АТ, повышение качества печатных объектов, снижение их стоимости.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ об утверждении «Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.» от 14 июля 2021 г. № 1913-р.
2. ПНСТ 495-2020. Строительные работы и типовые технологические процессы. Аддитивные технологии. Применение трехмерной печати (3D-ПЕЧАТЬ) в строительстве. Общие требования. Москва: Стандартинформ, 2009.
3. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
4. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed NoorMohamed, Ming Jen Tan, Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and

- construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017, no. 12 (3), pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
5. Boss F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016, no. 11 (3), pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
 6. Buswell R.A., Soar R., Gibb A., Thorpe A. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*. 2007, no. 16 (2), pp. 224–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
 7. “ICON”: сайт. URL: <https://www.iconbuild.com/projects> (дата обращения: 01.10.2024).
 8. “Contour Crafting Corporation”: сайт. URL: <https://www.contourcrafting.com/building-construction> (дата обращения: 01.10.2024).
 9. “TOTAL KUSTOM”: сайт. URL: <http://www.totalkustom.com> (дата обращения: 01.10.2024).
 10. Группа компаний «АМТ»: сайт. URL: <http://www.specavia.pro> (дата обращения: 01.10.2024).
 11. «3Д СТРОЙ»: сайт. URL: <https://3dconstruction.ru> (дата обращения: 01.10.2024).
 12. “WinSun”: сайт. URL: <http://www.yhbm.com> (дата обращения: 01.10.2024).
 13. “Branch Technology”: сайт. URL: <https://branchtechnology.com/projects/> (дата обращения: 01.10.2024).
 14. “Bruil”: сайт. URL: <http://www.bruil.nl> (дата обращения: 01.10.2024).
 15. “CyBe Construction”: сайт. URL: <http://www.cybe.eu> (дата обращения: 01.10.2024).
 16. “XtreeE@”: сайт. URL: <http://www.xtreee.com> (дата обращения: 01.10.2024).
 17. “WASP”: сайт. URL: <http://www.wasproject.it> (дата обращения: 01.10.2024).
 18. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2020.
 19. “Gramazio Kohler Research”: сайт. URL: <http://www.gramaziokohler.arch> (дата обращения: 01.10.2024).
 - 2021, no. 5, pp. 28–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
 4. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed NoorMohamed, Ming Jen Tan, Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017, no. 12 (3), pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
 5. Boss F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016, no. 11 (3), pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
 6. Buswell R.A., Soar R., Gibb A., Thorpe A. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*. 2007, no. 16 (2), pp. 224–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
 7. “ICON”: website. URL: <https://www.iconbuild.com/projects> (accessed: 01 October 2024).
 8. “Contour Crafting Corporation”: website. URL: <https://www.contourcrafting.com/building-construction> (accessed: 01 October 2024).
 9. “TOTAL KUSTOM”: website. URL: <http://www.totalkustom.com> (accessed: 01 October 2024).
 10. AMT Group of Companies: website. URL: <http://www.specavia.pro> (accessed: 01 October 2024).
 11. “3D SYSTEM”: website. URL: <https://3dconstruction.ru> (accessed: 01 October 2024).
 12. “WinSun”: website. URL: <http://www.yhbm.com> (accessed: 01 October 2024).
 13. “Branch Technology”: website. URL: <https://branchtechnology.com/projects/> (accessed: 01 October 2024).
 14. “Bruil”: website. URL: <http://www.bruil.nl> (accessed: 01 October 2024).
 15. “CyBe Construction”: website. URL: <http://www.cybe.eu> (accessed: 01 October 2024).
 16. “XtreeE@”: website. URL: <http://www.xtreee.com> (accessed: 01 October 2024).
 17. “WASP”: website. URL: <http://www.wasproject.it> (accessed: 01 October 2024).
 18. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
 19. “Gramazio Kohler Research”: website. URL: <http://www.gramaziokohler.arch> (accessed: 01 October 2024).

References

1. Order of the Government of the Russian Federation on the approval of the “Strategy for the development of additive technologies in the Russian Federation for the period up to 2030” dated July 07, 2021 No. 1913-r. (In Russian).
2. PNSt 495-2020. Construction works and typical technological processes. Additive technologies. The use of three-dimensional printing (3D PRINTING) in construction. General requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2009. (In Russian).
3. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*.

