

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0005-9889

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

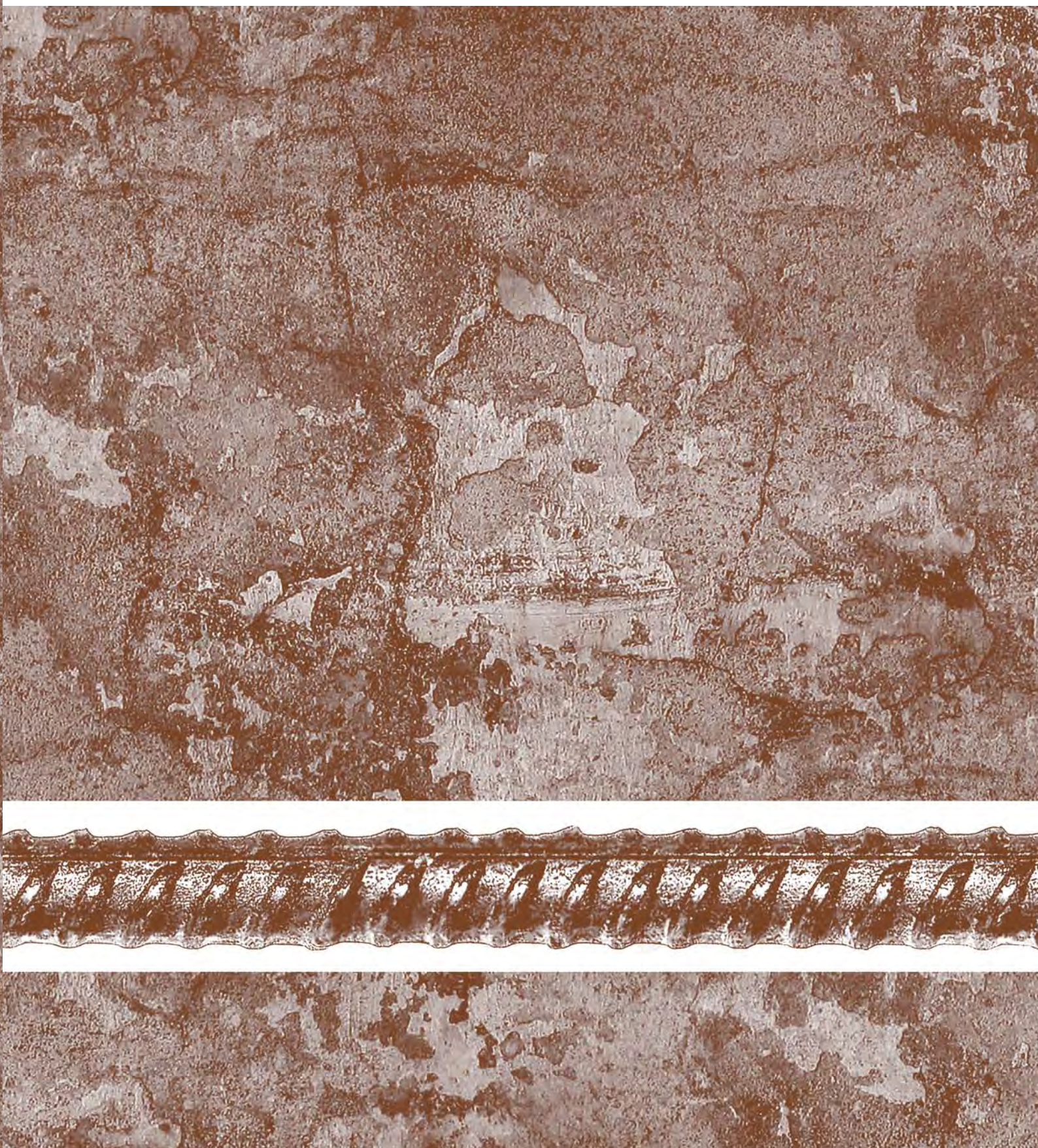
4

606

2021

WWW.RIFSM.RU

ИЗДАЕТСЯ С 1955 ГОДА



100+

TECHNO BUILD

forum-100.ru

VIII Международный
строительный форум
и выставка

ДИАЛОГ РЕГИОНОВ

5-7 октября 2021
Екатеринбург

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

БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

Издается с 1955 г.

4 (606)
июль—август 2021

В.И. ТРАВУШ, Р.Ш. ШАРИПОВ, Ю.С. ВОЛКОВ	
Вопросы совершенствования строительных норм	3
Е.Е. ШАЛЫЙ, С.Н. ЛЕОНОВИЧ, Н.А. БУДРЕВИЧ	
Влияние эксплуатационных нагрузок на деградацию железобетона морских сооружений	8
В.П. БЛАЖКО	
Каркас сборный пространственный со стыками на винтовых муфтах	14
Е.А. САДОВСКАЯ, С.Н. ЛЕОНОВИЧ, Н.А. БУДРЕВИЧ	
Многopараметричная методика оценки показателей качества нанofибробетона для строительной площадки	20
В.В. БЕЛОВ, И.В. ОБРАЗЦОВ	
Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов	29
А.Н. БОЛГОВ, С.И. ИВАНОВ, А.З. СОКУРОВ, А.В. НЕВСКИЙ	
О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях	39

Редакционная коллегия

- ЗВЕЗДОВ А.И.**, главный редактор, д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, АО НИЦ «Строительство» (Москва)
- АРХИПКИН А.А.**, зам. главного редактора, Ассоциация «Железобетон» (Москва)
- ГРАНЕВ В.В.**, д-р техн. наук, заместитель генерального директора – научный руководитель, АО «ЦНИИПромзданий» (Москва)
- ГУСЕВ Б.В.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии», РУТ/МИИТ (Москва)
- ЙЕНСЕН О.М.**, д-р техн. наук, профессор Датского технического университета (Дания)
- КУЗЕВАНОВ Д.В.**, канд. техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)
- МАИЛЯН Д.Р.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону)
- МОРОЗОВ В.И.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург)
- МЮЛЛЕР Х.С.**, д-р техн. наук, профессор Университета Карлсруэ, Институт технологии – КИТ (Германия)
- НЕСВЕТАЕВ Г.В.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой технологии строительного производства, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону)
- РАХМАНОВ В.А.**, канд. техн. наук, Российский Союз строителей (Москва)
- СТЕПАНОВА В.Ф.**, д-р техн. наук, заведующая лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)
- ТАМРАЗЯН А.Г.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, советник РААСН (Москва)
- ТРАВУШ В.И.**, д-р техн. наук, главный конструктор, заместитель генерального директора по научной работе ЗАО «ГОРПРОЕКТ», вице-президент РААСН (Москва)
- УШЕРОВ-МАРШАК А.В.**, д-р техн. наук, профессор Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры (Украина)
- ФАЛИКМАН В.Р.**, канд. хим. наук, д-р материаловедения, руководитель Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)
- ХОЗИН В.Г.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань)

Авторы

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

Редакция

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

Перепечатка

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

Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

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

Founder of the journal:

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

Publisher: «STROYMATERIALY»

Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
 Moscow, 125319, Russian Federation

The journal is registered by the RF
 Ministry of Press, Broadcasting and Mass
 Communications PI № FS 77-76959
 dated 09.10.2019 (Russia)
 ISSN 0005-9889 (Print)

BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

4 (606)
July—August'2021

V.I. TRAVUSH, R.Sh. SHARIPOV, Yu.S. VOLKOV

On the Technical Regulation of the Construction Process 3

E.E. SHALYI, S.N. LEONOVICH, N.A. BUDREVICH

Influence of Operational Loads on the Degradation of Reinforced Concrete of Offshore Structures. 8

V.P. BLAZHKO

The Frame Prefabricated Spatial with Joints on Screw Couplings 14

E.A. SADOVSKAYA, S.N. LEONOVICH, N.A. BUDREVICH

**A Multi-Parametric Method for Evaluating the Quality Indicators
 of Nano-Fiber Concrete for a Construction Site. 20**

V.V. BELOV, I.V. OBRAZTSOV

Optimal Structures of Raw Materials Mixtures When Manufacturing Construction Cement Composites 29

A.N. BOLGOV, S.I. IVANOV, A.Z. SOKUROV, A.V. NEVSKII

**Strength's Calculation of Reinforced Concrete Slab-Columns Joints
 in Monolithic Frame of High-Rise Buildings 39**

Editorial team:

ZVEZDOV A.I., Editor-in-Chief, Doctor of Sciences (Engineering), Deputy Director General for Research, Research Center «Stroitel'stvo» JSC (Moscow)

ARKHIPKIN A.A., Deputy Editor-in-Chief, Structural Concrete Association (Moscow)

GRANYOV V.V., Doctor of Sciences (Engineering), Deputy Director General – Scientific Supervisor, «TsNIPromzdaniy» JSC (Moscow)

GUSEV B.V., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Building Materials and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT) (Moscow)

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

KUZEVANOV D.V., Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)

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

MOROZOV V.I., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

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

NESVETAEV G.V., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Construction Technology Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don)

RAKHMANOV V.A., Candidate of Sciences (Engineering), Russian Union of Builders (Moscow)

STEPANOVA V.F., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Laboratory for Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, of the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)

TAMRAZYAN A.G., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)

TRAVUSH V.I., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Designer, Deputy Director General for Research, «GORPROEKT» CJSC, Vice-President of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow)

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

FALIKMAN V.R., Candidate of Sciences (Chemistry), Doctor of Materials Science, Head Center for scientific and technical assistance at complex facilities construction in the Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (Moscow)

KHOZIN V.G., Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Building Materials, Products and Structures Technology Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan)

The authors

of published materials are responsible for the accuracy of the submitted information, the accuracy of the data from the cited literature and for using in articles data which are not open to the public.

The Editorial Staff

can publish the articles as a matter for discussion, not sharing the point of view of the author.

Reprinting

and reproduction of articles, promotional and illustrative materials are possible only with the written permission of the editor-in-chief.

The Editorial Staff is not responsible for the content of advertisements and announcements.

Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Hwy,
 127434, Moscow, Russian Federation
Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36
E-mail: mail@rifsm.ru
http://azhb.ru/ **http://www.rifsm.ru**

УДК 624.012.3/4

В.И. ТРАВУШ¹, д-р техн. наук, профессор, вице-президент РААСН (info@gorproject.ru);
Р.Ш. ШАРИПОВ², канд. техн. наук (wander-er1@yandex.ru),
Ю.С. ВОЛКОВ², канд. техн. наук, почетный член РААСН (volkov@cstroy.ru)

¹ ЗАО «Горпроект» (105064, г. Москва, Нижний Сусальный пер., 5, стр. 5А)

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

Вопросы совершенствования строительных норм

Проанализировано современное состояние технического регулирования строительства в РФ. Отмечается, что до настоящего времени в этой области не решен ряд проблем. Одна из них – противоречивость обязательности и добровольности применения нормативов в проектной и производственной практике. Утвержденный 4 июля 2020 г. Постановлением Правительства № 985 Перечень нормативных документов обязательного применения, как и предыдущий, содержит концептуальные ошибки, когда нормативный документ делится на части для добровольного и обязательного применения. Согласно положениям технического регламента «О безопасности зданий и сооружений» ст. 6, п. 7, документы, применяемые на добровольной основе, также обеспечивают выполнение обязательных требований этого регламента. Существуют неясности с обязательным выполнением требований, так как регламент «О безопасности зданий и сооружений» содержит положения о возможности соблюдения обязательных требований на альтернативной основе. Даны предложения по возможным направлениям устранения выявленных недостатков.

Ключевые слова: технический регламент «О безопасности зданий и сооружений», нормативные документы, добровольное выполнение, обязательные требования.