Информация об авторах / Information about the authors

Галина Станиславовна Славчева[✉], д-р техн. наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет, Воронеж
e-mail: gslavcheva@yandex.ru
тел.: +7 (960) 132-94-75

Galina S. Slavcheva✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structure, Voronezh State Technical University, Voronezh
e-mail: gslavcheva@yandex.ru
tel.: +7 (960) 132-94-75

Сергей Николаевич Лапырев, руководитель направления индустриальных технологий, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lapirev@gmail.com
тел.: +7 (495) 777-88-55

Sergey N. Lapyrev, Head of the Industrial Technology Department, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lapirev@gmail.com
tel.: +7 (495) 777-88-55

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

В.Р. ФАЛИКМАН¹, Н.С. ДМИТРИЕВ^{1,2,✉}

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

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

КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ БЕТОНА К КАРБОНИЗАЦИИ

Аннотация

Основная часть. В статье рассмотрены рекомендации по предварительной подготовке и выдержке образцов, приведенные в существующих отечественных и зарубежных стандартах испытаний карбонизации бетонов. Условия воздействия ускоренной карбонизации влияют на механизм процессов и степень изменений, которые испытывает материал. В будущих итерациях стандартов приоритетным должно стать понятие «индекса зрелости». Необходимо обеспечить прямое сравнение результатов различных исследований и улучшить понимание того, как внутренние свойства отдельных видов бетона связаны с их устойчивостью к карбонизации, определить принципы точного перевода скоростей карбонизации при ускоренных испытаниях в скорости карбонизации в естественных условиях для различных типов бетона. В статье рассмотрены подходы к проектированию долговечности железобетонных конструкций, основанные на предписывающих и эксплуатационных характеристиках. Часто прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжатие в бетонах с минеральными добавками не выявляется, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются при ускоренных испытаниях. Поэтому модели деградации таких бетонов под воздействием углекислого газа при полувероятностных, вероятностных расчетах и оценке срока службы нуждаются в определенном уточнении.

Выводы. Существующие стандарты на определение глубины карбонизации имеют значительные отличия друг от друга, в частности в вариантах подготовки образцов, условий твердения, условиях при испытании в камере карбонизации. Это приводит к различным результатам при испытаниях по разным стандартам. Подход к оценке долговечности и сроков службы железобетонных конструкций на основе эксплуатационных характеристик можно считать важным продвижением

в проектировании конструкционного бетона. В настоящее время ограничения в этом подходе связаны с тем, что различные процессы разрушения, влияющие на поведение железобетонных конструкций, изучены не полностью и описаны не во всех необходимых деталях, лабораторные методы испытаний не всегда отражают реальные условия эксплуатации, а изменение качества бетона в пределах конструкции определяется неоднородностью и анизотропией свойств, наличием дефектов, зависящими от времени параметрами (усадка, ползучесть) и другими вероятностными факторами.

Ключевые слова: бетон, карбонизация, активная минеральная добавка, гидроксид кальция, карбонат кальция, коррозия стальной арматуры, влажность, условия твердения

Для цитирования: Фаликман В.Р., Дмитриев Н.С. Критический обзор стандартизированных методов испытаний для определения стойкости бетона к карбонизации // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 61–68. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-61-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-61-68). EDN: PJWLVC

Вклад авторов

Фаликман В.Р. – постановка задачи, подбор литературы для анализа, обобщение и систематизация результатов.

Дмитриев Н.С. – анализ материалов, подготовка и оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 16.10.2024

Поступила после рецензирования 26.11.2024

Принята к публикации 28.11.2024

CRITICAL REVIEW OF STANDARDIZED TEST METHODS FOR DETERMINING THE CARBONATION RESISTANCE OF CONCRETE

Abstract

Principal part. The article considers the recommendations on preliminary preparation and curing of specimens given in the existing domestic and foreign standards of concrete carbonization tests. The conditions of exposure to accelerated carbonization affect the mechanism of processes and the degree of changes that the material will experience. The concept of “maturity index” should be prioritized in future iterations of standards. There is a need to provide direct comparison of the results of different studies and to improve the understanding of how the internal properties of individual concrete types relate to their resistance to carbonation, to define principles for accurately translating carbonation rates in accelerated tests into natural carbonation rates for different types of concrete. Prescriptive and performance-based approaches to durability design of reinforced concrete structures are reviewed in this article. Often a direct correlation between carbonization ratio and compressive strength in concretes with mineral additives is not revealed, especially when the performance characteristics are determined by accelerated tests. Therefore, models of degradation of such concretes under the influence of carbon dioxide in semi-probabilistic, probabilistic calculations, and service life assessment need some refinement.

Conclusions. The existing standards for carbonation depth determination have significant differences from each other, in particular in the variants of specimen preparation, curing conditions, conditions during testing in the carbonation chamber. This leads to different results when tested to different standards. The performance-based approach to assessing the durability and service life of reinforced concrete structures can be considered an important advancement in structural concrete design.

At present, the limitations in this approach are due to the fact that the various failure processes affecting the behavior of reinforced concrete structures are not fully studied and described in all necessary details, laboratory test methods do not always reflect the actual operating conditions, and the variation of concrete quality within a structure are determined by the heterogeneity and anisotropy of properties, the presence of defects, time-dependent parameters (shrinkage, creep), and other probabilistic factors.

Keywords: concrete, carbonization, active mineral additive, calcium hydroxide, calcium carbonate, corrosion of steel reinforcement, humidity, curing conditions

For citation: Falikman V.R., Dmitriev N.S. Critical review of standardized test methods for determining the carbonation resistance of concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 61–68. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-61-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-61-68). EDN: PJWLVC

Authors contribution statement

Falikman V.R. – problem statement, selection of references for analysis, summarizing and systematizing results obtained.

Dmitriev N.S. – analysis of materials, preparation and drafting of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 16.11.2024

Revised 26.11.2024

Accepted 28.11.2024

Введение

Одним из распространенных видов агрессии, которой повсеместно подвергаются бетоны, конструкции и изделия на основе различных цементных вяжущих, является карбонизация. Под термином «карбонизация» понимают химический процесс, при котором углекислый газ из атмосферы взаимодействует с гидроксидом кальция, содержащимся в бетоне, превращая его в карбонат кальция. Этот процесс приводит к снижению pH поровой жидкости бетона с его изначально щелочного значения (около 12–13) до более нейтрального. По мере прогрессирования карбонизации и снижения уровня pH защитный слой бетона становится менее стойким, что увеличивает риск коррозии стальной арматуры. Карбонизация бетона происходит со временем и может ускоряться при наличии определенных условий, таких как высокая влажность, повышенная концентрация углекислого газа в воздухе и наличие трещин в бетоне, оказывая негативное влияние на долговечность и прочность железобетонных конструкций, особенно тех, которые подвергаются значительным нагрузкам и другим видам агрессивных внешних воздействий.

Несмотря на обширные знания в области цементных систем, полученные за последние десятилетия, среди исследователей отсутствует консенсус в том, как следует оценивать карбонизацию бетона. Об этом свидетельствует тот факт, что для этой цели предлагается множество стандартизированных на сегодня методик испытаний. Между ними существуют заметные различия, которые не могут не отразиться на изменчивости получаемых результатов. Поэтому

методы ускоренных испытаний на карбонизацию следует рассматривать только с целью сопоставления характеристик карбонизации бетонов, испытанных в сопоставимых условиях.

Предварительная подготовка и условия твердения образца заметно влияют на зрелость вяжущих фаз, степень гидратации портландцемента и скрытые гидравлические и пуццолановые реакции, а значит, на количество образовавшихся гидратов, состав поровой жидкости и структуру пор. Это будет особо значимо для бетона с некоторыми активными минеральными добавками, поскольку хорошо известно, что они обычно демонстрируют более позднее развитие прочности по сравнению с обычным портландцементным бетоном [1, 2]. Любые различия в методах и продолжительности твердения или условия предварительного кондиционирования будут влиять на измеренную карбонизационную стойкость материала.

Основная часть

Хотя в различных стандартах (табл. 1) или в опубликованных исследованиях указаны самые разные методы и условия твердения или предварительной подготовки образцов, включая твердение в воде, влажное твердение, твердение на воздухе, герметичное твердение, твердение в ванне с насыщенной известью, термовлажностную обработку и даже использование отверждающих составов, в литературе, как показано в [3, 4], имеется очень мало исследований о влиянии типов твердения на стойкость к карбонизации.

Таблица 1
Table 1

Избранные примеры рекомендаций по выдержке и предварительной подготовке образцов, включенные в существующие стандарты испытаний карбонизации.

Четкое различие между испытаниями на естественную или ускоренную карбонизацию включено в таблицу (если это указано в стандартах)

Selected examples of recommendations for curing and pre-conditioning of specimens included in existing carbonation test standards. A clear distinction between natural or accelerated carbonation tests is included in the table (if indicated in the standards)

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
ГОСТ 31383-2008, п. 6	Бетонные образцы проектного возраста устанавливают в камеру карбонизации на этажерку, закрывают камеру, включают вентилятор. Образцы выдерживают в камере при относительной влажности воздуха (75 ± 3) % и температуре (20 ± 5) °C до установления постоянной массы. Момент установления постоянной массы определяют периодическим взвешиванием (один раз в трое суток). Масса считается постоянной, если между отдельными взвешиваниями она изменяется не более чем на 0,1 %	[5]
BSI 1881-210:2013	Два бетонных куба выдерживают в лабораторной воздушной среде в течение 14 дней перед герметизацией верхней, нижней и двух противоположных боковых граней. После герметизации всех граней, кроме двух, кубы помещают в камеру хранения на период не менее 70 дней. При испытании в более чем одном возрасте призмы выдерживают в лабораторной воздушной среде в течение 14 дней перед герметизацией верхней, нижней и двух торцевых граней. После герметизации всех граней, кроме двух продольных, призмы помещают в камеру хранения на общий период испытания не менее 70 дней	[6]