Для цитирования: Травуш В.И., Шарипов Р.Ш., Волков Ю.С. Вопросы совершенствования строительных норм // Бетон и железобетон. 2021. № 4 (606). С. 3–7.

V.I. TRAVUSH¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Vice-President of RAASN (info@gorproject.ru);
R.Sh. SHARIPOV², Doctor of Sciences (Engineering) (wander-er1@yandex.ru),

Yu.S. VOLKOV², Doctor of Sciences (Engineering), honorary member of RAASN (volkov@cstroy.ru)

¹ "Gorproekt" ZAO (5, building 5A, Nizhny Susalny Lane, Moscow, 105064, Russian Federation)

² Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev
JSC "Research Center "Stroitel'stvo" (6, build. 5, 2-nd Institut'skaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

On the Technical Regulation of the Construction Process

Article analyzes the state of technical regulation of construction in Russia. It is noted that a number of problems have not been solved in this area to date. One of them is the contradiction of obligatory and voluntary application of regulations in design and production practice. The list of mandatory application regulations approved on July 4, 2020 by The Government's Resolution No. 985, as well as the previous one, contains conceptual errors when the regulatory document is divided into parts for voluntary and binding application. Article 6, paragraph 7, documents applied on a voluntary basis also ensure compliance with the mandatory requirements of the Regulation, is also in line with the technical regulations on building and construction safety. There are uncertainties with mandatory compliance as the Building and Construction Safety Regulations contain provisions on the possibility of compliance with mandatory requirements on an alternative basis.

Keywords: technical regulation "On the safety of buildings and structures", regulatory documents, voluntary using of regulations, mandatory requirements.

For citation: Travush V.I., Sharipov R.Sh., Volkov Yu.S. On the technical regulation of the construction process. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 3–7. (In Russian).

В настоящее время существует несколько основных проблем применения строительных норм:

1. Существующее в течение последних десятилетий *разделение норм на обязательные и добровольные*.

Согласно требованиям Федерального закона РФ № 184-ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании», Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»,

применение норм может быть осуществлено на обязательной или добровольной основе [1–5].

«Добровольное» применение, однако, никакими правовыми актами не определено, более того, добровольное применение нормативных документов не может быть основой для проведения экспертизы как проектной документации, так и для целей строительного надзора, представлений для судебных органов и т. д. [6]. Можно также добавить, что путаница с до-

бровольным применением документов начинается с технического регламента «О безопасности зданий и сооружений». Согласно положениям этого регламента ст. 6, п. 7, документы, применяемые на добровольной основе, также обеспечивают выполнение обязательных требований этого регламента. Обязательные требования, таким образом, можно выполнять на добровольной основе.

Добровольность применения стандартов определена Законом РФ «О техническом регулировании». Подчеркивать их добровольность составлением отдельного перечня для добровольного применения излишне. Иначе получается, что эти документы дважды «добровольные», т. е. *отдельный перечень документов для добровольного применения не нужен* [7]. Несмотря на эту очевидность, Перечень норм добровольного применения регулярно пересматривается и переутверждается. Так, приказом Росстандарта от 2 апреля 2020 г. № 687 был утвержден Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона Российской Федерации № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Приказом Росстандарта от 20 апреля 2021 № 567, т. е. чуть больше чем через год, была утверждена уже новая редакция этого же Перечня [8]. В Перечень норм добровольного применения впервые включены Своды правил пожарной безопасности.

Пожарная безопасность, согласно положениям ст. 6 Федерального закона Российской Федерации № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», входит в число восьми основных видов безопасности, которым должны отвечать здания и сооружения. Поэтому придание этим требованиям статуса добровольности выглядит странно. Правда, Минстрой в комментариях к информации об утверждении вышеупомянутого Перечня отмечает, что добровольность применения этого документа не означает, что эти требования могут не соблюдаться, просто проектировщику предоставляется возможность использовать другие документы, положения которых не противоречат требованиям Технического регламента о безопасности зданий и сооружений. Этот комментарий однозначно дезавуирует необходимость включения Сводов правил пожарной безопасности в упомянутый перечень, если разрешается применять другие документы; какие именно, правда, остается непонятным.

2. *О статусе стандартов на методы испытаний.* Все необходимые стандарты на методы испытаний основных видов строительных материалов (бетон, цемент, сталь, камень, дерево, и др.) должны быть обязатель-

ными. Стандарты на методы испытаний, особенно испытаний прочностных характеристик, обеспечивают помимо прочего, выполнение ключевого требования, Технического регламента, а именно *механической безопасности*. Стандарты на методы испытаний определяют одинаковое понимание проектировщиками, органами строительного контроля и инженерами-практиками критериев установления механических и иных характеристик строительных материалов. И определение этих характеристик должно быть одинаковым во всех строительных лабораториях.

Наиболее наглядно это можно видеть на примере европейских норм для проектирования строительных конструкций – Еврокодов, которые составлены как общетехнические документы в предположении, что характеристики, необходимые для конкретного численного расчета, могут определяться в каждой стране самостоятельно [9]. Эти характеристики называются «национально определяемые параметры» и могут указываться в так называемых национальных приложениях к нормам проектирования. Так, для евростандарта на проектирование железобетонных конструкций Еврокода 2 (EN 1992-1-1), количество таких параметров составляет более ста. Это различные коэффициенты, величины усадки, ползучести бетона, толщина защитных слоев бетона для стальной арматуры в зависимости от вида, среды эксплуатации и т. д. Прочностные характеристики бетона могут определяться испытанием кубических образцов 15×15×15 см (Германия и страны Центральной Европы) или цилиндров высотой 30 см и диаметром 15 см (Франция).

В строительстве используется несколько тысяч нормативных и рекомендательных документов, в том числе и межотраслевого характера. За рамками упомянутого перечня остались многие документы на правила производства работ, хотя, по логике, документы на производство работ, влияющие на безопасность зданий и сооружений, должны быть все без исключения указаны в обязательном перечне. Эту проблему НОСТРОЙ решил через подготовку стандартов организаций на отдельные виды работ, обязательные для членов Объединения; одновременно это и способ привлечения новых членов в эту структуру.

3. *Подвешенные документы.* Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), применение которых на обязательной основе обеспечивает выполнение требований Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», приведен в перечне, утвержденном Постановлением Правительства № 985 от 4 июля 2020 г. [10]. Кроме упомянутого перечня Федеральным агент-

ством по техническому регулированию и метрологии приказом от № 567 от 20.04.2021 утвержден Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых обеспечивается соблюдение требований этого же федерального закона, но на добровольной основе [8]. В этот добровольный перечень вошли также добровольные части обязательных документов.

Получается, что обязательных и добровольных документов насчитывается более пятисот. По данным доклада ФАУ ФЦС Минстроя Российской Федерации [11], в отрасли действуют 150 сводов правил и более 900 стандартов. Таким образом, вне официальной системы документов, охваченных перечнями обязательного и добровольного применения, действуют еще порядка 600 документов, причем достаточно значимых, некоторым образом «нелегалов», статус которых официально не определен, так как эти документы в упомянутых перечнях не представлены.

Ощутимая путаница возникла в части взаимных ссылок обязательных документов на добровольные и наоборот. Действующий Перечень 985 на вопрос, становятся ли документы добровольного применения обязательными, если на них имеются ссылки в обязательном документе, отвечает в примечании отрицательно. Такая запись в документе является нарушением положения ГОСТ 1.5–2001 п. 4.9.1 Межгосударственная система стандартизации, согласно которому примечания не должны содержать требований [12].

В примечании к Перечню указывается, что «нормативные документы (их части), на которые имеются ссылки в национальных стандартах и сводах правил (их частях), включенных в настоящий перечень, применяются на обязательной основе в случае, если нормативные документы (их части) содержатся в настоящем перечне». Но если обязательный к применению документ ссылается на добровольный как на одно из условий выполнения одного из своих обязательных требований, то, очевидно, сама эта обязательность становится добровольной. Например, один из основных документов, включенных в обязательный перечень СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01–2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», а с применением железобетона выполняется 90% всех видов строительных объектов, содержит ссылки на 13 СП и 32 ГОСТа, всего 45 нормативов. Из них в обязательный перечень включено 11 документов, 9 СП и 2 ГОСТа, остальные 34 ни в каких перечнях не числятся ни для обязательного, ни для добровольного применения, но без их использования применение указанного СНиПа невозможно.

4. Существенной методической ошибкой проекта Перечня 985, как в прежней редакции 2014 г., так и

в новой, является *выделение из обязательных документов частей добровольного применения*. Доходит до абсурда: в СП 120.13330.2012 «СНиП 32-02–2003 «Метрополитены» больше ста пунктов разбиты на добровольную и обязательную части.

Разделы нормативного документа имеют взаимосвязанный характер и не могут трактоваться выборочно. Отнесение разделов норм, включенных в обязательный перечень, к обязательным или добровольным зачастую носит произвольный характер. Так, в ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» раздел 2 «Термины и определения» является разделом добровольного применения, хотя, по логике, понятийный аппарат должен быть строго стандартизирован во избежание произвольных толкований.

Обязательный перечень заканчивается документом СП 132 «Обеспечение антитеррористической защищенности зданий» (этот же СП 132 указан также в перечне документов для добровольного применения) вроде бы логично, но абсолютно нелогично не указание в качестве обязательных таких документов, как:

СП 284.1325800.2016 «Трубопроводы промышленные для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ»;

СП 285.1325800.2016 «Стадионы футбольные. Правила проектирования»;

СП 286.1325800.2016 «Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования»;

СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования»;

СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» и др.

Для понимания, какие стандарты должны быть обязательными, необходимо проведение комплекса аналитических исследований для выяснения значения уровня влияния нарушений норм стандартов на факторы риска причинения вреда.

5. *Подготовка нормативных документов для строительной отрасли*. Размещение проекта стандарта в Интернете является недостаточной мерой для ознакомления с ним. Многие заинтересованные специалисты, как правило, не представляют, где в Интернете они могут найти проект документа. Имеются случаи, когда ряд организаций из-за недостатков существующей системы доступа к проектам документов узнают о выходе стандарта уже после его утверждения. Был случай, когда сами разработчики не могли найти проект своего стандарта в Интернете, который был вывешен Минстроем для сбора замечаний. Очевидно, что целесообразно вернуться в дореформенные времена и ввести, как раньше, обязательную рассылку про-

ектов документов в заинтересованные организации. Перечень таких организаций составить нетрудно. Организации, приславшие свои замечания, нередко бывают не осведомлены о судьбе этих замечаний, приняты они или отклонены, и если отклонены, то по каким основаниям.

Могут быть рассмотрены различные способы решения указанных выше проблем.

Наиболее радикальный способ – это вообще не составлять никакого перечня документов, применение которых обеспечивает требования Технического регламента, ибо кто бы ни составлял подобный перечень, неизменно будут возникать вопросы о целесообразности включения того или иного документа. Пользователями упомянутого перечня как инструмента выполнения требований Технического регламента являются прежде всего проектировщики и органы государственного строительного надзора. В обязанности органов надзора входит, согласно Положению, утвержденному Правительством от 1 февраля 2006 г. № 54, проверка строительных работ и используемых материалов на соответствие требованиям норм и, подчеркнем, проектной документации.

Согласно требованиям Технического регламента о безопасности зданий и сооружений, ст. 15, п. 6, проектировщик должен в проекте давать ссылки на примененные им нормативные документы из обязательного или добровольного перечня. Но помимо этих документов, проектировщик пользуется большим количеством других нормативов, прежде всего стандартами, определяющими технические требования к строительным материалам. Все они являют-

ся неотъемлемой частью проектной документации. Органы строительного надзора обязаны проверять строительные работы на стадии производства или завершения на соответствие требованиям этих нормативных документов.