Продолжение таблицы 1

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
EN 13295:2004	Образцы твердеют в формах, покрытых пластиковой пленкой, в течение 24 часов. Затем они дополнительно хранятся в течение 27 дней под водой при температуре $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Боковые стороны образцов не должны содержать загрязняющих веществ (например, средств для извлечения из формы), которые могут повлиять на скорость карбонизации. Предварительная подготовка осуществляется путем хранения образцов при температуре $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ при относительной влажности $(60 \pm 10) \%$ до тех пор, пока изменение массы в течение 24 часов не станет менее 0,2 % по крайней мере на протяжении 14 дней	[7]
CUR-Aanbeveling 48:2010	<i>Естественная карбонизация.</i> На трехдневных образцах парафин наносится в три слоя на две торцевые стороны (лицевую и противоположную). Сразу после нанесения парафина образцы должны быть выдержаны в лабораторной атмосфере при температуре $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и при относительной влажности воздуха $(65 \pm 5) \%$ до момента испытания. <i>Ускоренная карбонизация.</i> В возрасте 28 дней образцы извлекают из водяной бани и немедленно оставляют на 14 дней при температуре $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(65 \pm 5) \%$. После этого на каждый образец наносят парафин в три слоя на две торцевые стороны (лицевую и противоположную)	[8]
EN 12390-12:2020	В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят в лабораторную среду для сушки воздухом $(18-25 ^\circ\text{C}$, относительная влажность 50–65 %) на 14 дней. После 14 дней воздействия лабораторного воздуха испытываемые образцы помещают в камеру хранения карбонизации. Призмы/кубы следует расположить таким образом, чтобы воздух мог свободно циркулировать вокруг граней, на которых будут проводиться измерения карбонизации	[9]
GB/T 50082-2009	Образцы испытывают после 28 дней твердения в стандартных условиях. Для образцов с минеральными добавками (например, золой-уноса) может применяться увеличенное время твердения. Образцы перед карбонизацией необходимо предварительно кондиционировать при $60 ^\circ\text{C}$ в течение 48 часов. После предварительной обработки призмы покрывают расплавленным парафиновым воском, оставляя только одну (или две противоположные) стороны, которые будут подвергаться карбонизации. На поверхности, подвергающейся воздействию углекислого газа, вычерчивают параллельные линии вдоль продольной оси через каждые 10 мм, чтобы обеспечить точки индикации для измерения глубины карбонизации. Расстояние между образцами в камере карбонизации должно быть более 50 мм	[10]
ISO/DIS 1920-12:2015	В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят на 14 дней в лабораторную среду для сушки воздухом с температурой $(18-29) ^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $(50-70) \%$. После 14 дней кондиционирования верхняя и нижняя продольные грани и две торцевые грани призм (или верхняя, нижняя и две боковые грани кубов) запечатывают с помощью парафинового воска или аналогичного материала, который предотвратит попадание углекислого газа и позволит карбонизировать две продольные поверхности. После того, как призмы/кубы запечатаны, их помещают в камеру хранения. Призмы/кубы должны быть расположены таким образом, чтобы их открытые грани были вертикальны и позволяли воздуху свободно циркулировать вокруг двух граней, подлежащих карбонизации	[11]
IS 516 (Part 2/Section 4) 2021	Образцы должны храниться в воде или в камере с температурой в диапазоне $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и при минимальной относительной влажности 95 %. В возрасте 28 дней призмы/кубы извлекают из водяной бани и переносят на 14 дней в лабораторную воздушную сушилку с температурой в диапазоне $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха в диапазоне $(65 \pm 5) \%$	[12]
prSIA 262/1:2017-11	Образцы-призмы должны храниться после распалубки (обычно в течение 1 суток) до возраста $(72 \pm 6) \text{ ч}$ в воде при температуре от 15 до $25 ^\circ\text{C}$. После этого призмы должны выдерживаться до начала испытаний в климатической камере до возраста 28 суток. При необходимости промежуточного хранения (например, при формовании призм на строительной площадке) призму следует защитить от высыхания (накрыть пленкой, под водой) до возраста $(72 \pm 6) \text{ ч}$. Если призма не будет немедленно доставлена в испытательную лабораторию, ее необходимо хранить в защищенном сухом помещении (относительная влажность $\leq 70 \%$, температура от 10 до $30 ^\circ\text{C}$) до момента транспортировки в испытательную лабораторию. Однако образец должен быть перенесен в климатическую камеру не позднее 10-го дня (с момента его изготовления) до начала испытания в возрасте 28 дней. Для испытания кернов используют открытую внешнюю (А) и внутреннюю (І) (невыветренная сторона или задняя часть) часть кернов. Внутренняя часть кернов должна быть плоской и перпендикулярной оси образца. При необходимости ее следует обрезать. Керны помещают в климатическую камеру на 3 недели до испытания. Боковые поверхности кернов перед началом испытания покрывают слоем устойчивого к CO_2 материала	[13]