Следует отметить, что в Положении о государственном строительном надзоре ни слова не говорится о том, что при проверке следует руководствоваться перечнями документов обязательного или добровольного применения, но неоднократно подчеркивается, что проверка должна проводиться на соответствие проектной документации. Более того, Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» прямо указывает, что проектная документация должна использоваться в качестве основного документа при принятии решения об обеспечении безопасности здания или сооружения (ст. 15, п. 10).

Для понимания, какие стандарты должны быть обязательными, необходимо проведение комплекса аналитических исследований для выяснения значения уровня влияния нарушений норм стандартов на факторы риска причинения вреда. Повторяем, что наиболее радикальный способ решить проблему перечней документов – это вообще не составлять никаких перечней – ни обязательных, ни добровольных, а изменить структуру технического регулирования строительства путем перехода на обязательные строительные нормы – СН и нормы добровольного применения – своды правил – СП. Для возвращения системы технического регулирования строительства в нормальное русло необходимо внести соответствующие изменения в законодательство.

Список литературы

1. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения 12.05.2021).
2. Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения 12.05.2021).
3. Травуш В.И., Волков Ю.С. Вопросы развития строительной науки // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. 2013. № 31–1 (50). С. 186–191.
4. Карпова О.В., Пресняков А.В., Петрянина Л.Н. К вопросу о техническом регулировании в стро-

References

1. Federal Law No. 184-FZ of 27.12.2002 “On Technical Regulation” http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (Date of access 12.05.2021). (In Russian).
2. Federal Law No. 384-FZ of 30.12.2009 “The technical regulation about safety of buildings and constructions” http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (Date of access 12.05.2021). (In Russian).
3. Travush V.I., Volkov Yu.S. Questions of the development of construction science. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2013. No. 31–1 (50), pp. 186–191 (In Russian).
4. Karpova O.V., Presnyakov A.V., Petryanina L.N. On the issue of technical regulation in construction. *Re-*

- ительстве // *Региональная архитектура и строительство*. 2011. № 1. С. 108–112.
5. Баринова Л.С., Пугачев С.В. Вопросы технического регулирования в строительстве // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2011. № 8 (924). С. 44–47.
 6. Лапин А.В. Совершенствование системы технического нормирования как обязательного условия государственной промышленной политики роста // *Административное и муниципальное право*. 2018. № 10. С. 43–51.
 7. Травуш В.И., Волков Ю.С. О противоречиях обязательности и добровольности применения строительных норм // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2018. № 3 (1003). С. 18–20.
 8. Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 апреля 2021 г. № 567.
 9. Крылов С.Б., Шарипов Р.Ш., Зенин С.А., Волков Ю.С. Направления сближения требований основного отечественного стандарта по проектированию бетонных и железобетонных конструкций СП 63.13330.2012 с требованиями международного стандарта ИСО 19338 // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. № 1. С. 93–98.
 10. Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», утв. Постановлением Правительства РФ от 4 июля 2020 г. № 985. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_356807/ (дата обращения 30.04.2021).
 11. ФАУ «ФЦС». Доклад «Инвентаризация и развитие нормативно-технической базы строительства». <https://faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/doklad.php> (дата обращения 18.04.2021).
 12. ГОСТ 1.5–2001 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению».
 - gional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2011. No. 1, pp. 108–112. (In Russian).
 5. Barinova L.S., Pugachev S.V. Questions of technical regulation in construction. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2011. No. 8 (924), pp. 44–47. (In Russian).
 6. Lapin A.V. Improvement of the system of technical regulation as a mandatory condition of the state industrial policy growth. *Administrativnoe i municipal'noe pravo*. 2018. No. 10, pp. 43–51 (In Russian).
 7. Travush V.I., Volkov Yu.S. The contradictions of commitment and discretion in the application of construction standards. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2018. No. 3 (1003), pp. 18–20 (In Russian).
 8. The list of documents in the field of standardization, as a result of which, on a voluntary basis, compliance with the requirements of the Federal Law of December 30, 2009 N 384-FZ “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures” is ensured, approved by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from April 20, 2021 N 567. (In Russian).
 9. Krylov S.B., Sharipov R.S., Zenin S.A., Volkov Yu.S. Directions of convergence of the requirements of the main domestic standard for the design of concrete and reinforced concrete structures SP 63.13330.2012 with the requirements of the international standard ISO 19338. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. No. 1, pp. 93–98 (In Russian).
 10. The list of national standards and sets of rules (parts of such standards and sets of rules), as a result of which, on a mandatory basis, compliance with the requirements of the Federal Law “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures” is ensured, was approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 985 dated July 4, 2020. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_356807/ (date of treatment 04/30/2021). (In Russian).
 11. Federal Autonomous Institution Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction. Report “Inventory and development of the regulatory and technical base for construction.” <https://faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/doklad.php> (date of access 04/18/2021). (In Russian).
 12. GOST 1.5–2021. Interstate System for Standardization. Interstate standards, rules and recommendations on interstate standardization. General requirements for structure, drafting, presentation, content and indication. (In Russian).

УДК 624.012.4:628.147.22

Е.Е. ШАЛЫЙ¹, инженер (john_shamali@mail.ru);
С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{2, 3}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);
Н.А. БУДРЕВИЧ², инженер

¹ Дальневосточный федеральный университет (690091, г. Владивосток, пос. Аякс, корп. 12, каб. Е920)

² Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

³ Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Влияние эксплуатационных нагрузок на деградацию железобетона морских сооружений

Коррозия арматуры морских и прибрежных гидротехнических сооружений вследствие хлоридной агрессии и карбонизации бетона ведет к резкому снижению безопасности сооружения. Арматура подвергается процессу депассивации, как только содержание хлорида на ее поверхности превысит пороговую концентрацию либо значение pH в защитном слое бетона уменьшится до порогового значения в результате карбонизации. При проникновении кислорода до поверхности арматуры реализуются электрохимические реакции с образованием продуктов коррозии. Это приводит к растрескиванию защитного слоя бетона, уменьшению площади сечения арматуры. В работе предложен метод прогнозирования комплексной деградации железобетонных конструкций прибрежных сооружений с учетом различных механизмов коррозионного износа, что позволяет разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтпригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, бетон, карбонизация, хлоридная агрессия.

Для цитирования: Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Влияние эксплуатационных нагрузок на деградацию железобетона морских сооружений // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 8–13.

Е.Е. SHALYI¹, Engineer (john_shamali@mail.ru);
S.N. LEONOVICH^{2, 3}, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academic of RAACS (sleonovich@mail.ru); N.A. BUDREVICH², Engineer
¹ Far Eastern Federal University (E920, 12, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690091, Russian Federation)
² Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220013, Belarus)
³ Qingdao University of Technology (11, Fushun Rd, Qingdao, 266033, China)

Influence of Operational Loads on the Degradation of Reinforced Concrete of Offshore Structures

Corrosion of reinforcement of marine and coastal hydrotechnical structures due to chloride aggression and carbonation of concrete leads to a sharp decrease in the safety of the structure. The reinforcement is subjected to a depassivation process as soon as the chloride content on its surface exceeds the threshold concentration, or the pH value in the protective layer of concrete decreases to the threshold value as a result of carbonation. When oxygen penetrates to the surface of the reinforcement, electrochemical reactions are realized with the formation of corrosion products. This leads to cracking the protective layer of concrete, reducing the cross-sectional area of the reinforcement. The paper proposes a method for predicting the complex degradation of reinforced concrete structures of coastal structures, taking into account various mechanisms of corrosion wear, which makes it possible to develop effective ways to increase the durability and maintainability of structures operated in the marine environment.

Keywords: hydrotechnical structure, concrete, carbonation, chloride aggression.

For citation: Shalyi E.E., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Influence of operational loads on the degradation of reinforced concrete of offshore structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 4–13. (In Russian).

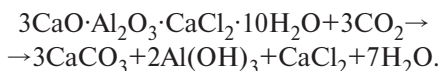
Влияние морской среды на интенсивность коррозии требует дополнительных исследований, так как хлоридная агрессия и карбонизация бетона значительно ускоряют процесс деградации [1]. Коррозия арматуры, вызванная исключительно хлоридом, достаточно хорошо изучена, и для моделирования этого процесса доступен ряд моделей. Одни модели изучают транспортный механизм ионов хлорида с поверхности железобетонных элементов, другие [2–7] изучают влияние начальных трещин в бетоне [8–10] и влияние нагрузки на транспортный механизм хлоридов [11, 12].

В [13] было предложено численное моделирование процесса коррозионного повреждения бетона, в котором физическая и электрохимическая модели

связаны с механической моделью образования трещины. Известны работы по изучению совместных факторов среды: хлоридной агрессии и карбонизации [14–16]. Отмечено, что влияние карбонизации на коэффициент диффузии ионов хлорида зависит от типов и пропорций смеси бетонов. В [15, 16] описан переменный тест с хлоридным воздействием и карбонизацией, где концентрация ионов хлорида была максимальной вблизи фронта карбонизации.

Несмотря на то что в условиях морской среды одновременно происходят карбонизация и хлоридная агрессия, следует отметить, что диффузия ионов хлорида идет намного быстрее, чем процесс карбонизации [17, 18]. До карбонизации бетон обычно со-

держит соль Фриделя из-за хлоридного иона, связанного внутри бетона. Когда соль Фриделя реагирует с двуокисью углерода, ионы хлорида высвобождаются в поровую воду [19]:



Высвобожденные ионы увеличивают концентрацию свободного хлорида, значительно превышающую концентрацию хлоридных ионов, которые транспортируются с поверхности во внутреннюю среду. Поэтому для анализа и прогнозирования комбинированного действия карбонизации и проникновения хлоридов необходимо моделировать, как карбонизация взаимодействует с хлоридным переносом без карбонизации. Авторами предложена комплексная модель комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, которая сравнивается с хлоридным переносом без карбонизации и проверяется экспериментально.

Модель карбонизации

Эффект карбонизации заключается в уменьшении щелочности пористой среды в бетоне, что позволяет разрушать пассивную пленку на арматуре и тем самым инициировать коррозию, приводя к сколам защитного слоя бетона и снижению прочности. Таким образом, карбонизация бетона представляет собой сложный физико-химический процесс. В основе описания этого процесса лежит дифференциальное уравнение первого закона Фика [2]:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \tag{1}$$

Если рассматривать карбонизацию как устойчивый постоянный процесс, описанный этим законом, то детерминистическая модель глубины прохождения фронта карбонизации для сооружения записывается следующим образом [2]:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D(t)}{a} \int_1^t f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot k \cdot C_{CO_2}(t) dt \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n}, \tag{2}$$

где t – время эксплуатации в годах; t_0 – 1 г.; n – возрастной фактор; k – коэффициент, учитывающий повышенное содержание углекислого газа в больших городах; $f_T(t)$ и $f_W(t)$ – функции изменения температуры и влажности во времени соответственно; $C_{CO_2}(t)$ – функция изменения концентрации CO_2 во времени; $D(t)$ – коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне как функция времени; a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации, определяется по формуле [20, 21]:

$$a = 0,75 \cdot CaO \cdot b \cdot a_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}, \tag{3}$$

где CaO – содержание оксида кальция в цементе; b – количество цемента; M_{CO_2} – молярная масса угле-

**Исходные данные
Initial data**

Параметр	Значение
Средняя температура наиболее теплого месяца T_{max}	17,7°C
Средняя температура наиболее холодного месяца T_{min}	2,4°C
Средняя влажность наиболее влажного месяца W_{max}	0,85
Средняя влажность наиболее сухого месяца W_{min}	0,71
Водовяжущее отношение B/B	0,4
Расход цемента b	350 кг/м ³

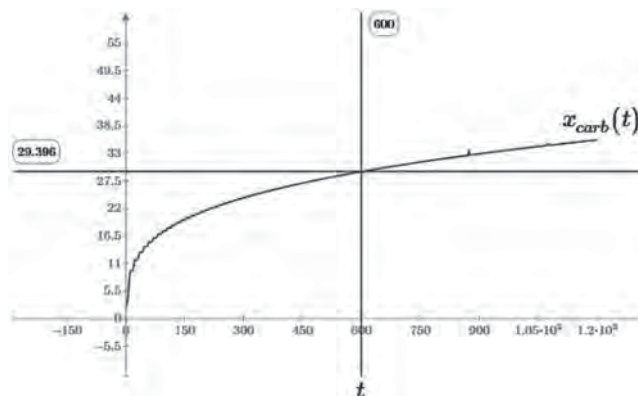


Рис. 1. График изменения глубины карбонизации бетона защитного слоя во времени: t – время, мес; $x_{carb}(t)$ – глубина карбонизации
Fig. 1. Graph of changes in the depth of carbonization of concrete cover over time: t – time, in months; $x_{carb}(t)$ – carbonation depth

кислого газа; M_{CaO} – молярная масса оксида кальция; a_H – степень гидратации цемента.