Продолжение таблицы 1

Стандарт на метод испытаний	Способ предварительной подготовки образцов	Источник
UNE 83993-2:2013	После того, как образцы достигнут желаемого возраста испытания, их необходимо предварительно кондиционировать путем сушки образцов при температуре 40 °С в течение недели, после чего образцы запечатываются и хранятся при температуре 20 °С в течение трех недель. Это означает, что предварительное кондиционирование образцов длится 28 дней в дополнение ко времени твердения. После того, как образцы кондиционированы, их помещают в климатическую камеру, гарантируя, что по крайней мере 90 % поверхности образца подвергается воздействию воздуха (это можно сделать, например, с помощью жесткой пластиковой сетки). Образцы должны находиться на расстоянии не менее 10 см друг от друга	[14]

Практически во всех стандартах по истечении заданного срока выдерживания для оценки глубины карбонизации и продвижения ее фронта образцы раскалывают в направлении, нормальном рабочей грани, и на поверхность скола со стороны рабочей грани наносят раствор фенолфталеина (трифенилметановый краситель) в этиловом спирте, который изменяет свою окраску от бесцветной (при $\text{pH} < 8,2$) до красно-фиолетовой, «малиновой» (в щелочной среде). Толщину слоя, окрашенного раствором фенолфталеина (в малиновый цвет), измеряют по периметру образца.

В методологии оценки долговечности бетона с минеральными добавками крайне необходимо внедрение понятия «индекса зрелости». Оно должно стать приоритетным в будущих итерациях стандартов, чтобы коррозионную стойкость бетона можно было определить более точно. Условия воздействия ускоренной карбонизации влияют на механизм карбонизации и степень изменений, которые испытывает материал. Необходим консенсус относительно условий воздействия, которые следует принять как базовые в различных стандартах, в частности, однозначно определить концентрацию CO_2 и относительную влажность для испытаний. Для портландцемента и смешанных портландцементов, по-видимому, концентрация CO_2 от 1 до 3 % достаточна для того, чтобы вызвать изменения фазового состава, сопоставимые с теми, которые наблюдаются при естественной карбонизации. Поэтому испытание бетона на ускоренную карбонизацию при концентрациях воздействия CO_2 , превышающих это значение, не рекомендуется. Важно содействовать гармонизации этого параметра в уже существующих стандартах, чтобы обеспечить возможность прямого сравнения результатов различных исследований и улучшить понимание того, как внутренние свойства и структура отдельных видов бетона могут быть связаны с их устойчивостью к карбонизации.

По-прежнему необходим комплекс исследований для точного перевода скоростей карбонизации, полученных с помощью ускоренных испытаний, в скорости карбонизации в естественных условиях для различ-

ных типов бетона. Бетон с минеральными добавками из-за карбонизации будет претерпевать иные микроструктурные изменения в отличие от обычного бетона на портландцементе (часто укрупнение вместо измельчения поровой структуры). Воздействие на эти бетоны высоких концентраций CO_2 приведет к их быстрой карбонизации, что в свою очередь может способствовать более интенсивному образованию воды как продукта реакции карбонизации внутри структуры композиционного материала, которым является бетон. Различия в выделении воды при карбонизации могут также влиять на условия относительной влажности, при которых скорость карбонизации будет выше.

В целом, подходы к проектированию долговечности железобетонных конструкций можно разделить на предписывающие и основанные на эксплуатационных характеристиках.

Предписывающие концепции базируются на спецификациях материала и характеристиках защитных слоев с использованием таких факторов, как классы воздействия и прочность на сжатие. В соответствии с этим подходом проектирование долговечности в большинстве существующих норм и стандартов основано, главным образом, на установлении ограничений на используемые материалы и принципов проектирования состава бетона в зависимости от тяжести предполагаемого воздействия (максимальное водоцементное отношение, общее минимальное содержание цементирующих материалов и т. п.), как это сделано, например, в [15]. Оно включает правильный выбор класса воздействия и соблюдение требований к материалам и защитным слоям, а также к процедурам укладки, уплотнения и твердения бетона в конструкции.