По предложенной модели проведены расчеты глубины карбонизации защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м и затопляемого только в период штормов. Конструкция эксплуатируется на юге острова Сахалин, выполнена из железобетона. Класс бетона В22,5 с расходом цемента 350 кг/м³ и водовяжущим отношением 0,4. Проектный срок эксплуатации конструкции – 50 лет. Исходные данные модели приведены в таблице.

Модель (2) рассчитывалась в программе Mathcad. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

Из графика (рис. 1) видно, что за 50 лет (600 мес) эксплуатации глубина карбонизации бетона составит 30 мм, или 60%. Степень карбонизации в данном случае $a_c=0,6$.

Модель диффузии хлоридов

В основе описания процесса диффузии хлоридов в защитный слой бетона лежит уравнение второго закона Фика [2]:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \tag{4}$$

При учете связывающей способности уравнение диффузии (4) принимает вид [2]:

$$\frac{dCf}{dt} = \frac{D_{Cl}}{1 + \left(\frac{1}{w_e}\right) \cdot \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)} \frac{d^2Cf}{dx^2}, \tag{5}$$

где C_f – концентрация свободных хлоридов в бетоне; C_b – концентрация связанных хлоридов в бетоне; D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне; w_e – свободная поровая влага; $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ – связывающая способность бетона.

Связывающая способность негасируемого бетона часто определяется наклоном связывающей изотермы. В данном исследовании используется модель изотермы Ленгмюра [2]:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_L}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_f}{b})^2} \quad (6)$$

Эффективный коэффициент диффузии хлоридов рассчитывается как [19]:

$$D_{Cl} = D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t), \quad (7)$$

где $f_T(t)$, $f_W(t)$, $f_t(t)$ – соответственно функции влияния температуры, влажности и времени на коэффициент диффузии; $D_{Cl,0}$ – начальный коэффициент диффузии хлоридов.

При подставлении уравнения (6) и (7) в уравнение (5) определяющее уравнение диффузии модифицируется следующим образом [2]:

$$\frac{d}{dt} C_{Cl} = \frac{D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t)}{1 + (\frac{1}{w_e}) \cdot (\frac{\alpha_L}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_{Cl}}{b})^2})} \frac{d^2}{dx^2} C_{Cl}. \quad (8)$$

По предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона железобетонного шельфового ранее описанного сооружения (таблица).

Модель (8) также рассчитывалась в программе Mathcad (рис. 2)

Из графика на рис. 2 видно, что уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 504 мес эксплуатации, или примерно 42 года.

Модель комбинированного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии

Предполагается, что уравнение переноса ионов хлорида после карбонизации по-прежнему соответствует второму закону диффузии Фика (5). Общее количество хлорида в единице объема бетона состоит из свободного хлорида в поровом растворе и связанного хлорида (соль Фриделя) [19]:

$$C_{Cl,carb} = w_e C_{fc} + C_{bc}, \quad (9)$$

где $C_{Cl,carb}$ – общая концентрация хлорида с учетом карбонизации; C_{fc} – содержание свободных хлоридов в бетоне; C_{bc} – содержание связанных хлоридов в бетоне; w_e – поровая влага.

Так как в конкретном случае взаимодействие бетона с окружающей средой сопровождается не

только проникновением ионов хлорида, но и карбонизацией, то остаточная связывающая способность бетона после карбонизации снижается.

На основе экспериментальных исследований [19] количество связанного хлорида зависит не только от концентрации свободного хлорида в поровом растворе, но и от степени карбонизации, как показано на рис. 3, поэтому предлагается заменить α_L на α_{Lc} для бетона после полной карбонизации [19]:

$$\alpha_{Lc} = \alpha_L (1 - d \cdot a_c), \quad (10)$$

где d – коэффициент уменьшения связывающей способности ионов хлорида за счет карбонизации, принимаемый равным 0,88 на основании исследований [19].

Принимая во внимание уравнение (10), закон Ленгмюра (6) с учетом карбонизации выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_L (1 - d \cdot a_c)}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_f}{b})^2} \quad (11)$$

Тогда определяющее уравнение диффузии модифицируется следующим образом:

$$\frac{d}{dt} C_{Cl} = \frac{D_{Cl,0} \cdot f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot f_t(t)}{1 + (\frac{1}{w_e}) \cdot (\frac{\alpha_L (1 - d \cdot a_c)}{(1 + \beta_L \cdot \frac{C_{Cl}}{b})^2})} \frac{d^2}{dx^2} C_{Cl}. \quad (12)$$

Как и в предыдущем случае, с помощью программы Mathcad по предложенной модели проводится расчет концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона железобетонного шельфового сооружения, отстоящего от береговой черты на расстоянии 10 м (см. таблицу). Результаты моделирования приведены на рис. 4.

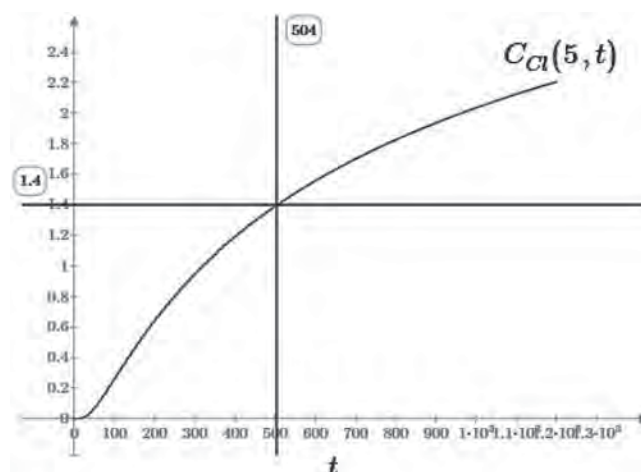


Рис. 2. График изменения хлоридов во времени (мес) без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: $C_{Cl}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t , kg/m^3 ; критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 kg/m^3 по массе вяжущего

Fig. 2. Graph of chloride changes over time (months) without taking into account carbonation at a depth of the protective layer of 5 cm: $C_{Cl}(x;t)$ – concentration of chloride ions at a depth of the protective layer X cm depending on time t , kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or 1.4 kg/m^3 by weight of the binder

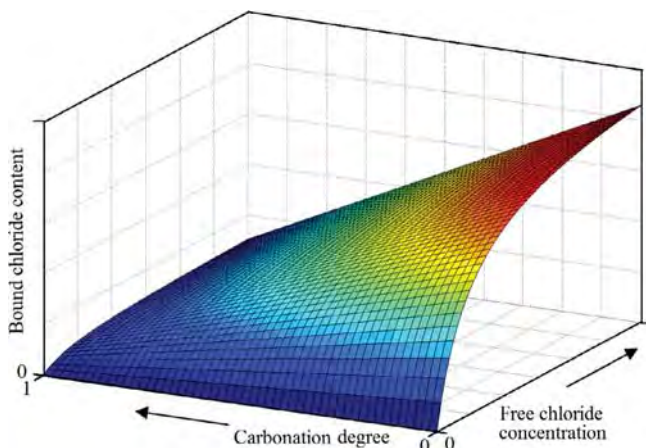


Рис. 3. Изменение содержания связанного хлорида в зависимости от концентрации свободного хлорида и степени карбонизации [19]
 Fig. 3. Change in the content of bound chloride depending on the concentration of free chloride and the degree of carbonation [19]

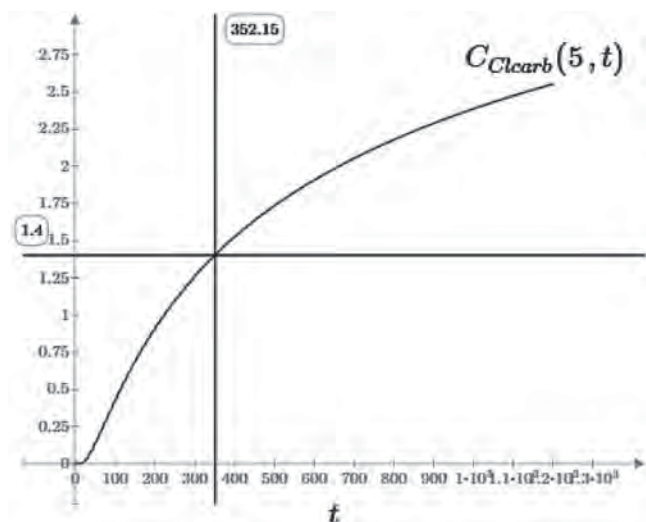


Рис. 4. График изменения хлоридов во времени (мес) с учетом карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Ccarb}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t , kg/m^3 ; критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или 1,4 kg/m^3 по массе вяжущего
 Fig. 4. Graph of chloride changes over time (months), taking into account carbonization at a depth of the protective layer of 5 cm: t – time, in months; $C_{Ccarb}(x;t)$ – concentration of chloride ions at the depth of the protective layer X cm depending on the time t , kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or 1.4 kg/m^3 by weight of the binder

Как видно из графика на рис. 4, уровень содержания хлоридов в приарматурной зоне достигнет критической концентрации через 352 мес эксплуатации, или примерно через 29 лет, что разительно отличается от случая без учета карбонизации, где критическая концентрация достигалась через 42 года.

Верификация модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии

Для оценки результатов модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии в 2016 г. проведено натурное обследование портовых сооружений на юге о. Сахалин. Комбинированное действие

хлоридов и углекислого газа наиболее хорошо прослеживалось в конструкции пешеходного моста Холмского морского торгового порта (рис. 5). По данным паспорта сооружения, пешеходный мост был введен в эксплуатацию в 1984 г., т. е. в момент обследования срок его эксплуатации составлял 32 года. Конструкция располагается в 10 м от береговой черты, находится в зоне брызг и периодически затапливается во время штормов.

Результаты замера глубины карбонизации путем фенолфталеиновой пробы показали, что она составляет примерно 25 мм. Уровень концентрации хлоридов на глубине защитного слоя бетона в данном случае составил 1,57 kg/m^3 по массе вяжущего.

На рис. 6 показано сравнение результатов моделирования изменения хлоридов во времени с учетом и без учета карбонизации с натурными испытаниями. Как видно из графика, для конструкции пешеходного моста со сроком эксплуатации 384 мес (или 32 года.) наиболее близка кривая совместного действия, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Влияние эксплуатационной нагрузки на деградацию сооружений при совместном действии карбонизации и хлоридной агрессии

Начиная с 2011 г. компания RILEM TC 246-TDC (в которую входит пять лабораторий из различных частей мира) разрабатывала метод определения прочности бетона, подверженного комбинированному воздействию проникновения хлоридов и механической нагрузки.

В ходе этой работы учеными был сделан вывод, что коэффициенты диффузии имеют тенденцию уменьшаться со временем воздействия, в то время как расчетные поверхностные концентрации увеличиваются. Таким образом, данные, которые они получили, частично согласуются с литературными данными, где говорится, что диффузия хлоридов при



Рис. 5. Пролет пешеходного моста Холмского морского торгового порта
 Fig. 5. Span of the pedestrian bridge of the Kholsmsk sea trade port

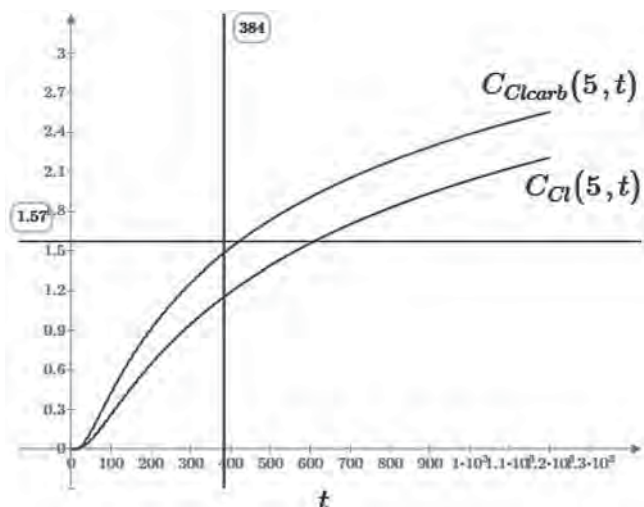


Рис. 6. График сравнения изменения хлоридов во времени (мес) с учетом и без учета карбонизации на глубине защитного слоя 5 см: t – время (мес); $C_{Cl}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t без учета карбонизации, kg/m^3 ; $C_{Clcarb}(x;t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см в зависимости от времени t для бетона вследствие комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии, kg/m^3 . Критическая концентрация хлоридов принята 0,4%, или $1,4 kg/m^3$ по массе вяжущего

Fig. 6. Graph of comparison of changes in chlorides over time (months) with and without taking into account carbonization at a depth of the protective layer of 5 cm: t – time, in months; $C_{Cl}(x;t)$ is the concentration of chloride ions at the depth of the protective layer X cm depending on the time t without carbonization, kg/m^3 ; $C_{Clcarb}(x;t)$ is the concentration of chloride ions at a depth of the protective layer X cm depending on the time t for concrete due to the combined effect of carbonization and chloride aggression, kg/m^3 ; the critical concentration of chlorides is taken as 0.4% or $1.4 kg/m^3$ by weight of the binder

умеренной сжимающей нагрузке происходит медленнее, но увеличивается, если приложенная нагрузка превышает половину предельной нагрузки. Содержание хлоридов на глубине защитного слоя значительно увеличивается при приложении растягивающего напряжения. Такой результат был ожидаемым, поскольку поровое пространство или микротрещины расширяются под действием растягивающего напряжения. Коэффициент диффузии рассчитывается следующим образом:

$$D_{cl}(t) = k_e k_l D_{cl.0} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{ncl},$$

где k_l – коэффициент, который учитывает фактическое напряженное состояние конструктивного элемента.

Для различных условий нагружения были рассчитаны коэффициенты напряжения k_l , где $k_l=1$ для эталона; $k_l=0,8$ для загрузки (сжатие) 30% от предельной разрушающей нагрузки; $k_l=1,17$ для загрузки (сжатие) 60%; $k_l=1,25$ для загрузки (сжатие/растяжение) 50% и $k_l=1,53$ для загрузки (растяжение) 80%.

Срок службы элементов, нагруженных на 60% прочности при сжатии, сократился в среднем в 0,82 раза по сравнению с ненагруженными элементами. Следует отметить, что при коэффициенте

сжимающего напряжения 60% только две из пяти лабораторий обнаружили заметное увеличение коэффициента диффузии (что связано с сокращением срока службы), другие обнаружили небольшое снижение коэффициента диффузии. Из представленных данных можно сделать вывод, что потребуются дальнейшие испытания для получения более точной информации о влиянии эксплуатационных нагрузок на срок службы железобетонных элементов. Также необходимы дополнительные исследования для изучения влияния эксплуатационных нагрузок на скорость карбонизации, однако некоторые выводы и корректировки в модели совместного действия можно сделать сейчас.

Выводы

1. Выполнен анализ механизма коррозионного разрушения шельфовых конструкций, сформулировано предельное состояние для химической реакции хлорида в защитном слое бетона шельфовых конструкций.
2. Предложена модель деградации защитного слоя бетона прибрежных сооружений от совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии.
3. Проведена верификация модели на портовых сооружениях о. Сахалин. Выполненные полевые измерения проникновения хлоридов в бетон показали, что при глубине 50 мм, в зоне брызг, концентрация хлоридов превышает 0,4% веса цемента (порог коррозии) при возрасте конструкции порядка 30 лет.
4. Обследование в порту Холмск подтвердило, что локально в определенных случаях в защитном слое бетона возникают области, где наблюдается одновременное действие и карбонизации и хлоридной агрессии. В этих локальных областях достигается максимальная концентрация хлоридов и возникает коррозия арматуры. Срок службы обследуемых сооружений не достигал проектного срока службы.
5. Моделирование концентрации ионов хлора в бетоне защитного слоя в соответствии с принятыми моделями в зависимости от срока службы, климатических условий и глубины армирования позволило сравнить содержание хлорида на некоторой глубине при расчете с учетом и без учета совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии.
6. Результаты моделирования хорошо соотносятся с натурными исследованиями, что в дальнейшем позволит разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтпригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде.
7. Проведен анализ влияния эксплуатационной нагрузки на деградацию сооружений при совместном действии карбонизации и хлоридной агрессии, даны рекомендации по изменению коэффициента диффузии хлоридов.

Список литературы / References

1. Huang T. The experimental research on the interaction between concrete carbonation and chloride ingress under loading: MSc thesis, Zhejiang University, 2013.
2. Zdeněk P. Bažant Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory. *Journal of the Structural Division*. 1979. Vol. 105. Iss. 6, pp. 1137–1153. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005168>
3. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 39, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012
4. Apostolopoulos C., Papadakis V. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 12, pp. 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006>
5. Yuan C., Niu D., Luo D. Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete. *Disaster Advances*. 2012. No. 5 (4), pp. 433–436.
6. Cairns J., State of the art report on bond of corroded reinforcement. *Tech. report ceb-tg-2/5*, 1998.
7. Cao C., Cheung M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 51, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.042>
8. Ho D.W.S., Lewis R.K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*. 1987. Vol. 17. Iss. 3, pp. 489–504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
9. Glass G., Buenfeld N. The influence of chloride binding on the chloride induced. *Corrosion Science*. 2000. Vol. 42. Iss. 2, pp. 329–344. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
10. Hans B. Corrosion in Reinforced Concrete Structures. Woodhead Publishing Limited, England, 2005.
11. Chindaprasit P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22 (8), pp. 1701–1707. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.06.002
12. Rahman M., Al-Kutti W., Shazali M., Baluch M., Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24. Iss. 7, pp. 789–796. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000458)
13. Ozbolt J., Balabanic G., Kuster M. 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Iss. 12, pp. 4166–4177. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.026>
14. Yoon I. Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study. *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 348–349, pp. 729–732. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.729>
15. Yoon I. Simple approach to calculate chloride diffusivity of concrete considering carbonation. *Computers and Concrete*. 2009. Vol. 6. Iss. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.12989/cac.2009.6.1.001>
16. Backus J., Mcpolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. 2013. Vol. 25 (1), pp. 3–11. DOI: 10.1680/adcr.12.00029
17. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Дegradaция железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
17. Shalyi E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Degradation of reinforced concrete structures of marine works from the combined impact of carbonation and chloride aggression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
18. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В., Румянцева В.Е., Будревич Н.А. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 3 (68). С. 123–131. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131
18. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V., Rumyantseva V.E., Budrevich N.A. Joint action of carbonization and chloride aggression on structural concrete: a probabilistic model. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 3 (68), pp. 123–131. (In Russian). DOI: 10.23968 / 1999-5571-2018-15-3-123-131
19. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 110, pp. 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034>
20. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
20. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl P. [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 320 p.
21. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
21. Alekseev S.N., Rozental N.K. Korroziionnaya stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy v agressivnoy proizvodstvennoy srede [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 205 p.

УДК 624.012.35

В.П. БЛАЖКО, канд. техн. наук (ihtias46@mail.ru)

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

Каркас сборный пространственный со стыками на винтовых муфтах

Описаны общие характеристики конструктивной системы полносборного каркаса из «Н»-элементов. «Н»-элемент – это рама из двух стоек, каждая высотой на один этаж, соединенных монолитно с ригелем. Из этих элементов собираются конструктивные ячейки с продольным, поперечным или перекрестным расположением несущих рам. Стыки стоек с ригелями жесткие и располагаются посередине высоты этажа. Общая пространственная устойчивость каркаса обеспечивается за счет компоновки рамных элементов, а также применения различного рода связей. Плиты перекрытий сборные. Стыки стоек рам сборно-монолитные с применением комбинированных муфт. Соединения «Н»-элементов – на стяжках с применением тяжей из гладкой арматуры или винтового арматурного проката.

Ключевые слова: железобетон, индустриальное производство, каркас здания, рамы.

Для цитирования: Блажко В.П. Каркас сборный пространственный со стыками на винтовых муфтах // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 14–19.

V.P. BLAZHKO, Candidate of Sciences (Engineering) (ihtias46@mail.ru),
Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev
JSC “Research Center “Stroitel’stvo”, Laboratory No. 2 (6, build. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

The Frame Prefabricated Spatial with Joints on Screw Couplings

The general characteristics of the structural system of a fully assembled frame made of “H” elements are described. The “H” element is a frame of two racks, each one floor high, connected monolithically with a crossbar. Structural cells with a longitudinal, transverse or cross arrangement of bearing frames are assembled from these elements. The joints of the racks with crossbars are rigid and are located in the middle of the floor height. The overall spatial stability of the frame is provided by the arrangement of frame elements, as well as the use of various kinds of connections. Floor slabs are prefabricated. The joints of the frame racks are prefabricated-monolithic with the use of combined couplings. Connections of “H” elements on screeds with the use of strands made of smooth reinforcement or screw reinforcement rolled products.

Keywords: reinforced concrete, industrial production, building frame, frames.

For citation: Blazhko V.P. The frame prefabricated spatial with joints on screw couplings. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 14–19. (In Russian).

В настоящее время в строительстве многоэтажных домов из железобетона на основе каркасной конструктивной схемы строятся здания в сборном, монолитном и сборно-монолитном исполнении. Каркасные конструктивные системы в монолитном исполнении имеют преимущества по сравнению со сборными и сборно-монолитными: это устойчивость системы при ЧС воздействиях, гибкость планировочных решений, сейсмостойкость. Каркасы из сборных элементов уступают по степени защиты от ЧС каркасам в монолитном исполнении, но сборные каркасные здания быстрее возводятся, на их возведение в меньшей степени влияют погодные условия [1–8].

В настоящее время каркас здания из железобетонных элементов комплектуется из колонн, ригелей, плит перекрытий, диафрагм жесткости, связевых плит. Узлы соединения колонн с ригеля-

ми в большинстве конструктивных систем не предназначены для передачи изгибающих моментов. Пространственная устойчивость каркаса обеспечивается за счет диафрагм жесткости, или связей. Известна конструктивная система, состоящая из рам Н-образной формы, состоящей из двух стоек и ригеля, монолитно связанного со стойками [9–11], в которой Н-рамы стыкуются друг с другом в одной плоскости, а стык стоек расположен посередине высоты этажа.