Вместе с тем долговечность – это концепция поведения конструкции в конкретных условиях ее эксплуатации, как таковая, она не может быть легко описана и оценена с помощью простых параметров смеси [16–19]. Предписывающий подход в определенной степени игнорирует многообразие характеристик различных типов цемента и минеральных добавок или самого бетона, а также тип заполнителя, и, что глав-

ное, не позволяет учесть влияние практики на строительной площадке в процессе строительства. Он также не позволяет однозначно учесть поведение конструкции при одновременном воздействии среды и нагрузки, конкретные требования к сроку ее службы. Кроме того, предписывающий подход является препятствием для использования новых или переработанных материалов. Концепции проектирования с учетом эксплуатационных характеристик, напротив, основаны на количественном прогнозировании долговечности (или срока службы) на основе преобладающих условий воздействия и измеренных параметров материала. Устойчивость конструкции к разрушению, измеряемая с помощью показателей стойкости фактически используемого бетона, сравнивается с нагрузкой окружающей среды. Исходя из этого, износ (деструкция, разрушение) конструкции в течение срока службы оценивается количественно с помощью соответствующих моделей износа и вероятностных (полувероятностных) расчетов. В этой концепции состав бетона важен только в той степени, в которой он контролирует свойства бетона.

Поскольку срок службы железобетонных конструкций в значительной степени зависит от толщины и качества защитных слоев, необходимы надежные испытания для их прямого измерения. Эти методы также включают ускоренные испытания, которые были разработаны для получения полезной проектной информации в сроки, соответствующие техническим условиям проекта. Поскольку проверка проникновения вредных веществ, в том числе углекислого газа, обычно занимает слишком много времени, методы ускоренных испытаний обычно оценивают структуру пор и в некоторой степени химический состав поровой жидкости в бетоне, при этом наиболее распространенные методы испытаний измеряют проницаемость или удельное сопротивление (или обратную его характеристику – проводимость). Используя вероятностные модели прогнозирования разрушения или эмпирические зависимости, значения проницаемости и удельного сопротивления можно связать с соответствующими механизмами разрушения.

Карбонизация бетона, как было указано выше, исторически связана с уменьшением pH, который определяется с помощью раствора фенолфталеина. Проведенный Техническим комитетом РИЛЕМ ТС 281-ССС анализ привел к двум основным выводам, связанным с этой процедурой:

1. До обнаружения определенных проканцерогенных свойств фенолфталеин более полутора веков использовался в медицине. Однако сегодня его использование может быть исключено из существующих стандартов, вместо фенолфталеина необходимо подобрать и рекомендовать альтернативные синтетические или натуральные индикаторы pH.

2. Использование индикатора pH среды не полностью отражает все реакции карбонизации, протекаю-

щие в бетоне. Для портландцементного бетона можно утверждать, что изменения щелочности, вызванные карбонизацией, имеют особое значение в контексте коррозии стали. Для портландцемента с минеральными добавками (бетона с минеральными добавками) карбонизация может привести к более быстрому снижению несущей способности и повышению пористости материала, поэтому независимо от изменений щелочности, которые могут быть связаны с карбонизацией, важно определить и степень микроструктурных изменений, вызванных карбонизацией, которые индикатор pH выявить никоим образом не может. Ограниченная точность методик, используемых для определения глубины карбонизации, продвижения ее фронта, сопутствующего массопереносу, требует выбора подходящих подходов для ответа на вопросы, поднятые при планировании таких экспериментов. Коэффициенты карбонизации, определенные по показаниям глубины карбонизации с использованием индикатора pH, могут не быть по-настоящему репрезентативными для фактической карбонизации, которую испытывает материал при формировании новообразований, включающих оксикарбонатные фазы. Это прямо касается применимости моделей прогнозирования срока службы, особенно для бетона с минеральными добавками.

Коррозия арматуры, вызванная карбонизацией, хотя и встречается достаточно часто, как правило, не представляет серьезной угрозы для безопасности и работоспособности конструкции, поскольку в естественных условиях с концентрацией углекислого газа около 0,04 % (непромышленные районы) она протекает очень медленно. Необходимо, чтобы условия воздействия на железобетонные конструкции, подвергающиеся карбонизации, принимались только в качестве ориентиров и при необходимости корректировались с учетом местных условий. BS EN 206:2013+A2:2021 [15] содержит пример такой классификации среды карбонизации. Однако принятый в европейском стандарте принцип классификации не учитывает динамику изменения концентрации углекислого газа в окружающей среде и ее сезонные колебания. Например, в промышленных зонах концентрация углекислого газа обычно высока, поэтому скорость карбонизации может увеличиваться, если имеется достаточное количество влаги для поддержания процесса. В гаражах и туннелях также может наблюдаться крайне высокое содержание CO_2 .

Потенциально вводят в заблуждение на техническом уровне существующие упрощенные рекомендации по расчету поглощения CO_2 бетоном с использованием стандартов, изначально разработанных для определения скорости именно ускоренной карбонизации, и, соответственно, определение характеристик устойчивости цемента, бетона или конструкций исходит из неких постоянных значений коэффициента карбонизации. Коэффициенты карбонизации, оцененные

по результатам определения глубины карбонизации в соответствии с различными стандартизированными методиками испытаний, являются неабсолютными и уникальными для индивидуальных составов бетонных смесей и условий воздействия конкретной окружающей среды. Часто прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжатие в бетоне с минеральными добавками не выявляется вовсе, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются в условиях ускоренных испытаний. Поэтому рекомендации, основанные на использовании коэффициентов карбонизации, приведенных в таблицах ряда существующих стандартов, необходимо подвергать определенному сомнению при их применении в расчетах долговечности и срока службы железобетонных конструкций.