Известны конструктивные схемы, в которых применяются «Н»-элементы UHBS SYSTEM, Италия. Стык стоек располагается посередине высоты этажа. Данная система была запатентована в РФ [10].

В этой системе Н-образные несущие элементы располагаются через пролет, а в промежутки на консольные выступы из «Н»-элементов устанавливаются ригели. При такой компоновке каркасная система

UHBS SYSTEM по уровню защищенности от ЧС воздействий мало чем отличается от применяемых в РФ. Значительно повысить устойчивость системы можно, если принять иную компоновку «Н»-элементов, отличающуюся от предлагаемых в [10, 11]. На рис. 1–2 показаны фрагменты конструкции, в которой «Н»-элементы компонуются таким образом, что образуют перекрестно пространственную систему. При такой компоновке несущих элементов нагрузка от плит

перекрытий распределяется на обе стойки рамы поровну. Данная компоновка обеспечивает резервирование несущих элементов путем их дублирования. За счет пространственного расположения стоек и их объединения между собой винтовыми стяжками, а также общими омоноличенными стыками в местах соединения стоек рам смежных этажей повышается устойчивость конструкции при выключении в случае ЧС стоек в месте примыкания рам.

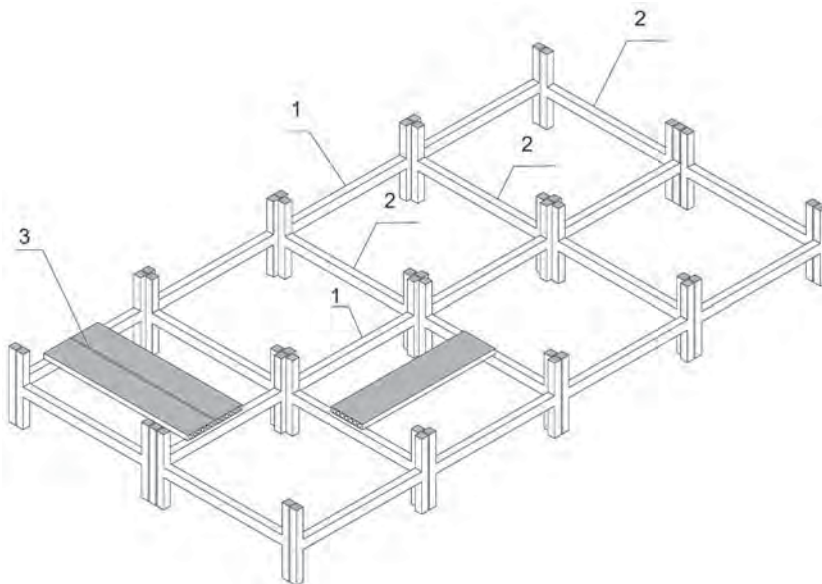


Рис. 1. Расположение Н-рам, образующих каркас: 1 – рамы продольного направления; 2 – рамы поперечного направления; 3 – рамы перекрытия

Fig. 1. The location of the H-frames forming the frame: 1 – frames of the longitudinal direction; 2 – frames of the transverse direction; 3 – overlap frames

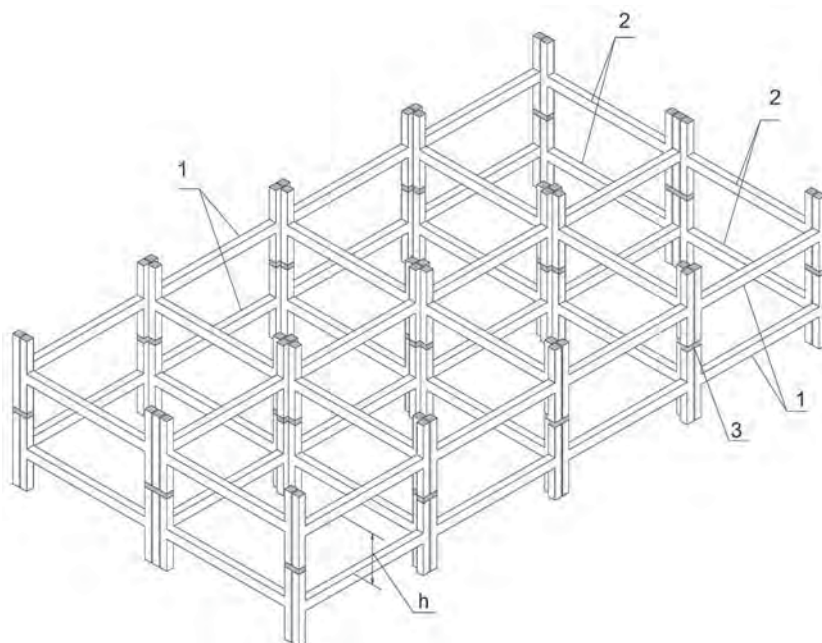


Рис. 2. Схема одного этажа каркаса: 1 – рамы продольного направления; 2 – рамы поперечного направления; 3 – бетон омоноличивания; h – высота этажа

Fig. 2. The scheme of one floor of the frame: 1 – frames of the longitudinal direction; 2 – frames of the transverse direction; 3 – grouting concrete; h – the height of the floor

«Н»-элементы (рис. 3) могут отличаться величиной межсоевого расстояния между стойками, а также сечением колонн и ригелей. Из таких элементов можно формировать различные конструктивные схемы, отличающиеся друг от друга по взаимному расположению «Н»-элементов (рис. 4). В состав каркаса можно вводить элементы в виде стеновых панелей для формирования лестнично-лифтового узла. «Н»-элементы в системе подразделяются на два основных вида: несущие и связевые. Несущие «Н»-элементы предназначены для опирания на них плит перекрытий. Связевые «Н»-элементы служат для придания каркасу пространственной устойчивости. По типам применяемых плит перекрытий в контексте данной системы могут рассматриваться плиты балочного опирания, а также плиты с опиранием по трем сторонам. Применяться могут плиты как сплошного сечения, так и многопустотные. В зависимости от вида применяемых плит при одних и тех же межсоевых габаритах появляются марки «Н»-элементов, отличающиеся друг от друга привязкой по высоте ригелей и их сечениями. В зависимости от расположения несущих «Н»-элементов плиты перекрытий могут располагаться как в поперечном, продольном направлениях, так и в их сочетаниях. Это иногда вызвано различной ориентацией вентиляционных проемов. «Н»-элементы способны воспринимать расчетные изгибающие моменты, возникающие при эксплуатации здания, поэтому в определенных случаях, при небольших горизонтальных нагрузках на здание, можно обойтись без диафрагм жесткости. В необхо-

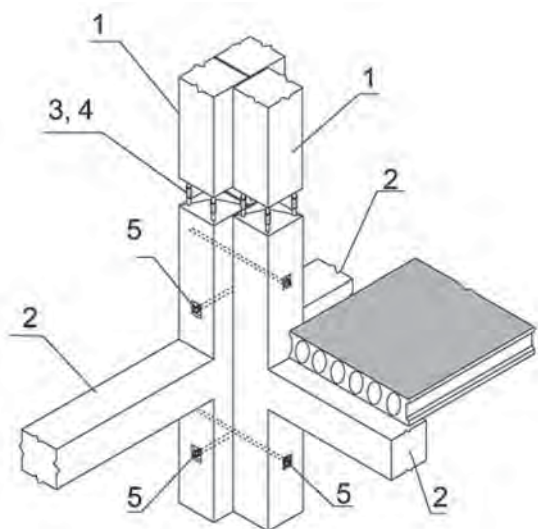


Рис. 3. Стык трех рам: 1 – стойка рамы; 2 – ригель рамы; 3 – выпуски винтовой арматуры; 4 – соединительные муфты; 5 – тяжи, пропущенные сквозь отверстия в стойках рамы

Fig. 3. The joint of three frames: 1 – the frame rack; 2 – the frame crossbar; 3 – the protruding screw couplings; 4 – connecting couplings; 5 – strands passed through the holes in the frame racks

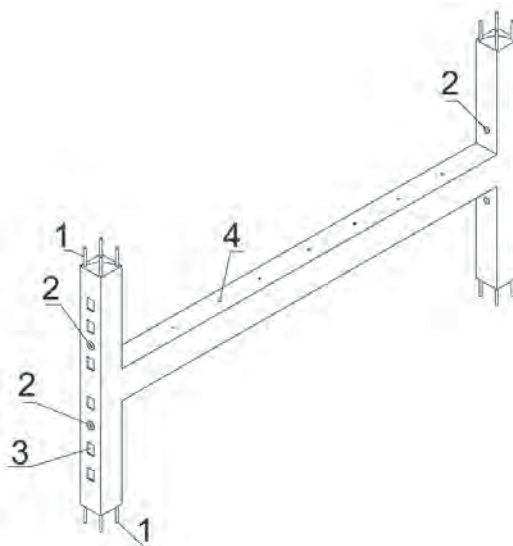


Рис. 4. Схема Н-рамы: 1 – выпуск винтовой арматуры; 2 – отверстия в стойках рамы для установки стяжных элементов; 3 – шпонки; 4 – гнезда для забивки нагелей

Fig. 4. The scheme of the H-frame: 1 – protruding screw reinforcement; 2 – holes in the frame racks for installing tie elements; 3 – dowels; 4 – sockets for hammering tie elements

димых случаях, когда несущей способности узлов соединения ригелей со стойками недостаточно, в конструктивную схему могут вводиться диафрагмы жесткости. Последние могут быть выполнены в виде сборных железобетонных панелей, стальных диагональных связей либо путем закладки пространства между стойками и ригелями армированной кладкой (кирпич, газобетонные блоки). На рис. 5, 6 приведен пример компоновки «Н»-элементов для 12-этажного здания.

Если рассматривать описанную выше конструктивную систему с точки зрения возможностей гибкости планировки, то они шире, чем в известных панельных системах. По этому показателю система сопоставима с каркасом в монолитном исполнении.

С точки зрения устойчивости системы против прогрессирующего обрушения данная система обладает преимуществами по сравнению с каркасными системами из отдельных элементов (колонна + ригель), а также панельными зданиями. «Н»-элементы могут изготавливаться на горизонтальных столах со съёмными бортами на магнитных фиксаторах, также могут использоваться поворотные столы или кассеты.