Выводы

1. Глубина карбонизации в смешанных цементах выше, чем в рядовых портландцементных, и увеличивается при увеличении степени замещения цемента минеральной добавкой.

2. Умеренная сжимающая механическая нагрузка (30 % от разрушающей нагрузки), приводящая к некоторому уплотнению структуры бетона, снижает глубину карбонизации (в отдельных случаях – вплоть до 16 %).

3. Существующие стандарты на определение глубины карбонизации имеют значительные отличия друг от друга, в частности, в вариантах подготовки образцов, их твердения (ухода за образцами), условиях при испытании в камере карбонизации (концентрация CO_2 , влажность, температура). Эти отличия приводят к различным результатам испытаний по разным стандартам и повышают статистическую неопределенность измерений, т. е. параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Важно отметить, что по ГОСТ 31383-2008 [5] выдержка образцов перед испытаниями регламентирована не временем выдерживания, а моментом установления постоянной массы у образцов в камере карбонизации перед включением подачи газа. Этот момент для бетонов с разной плотностью структуры может наступить в разное время и косвенно отражает ее особенности.

4. Для портландцемента с минеральными добавками карбонизация может привести к более быстрому снижению несущей способности и повышению пористости материала, поэтому независимо от изменений щелочности, которые могут быть связаны с карбонизацией, важно определить степень и характер микроструктурных изменений, вызванных карбонизацией, которые индикатор pH выявить не может.

5. Часто не выявляется прямая корреляция между коэффициентом карбонизации и прочностью на сжа-

тие в бетоне с минеральными добавками, особенно когда эксплуатационные характеристики определяются в условиях ускоренных испытаний. Поэтому рекомендации, основанные на использовании коэффициентов карбонизации, приведенных в таблицах таких стандартов, вызывают определенное сомнение.

6. Подход к оценке долговечности и сроков службы железобетонных конструкций на основе эксплуатационных характеристик можно считать важным шагом вперед в проектировании. Существующие ограничения в этом подходе связаны с тем, что различные процессы разрушения, влияющие на поведение железобетонных конструкций, в настоящее время не полностью изучены и описаны не во всех необходимых деталях, методы испытаний, используемые в лаборатории, не всегда отражают реальные условия эксплуатации, а изменение качества бетона в пределах конструкции или ее отдельного элемента не является достаточно известным. Однако проблема разницы между условиями на стройплощадке и в лаборатории может быть в определенной степени преодолена путем использования физических и виртуальных моделей, учитывающих условия испытаний и основанные на явлениях старения микроструктурные изменения и т. д. Это обуславливает продолжение работ, связанных с созданием моделей коррозии различных бетонов в различных условиях эксплуатации, переходом к вероятностным прогнозам обеспечения долговечности железобетонных конструкций и их сроков службы при одновременном воздействии среды и нагрузки.

Список литературы / References

1. De Belie N., Soutsos M., Gruyaert E. (eds) Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4. Springer, Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>
2. Vollpracht A., Soutsos M., Kanavaris F. (2018) Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function – A critical review. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 162, pp. 830–846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.054>
3. RILEM Recommendations. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*. 1988, vol. 21, pp. 453–455. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472327>
4. Bernal S.A., Dhandapani Y., Elakneswaran Y. et al. Report of RILEM TC 281-CCC: A critical review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete. *Materials and Structures*. 2024, vol. 57, article number 173. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02424-9>
5. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2010.