В рассматриваемой системе используется вертикальный стык стоек, в котором в качестве арматурных выпусков может использоваться арматура винтового профиля или арматура общего пользования А500С или А500СП с резьбой на концах выпусков. Для стыка выпусков рам предлагается использовать специальной конструкции комбинированные муфты, что позволит существенно сократить трудозатраты и стоимость вертикального стыка стоек по сравнению

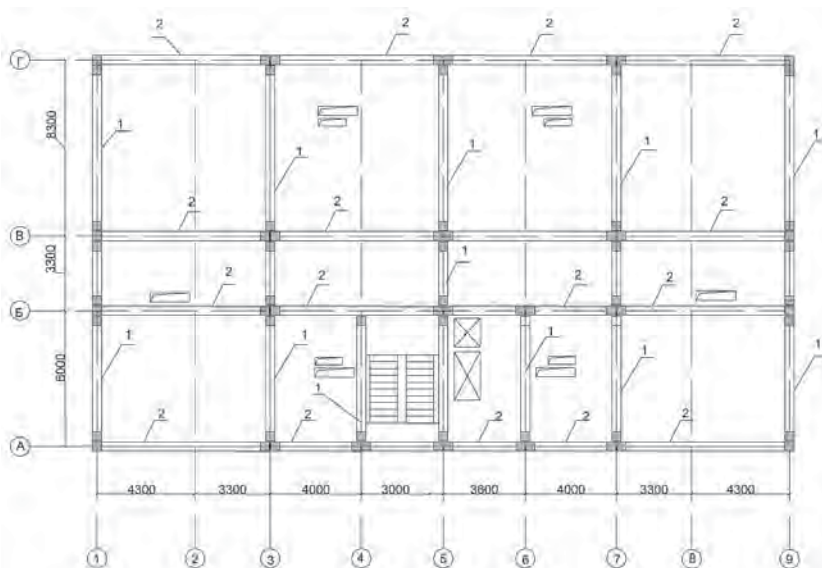


Рис. 5. Расположение рам на примере реального здания: 1 – поперечные рамы; 2 – продольные рамы

Fig. 5. The location of the frames on the example of a real building: 1 – transverse frames; 2 – longitudinal frames

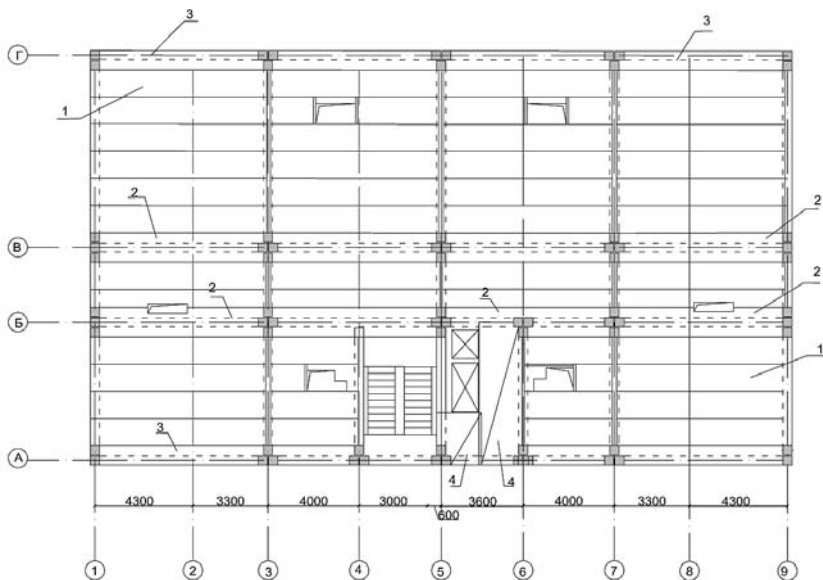


Рис. 6. Расположение плит перекрытий и связевых плит: 1 – рядовые плиты перекрытий; 2, 3 – связевые плиты; 4 – плиты перекрытий лестнично-лифтового узла
 Fig. 6. The location of floor slabs and bracing slabs: 1 – ordinary floor slabs; 2, 3 – bracing slabs; 4 – floor slabs of staircase and elevator section

Основные технико-экономические характеристики каркаса
The main technical and economic characteristics of the frame

Наименование	Показатели
Условия строительства	Обычные
Ветровой район	I
Снеговой район	III
Высота этажа, габариты здания в осях	3 м; 30,4×15,33 м
Общая площадь этажа без лестнично-лифтового узла	423 м ²
Шаг рам	6000×7600 мм
Сечения стоек рам	400×300; 250×250
Сечения ригелей	300×400(h); 250×300(h)
Класс бетона	B40–B30
Перекрытия	Сборные многпустотные плиты, связевые плиты
Расход бетона на 1 м ² общей площади	0,2023 м ³
Расход стали на 1 м ² общей площади	0,016 т
Количество рам на этаж	38 шт.
Количество плит перекрытий на этаж	56 шт.
Затраты труда на монтаж одного этажа	169 чел.-ч

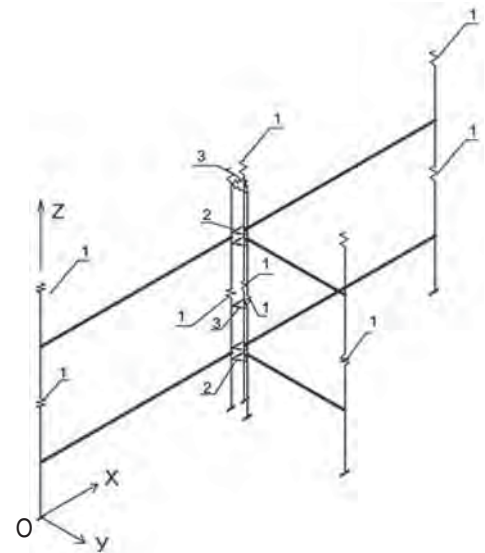


Рис. 7. Фрагмент расчетной модели из трех рам: 1 – вертикальные связи в стыке стоек рам; 2 – связи в плоскости XOY в уровне ригелей; 3 – связи в плоскости XOY в уровне стыка стоек
 Fig. 7. A fragment of the calculation model consisting of 3 frames: 1 – vertical connections at the junction of the frame racks; 2 – connections in the XOY plane at the level of the crossbars; 3 – connections in the XOY plane at the level of the joint of the racks

со сварными стыками на накладках. У комбинированных муфт нижняя часть выполнена как винтовая, а верхняя половина – стаканного типа с фиксирующими винтами.

Стык стоек сборно-монолитный. Замоноличивание стыков стоек производится после установки всех Н-рам в пределах этажа. Опалубка устанавливается по периметру стоек сразу на узел, после чего производится бетонирование. В результате бетон связывает все стойки в уровне стыка в единое целое; по сути, составное сечение становится цельным.

Дополнительно «Н»-элементы объединяются между собой с помощью тяжей из винтовой арматуры и винтовых гаек. Также могут применяться тяжи из арматуры гладкого профиля с резьбой на концах. Зазоры между смежными плоскостями колонн заполняются раствором. На этих плоскостях для повышения сдвиговой способности жесткости стыка можно предусмотреть углубления.

В расчетном отношении данная пространственная конструкция представляет собой совокупность рамных элементов, соединенных горизонтальными связями, податливость которых принимается в зависимости от их конструктивного исполнения. Податливость перекрытий в своей плоскости учитывается в зависимости от конструктивного решения стыков перекрытий между собой и с ригелями. На рис. 7 приведен фрагмент расчетной схемы для трех рам.

Предлагаемая конструктивная система может с успехом применяться для строительства в сейсмоактивных районах. В этой системе можно строить детские сады, школы, здания медицинского назначения. Данная каркасная система содержит замкнутые силовые ячейки (стойка + стойка + ригель + ригель); заполнение этих ячеек армированной кладкой позволит увеличивать несущую способность сооружения на сдвиг, что важно для восприятия сдвиговых усилий, возникающих в момент сейсмических толчков. Нужно отметить, что для проектирования таких систем имеется нормативная база, изготавливать рамы можно на существующих заводах КПД.

Важно также, что соединения элементов осуществляются без применения сварки. Транспортировка «Н»-элементов может осуществляться панелевозами или на железнодорожных платформах. Вес «Н»-элемента при его длине 7,6 м и высоте 3 м не превышает 4 т. Для оценки конструктивной системы был выполнен расчет 17-этажного каркаса. В табли-

це приведены основные технико-экономические характеристики каркаса.

Выводы

Резюмируя, можно сказать, что каркасная система, построенная на базе «Н»-элементов, во многом лучше, чем известные каркасные и панельные системы. «Н»-система универсальна, имеет высокую степень заводской готовности, нетребовательна к климатическим условиям сборки. Производство многопустотных плит перекрытий для комплектации каркаса освоено во многих регионах страны.

Фасад здания может решаться путем заполнения каркаса блоками из газобетона с последующим устройством вентилируемого фасада либо из легких навесных панелей. Предлагаемая конструктивная система принципиально приспособлена к сложным условиям строительства, может с успехом применяться для быстрого восстановления жилого фонда, разрушенного в результате ЧС, или для компенсации выходящего из строя ветхого жилья.

Список литературы

1. Коршунов А.Н. Крупнопанельные дома нового поколения // *Жилищное строительство*. 2018. № 3. С. 44–46.
2. Казин А.С. Индустриальное домостроение: вчера, сегодня, завтра // *Жилищное строительство*. 2018. № 10. С. 22–26.
3. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства // *Жилищное строительство*. 2015. № 5. С. 69–72.
4. Коршунов А.Н. Проектная «Универсальная система крупнопанельного домостроения» для строительства в Москве. Панельные дома могут быть как социальным, так и элитным жильем // *Жилищное строительство*. 2017. № 5. С. 11–15.
5. Власов В.А., Клименов В.А., Овсянников С.Н., Околичный В.Н., Балдин И.В. Опыт применения муфтовых соединений в полносборной домостроительной системе КУПАСС // *Жилищное строительство*. 2017. № 10. С. 28–34.
6. Блашко В.П. Каркас сборный из Н-элементов для жилищного строительства // *Жилищное строительство*. 2019. № 10. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-10-3-8>
7. Николаев С.В. Архитектурно-градостроительная система панельно-каркасного домостроения // *Жилищное строительство*. 2016. № 3. С. 15–25.
8. Овсянников С.Н., Семенюк П.Н., Овсянников А.Н., Околичный В.Н. Объемно-планировочные, кон-

References

1. Korshunov A.N. Large-panel houses of the new generation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 3, pp. 44–46. (In Russian).
2. Kazin A.S. Industrial housing: yesterday, today, tomorrow. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 10, pp. 22–26. (In Russian).
3. Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Bukhtiyarova A.S. Residential and public buildings of reinforced concrete panel-frame elements of industrial production. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 5, pp. 69–72. (In Russian)
4. Korshunov A.N. Project «Universal system of coarse-panel housing construction» for construction in Moscow. Panel houses can be both social and elite housing. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 5, pp. 11–15. (In Russian).
5. Vlasov V.A., Klimenov V.A., Ovsyannikov S.N., Okolichny V.N., Baldin I.V. Experience of using coupling joints in the full-assembly house-building system KUPASS. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 10, pp. 28–34. (In Russian).
6. Blazhko V.P. Prefabricated frame of H-elements for housing construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 10, pp. 3–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-10-3-8>
7. Nikolaev S.V. Architectural and town planning system panel-frame house building. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2016. No. 3, pp. 15–25. (In Russian).

- структивные и инженерные решения каркасной универсальной полносборной архитектурно-строительной системы // *Жилищное строительство*. 2017. № 6. С. 11–19.
9. Патент РФ 2479702. *Многоэтажный панельный дом повышенной стойкости к ударным и сейсмическим воздействиям* / Блашко В.П., Харитонова Г.В. Заявл. 16.11.2011. Опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.
 10. Патент ИЗ РФ 2585330. *Универсальная домостроительная система* / Худяков С.А., Айсверт Р.В., Сальваторе Порто (ИТ), Дмитрусенко М.С. Заявл. 30.09.2014. Опубл. 27.05.2016. Бюл. № 11.
 11. Патент ПМ РФ 62622. *Сборная железобетонная каркасная конструкция многоэтажного здания, рамная конструкция каркаса, элемент перекрытия* / Шапиро А.В., Волков А.Ю., Козицкий Б.Ф. Заявл. 19.07.2005. Опубл. 27.04.2007. Бюл. № 12.
 12. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Емельянов С.Г. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн // *Жилищное строительство*. 2018. № 12. С. 3–7.
 8. Osyannikov S.N., Semenyuk P.N., Ovsyannikov A.N., Okolichny V.N. Volume planning, constructive and engineering solutions of the frame universal a full-assembly architectural and construction system. *Zhishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 6, pp. 11–19. (In Russian).
 9. Patent RF 2479702. *Multi-storey panel house of high resistance to shock and seismic effects* / Blazhko V.P., Kharitonova G.V. Declared 16.11.2011. Published 20.04.2013. Bulletin No. 11. (In Russian).
 10. Patent IZ RF 258 5330 *Universal house-building system*. Khudyakov S.A., Aisvert R.V., Salvatore Porto (IT), Dmitrusenko M.S. Declared 30.09.2014. Published 20.04.2016. Bulletin No. 11. (In Russian).
 11. Patent PM RF 62622 *Prefabricated reinforced concrete frame construction of a multistory building, frame construction of a frame, element overlap*. Volkov A.Y., Kozitsky B.F. Declared 19.07.2005. Published 27.04.2007. Bulletin No. 12. (In Russian).
 12. Savin S.Y., Fedorov N.V., Yemelyanov S.G. Analysis of the survivability of precast-monolithic frames of multi-storey buildings from reinforced concrete panel-frame elements under accidental effects caused by the loss of stability of one of the columns. *Zhishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 12, pp. 3–7. (In Russian).