5. State Standard 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standardinform Publ., 2010. (In Russian).
 6. BSI 1881-210:2013. Testing hardened concrete. Determination of the potential carbonation resistance of concrete. Accelerated carbonation method. The British Standards Institute.
 7. EN 13295:2004. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to carbonation.
 8. CUR-Aanbeveling 48:2010. Procedures, criteria and test methods for testing the suitability of novel cements for application in concrete and for the equivalent performance of concrete with fillers. CROW-CUR.
 9. EN 12390-12:2020. Testing hardened concrete. Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. European Committee for Standardization (CEN).
 10. GB/T 50082-2009. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete. China Academy of Building Research.
 11. ISO/DIS 1920-12:2015. Testing of concrete. Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. International Organization for Standardization (ISO).
 12. IS 516 (2021). Hardened concrete – Methods of test. Part 2: Properties of hardened concrete other than strength. Section 4: Determination of the carbonation resistance by accelerated carbonation method. Bureau of Indian Standards.
 13. prSIA 262/1:2017-11. Concrete construction – Additional specifications. Swiss Society of Engineers and Architects (SIA).
 14. UNE 83993-2:2013. Durability of concrete. Test method. Measurement of carbonation penetration rate in hardened concrete. Part 2: Accelerated method. Organismo de Normalización en España (UNE).
 15. BS EN 206:2013+A2:2021. Concrete. Specification, performance, production and conformity. British Standards Institution.
 16. Walraven J. Design for service life: how should it be implemented in future codes. *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Proceedings ICCRRR 2008*, Cape Town, 24–26 November 2008. 2008, pp. 3–10.
 17. Alexander M.G., Mackechnie J.R., Ballim Y. Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures. *American Ceramic Society, Inc., Materials Science of Concrete VI*. 2001, pp. 483–511.
 18. Simons B. Concrete performance specifications: New Mexico Experience. *Concrete International*. 2004, vol. 26, issue 4, pp. 68–71.
 19. Day K.W. Perspective on Prescriptions. *Concrete International*. 2005, vol. 27, issue 7, pp. 27–30.
- Информация об авторах /
Information about the authors**
- Вячеслав Рувимович Фаликман**, д-р материаловедения, канд. хим. наук, действительный член Российской инженерной академии, Почетный пожизненный член ФИБ и РИЛЕМ, начальник центра научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства (№ 20), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vfalikman@yandex.ru
- Vyacheslav R. Falikman**, Dr. Sci. (Materials), Cand. Sci. (Chem.), Full Member of the Russian Engineering Academy, Honorary Life Member of fib and RILEM, Head of Center for Scientific and Technical Support of Technically Complex Construction Facilities (No. 20), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vfalikman@yandex.ru
- Никита Сергеевич Дмитриев**✉, аспирант, АО «НИЦ «Строительство»; младший научный сотрудник, центр научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства (№ 20), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: concrete15@yandex.ru
- Nikita S. Dmitriev**✉, Graduate student, JSC Research Center of Construction; Junior Research Associate, Center for Scientific and Technical Support of Technically Complex Construction Facilities (No. 20), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: concrete15@yandex.ru
- ✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС77-75188 от 22.02.2019 г., сетевого издания – Эл № ФС77-82129 от 18.10.2021 г.

Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN (International Standard Serial Number): печатное – 2224-9494, сетевое – 2782-3938.

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

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

Входит в категорию K2 Перечня ВАК.

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

Журнал «Вестник НИЦ «Строительство» (print) включен в утвержденный Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте vestnik.cstroy.ru

Подписной индекс ООО «Урал Пресс», ООО «АРЗИ» – 36569.



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

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская,
дом 6, корпус 1, кабинет 115
Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023
Выпускающий редактор – Починина Наталья
e-mail: pochininane@cstroy.ru



АО «НИЦ «Строительство» — это более чем 95-летний опыт исследований и достижений в области строительной науки.

Мы – команда единомышленников, способных реализовать самые сложные инженерные проекты.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО

**АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»
ПРЕДЛАГАЕТ ВЕСЬ СПЕКТР
ИНЖИНИРИНГОВЫХ УСЛУГ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГЕОЗОВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ПЕРСЕВАНОВА



повысить квалификацию
специалистов и экспертов

пройти обучение в аспирантуре

подготовить диссертацию в докторантуре

защитить диссертацию на соискание ученой
степени **кандидата наук**, на соискание ученой
степени **доктора наук**

**Учебный центр
АО «НИЦ «Строительство»
приглашает вас:**



**г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6**



+7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80



www.cstroy.ru



motorina@cstroy.ru | smirnova@cstroy.ru





АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- — в области инженерных изысканий
- — в области проектирования
- — в области строительства
- — по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- — разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов



Преподавательский состав Учебного центра

- — лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- — учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



Обучение в аспирантуре,
докторантуре

Прикрепление для
подготовки диссертации без
освоения образовательных
программ



Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению 08.06.01 «Техника и технология строительства» по направлениям:



В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГВОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ПЕРСЕВАНОВА

ЦОК

**центр
оценки
квалификации**

**НЕЗАВИСИМАЯ
ОЦЕНКА КВАЛИФИКАЦИИ**

***Для успешного прохождения
профессионального экзамена мы
проводим курс обучения
для подготовки к прохождению
независимой оценки квалификации
специалистов***



**Контактная информация для
консультаций и подачи заявок:
тел.: +7 (495) 174-73-80;
+7 (495) 602-00-70 (доб. 1222);
e-mail: cok-info@cstroy.ru**

Научно-технический журнал
Бетон и железобетон
Вып. 5 (624) 2024

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Игнатьева Е.Н.
Дата выхода в свет 05.12.2024