Министерство строительства РС (Я)
Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве
Научно-исследовательский центр «Строительство»
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

VI Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 85-летию создания строительного комплекса Якутии «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение»

5–6 октября 2021 г.

Организатор: Инженерно-технический институт СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Россия

НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений
- Энергоэффективное строительство
- Эффективные строительные материалы и технологии
- Архитектура и градостроительство
- Совершенствование систем инженерного обеспечения зданий и сооружений
- Экспертиза и управление недвижимостью
- Подготовка кадров для строительной отрасли
- Актуальные вопросы строительной отрасли в экстремальных условиях Арктики и Субарктики

Языки конференции: русский. Форма конференции: заочная. По итогам конференции будет опубликован электронный сборник научных трудов с присвоением ему ISBN, УДК, ББК и размещением в базе данных РИНЦ

Оргкомитет:

- Корнилов Т.А. – директор Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета, д-р техн. наук, доцент (председатель)
Матвеева О.И. – генеральный директор ОАО «Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства», канд. техн. наук, доцент
Местников А.Е. – зав. кафедрой производства строительных материалов, изделий и конструкций СВФУ, д-р техн. наук, профессор
Посельский Ф.Ф. – зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Иванов В.Н. – зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Федорова Г.Д. – доцент кафедры промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Архангельская Е.А. – зав. кафедрой экспертизы и кадастра недвижимости СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Юмашева Е.И. – главный редактор издательства «Стройматериалы» (научно-технические журналы «Строительные материалы», «Жилищное строительство», «Бетон и железобетон»)

Почтовый адрес: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58, СВФУ, Инженерно-технический институт

Телефон: 8-984-114-88-30 E-mail: orgkomitet-iti@ya.ru

Ответственный секретарь: Попов Александр Леонидович

УДК 666.98

Е.А. САДОВСКАЯ¹, инженер (elena_koleda@bk.ru); С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{1,2}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (snleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by); Н.А. БУДРЕВИЧ¹, инженер

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

² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки

Нанофибробетон – это строительный материал, отличающимся высоким показателем трещиностойкости. Определение коэффициента интенсивности напряжений нанофибробетона позволяет правильно оценить стойкость материала при образовании и развитии трещин. В представленной работе изложена многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона. Предлагаемая методика позволяет оценить качество нанофибробетонной конструкции в лабораторных условиях и при проведении строительных работ. Для контроля на строительной площадке используются современные и уже давно известные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковое прозвучивание, ультразвуковая томография, упругий отскок, отрыв со скалыванием. Для лабораторных исследований методикой предусмотрено изготовление образцов-призм. Образцы для испытаний могут быть заформованы либо вырезаны из тела конструкции. Данная методика позволяет в лабораторных условиях изучить такие параметры материала, как прочность на растяжение при изгибе, прочность на растяжение при раскалывании, критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, энергозатраты на отдельные этапы деформирования и разрушения образца. Причем предусмотрено получение всех параметров на одном образце из серии, что исключает погрешности и неточности показателей качества материала, связанные с разными условиями твердения, формования, неточностями в дублировании состава.

Ключевые слова: трещиностойкость, нанофибробетон, ультразвуковая томография, методика оценки качества, прочность на растяжение, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Для цитирования: Садовская Е.А., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 20–28.

E.A. SADOVSKAYA¹, Engineer (elena_koleda@bk.ru); S.N. LEONOVICH^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academic of RAACS (snleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by); N.A. BUDREVICH¹, Engineer

¹ Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220013, Belarus)

² Qingdao University of Technology (11, Fushun Rd, Qingdao, 266033, China)

A Multi-Parametric Method for Evaluating the Quality Indicators of Nano-Fiber Concrete for a Construction Site

Nano-fiber concrete is a building material for which a distinctive feature is an increase in the crack resistance characteristic. Determination of the stress intensity coefficient of nano-fiber concrete makes it possible to correctly assess the resistance of the material during the formation and development of cracks. The paper presents a multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete. The proposed method makes it possible to evaluate the quality of the nano-fiber concrete structure in the laboratory and during construction work. Modern and well-known methods of non-destructive testing, such as ultrasonic sounding, ultrasound tomography, elastic rebound, separation with chipping, are used to carry out control at the construction site. For laboratory studies, the method provides for the production of samples-prisms. Test samples can be molded or cut out of the body of the structure. This technique makes it possible to study in laboratory conditions such parameters of the material as the tensile strength during bending, tensile strength at splitting, the critical coefficient of stress intensity at normal pull-off, the critical coefficient of stress intensity during transverse shear, energy consumption for individual stages of deformation and destruction of the sample. Moreover, it is provided to obtain all the parameters on one sample from the series, which eliminates errors and inaccuracies in the quality indicators of the material associated with different conditions of hardening, molding, inaccuracies in the duplication of the composition.

Keywords: crack resistance, nano-fiber concrete, ultrasound tomography, quality assessment technique, tensile strength, critical stress intensity coefficient.

For citation: Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Budrevich N.A. A multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete for a construction site. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 20–28. (In Russian).

Коэффициент интенсивности напряжений является одним из наиболее важных показателей трещиностойкости такого материала, как нанофибробетон [1–3], так как способность нанофибробетона к препятствию развития трещин является основным

преимуществом перед обычным бетоном [4–7]. По этой причине способы и методы определения данного показателя должны наиболее полно раскрывать все особенности работы под нагрузкой и качество нанофибробетона [8–10].

Наноприбетон представляет собой композиционный материал с дисперсным армированием на разных структурных уровнях. Начиная с уровня наномасштабного размера (углеродные нанотрубки) и до макроуровня (традиционное армирование), предполагается эффективное сопротивление трещинообразованию под действием внешних нагрузок [1–3].

Особый интерес в строительстве вызывает контроль качества изготовления конструкции в условиях строительства. Так как основу прибетона составляет бетон-матрица, методы контроля, используемые для монолитных бетонных конструкций, будут также применимы и для наноприбетона. В связи с тем, что дисперсное армирование не оказывает существенного влияния на изменение прочности при сжатии, а это является одним из основных показателей качества для обычного бетона, методика контроля качества наноприбетона должна предусматривать получение параметров, которые характеризуют свойства материала, зависящие от введения прибетонных волокон (трещиностойкость, вязкость разрушения и др.).

В данной статье авторами предлагается методика, позволяющая оценить качество наноприбетонной конструкции и наноприбетона как материала (рис. 1).

На первом этапе производится сплошной контроль комбинированным (комплексным) методом. В результате измерений ультразвуковым методом и методом упругого отскока получают значение прочности бетонной матрицы. Участки (конструкции) с отличающимися (низкими) показателями испытываются дополнительно на последующих этапах в обязательном порядке.

На втором этапе производится ультразвуковая томография конструкции. Данный метод позволяет определить толщину конструкции и прилегающего к ней основания при одностороннем доступе, обнаружить пустоты и «ежи» из прибетонных волокон. Контроль может выполняться точечный и сплошной. Точечный контроль выполняется в обязательном порядке на всех конструкциях. Сплошной контроль может выполняться для конструкций с сомнительными показателями прочности, дефектности (по результатам точечного контроля).

На третьем этапе используется метод прямого отрыва со скалыванием для определения критического коэффициента интенсивности напряжений и прочности наноприбетона в конструкции. Данный метод обязательно проводится на участках (конструкциях), где на предыдущих этапах испытаний были выявлены дефекты, снижение прочности и др.

Четвертый этап включает в себя отбор образцов материала для последующих испытаний в лабораторных условиях. Образцы для испытаний могут быть зафор-



Рис. 1. Блок-схема методики контроля качества наноприбетонной конструкции

Fig. 1. Block diagram of the quality control methodology for nanofiber concrete in a structure

мованы либо вырезаны из тела конструкции. В лабораторных условиях один образец из серии подвергается поэтапным испытаниям: растяжение при изгибе, растяжение при скалывании, нормальный отрыв и поперечный сдвиг, неразрушающие методы испытаний.

Комбинированный метод

Цель данного метода состоит в определении прочности бетонной матрицы в составе прибетонного материала. Комплексный метод оценки прочности наноприбетона базируется на коррекции данных метода упругого отскока по СТБ 2264–2012 «Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности» и ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» поправкой, являющейся функцией разницы оценок прочности наноприбетона ультразвуковым импульсным методом по ГОСТ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» и метода упругого отскока (рис. 2, 3). Ультразвуковой импульсный метод использован в качестве калибровочного. С его помощью производится коррекция данных метода динамического индентирования [11, 12].

В одной и той же зоне контроля производятся испытания методом индентирования и ультразвуковым методом; значения косвенных параметров этих методов – II и VI . Прочность наноприбетона f_c участка контроля определяют в зависимости от разницы динамических

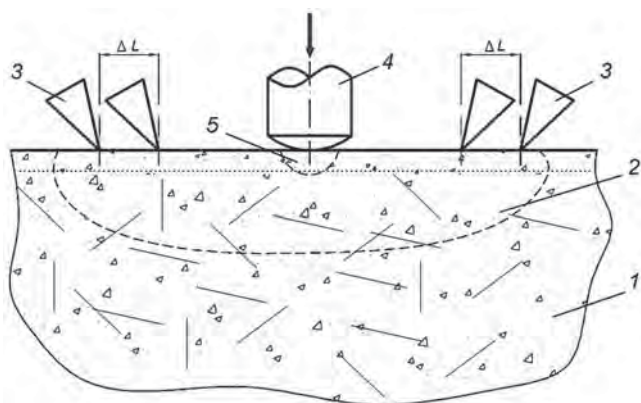


Рис. 2. Схема измерений комбинированным методом «индентирование – ультразвуковой импульсный метод» [11–14]: 1 – контролируемое изделие; 2 – область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 – излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 – индентор; 5 – область индентирования бетона

Fig. 2. Scheme of measurements by the combined method «indentation – ultrasonic impulse method» [11–14]: 1 – test item; 2 – area of concrete involved in the transmission of an ultrasonic pulse from the emitter to the receiver; 3 – emitting and receiving ultrasonic transducers; 4 – indenter; 5 – concrete indentation area

модулей упругости поверхностного слоя нанопфибробетона $E_{д}^*$ и внутренней области нанопфибробетона участка контроля $E_{д,в}$ из системы уравнений [13]:

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} (\theta \cdot e^{0,091(E_V-E)} f_{c,I} + f_{c,V});$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79, \quad (1)$$

где f_c – прочность нанопфибробетона контролируемого участка конструкции, МПа; $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$ – соответственно оценки прочности нанопфибробетона методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа; θ – безразмерный коэффициент.

При испытаниях методом упругого отскока расстояние от мест проведения испытаний до арматуры должно быть не менее 50 мм. При осуществлении выборочного контроля монолитных фиброжелезобетонных или нанопфибробетонных конструкций необходимо проводить испытания не менее чем 60% конструкций захватки, этажа, здания [14].

Количество и расположение контролируемых участков при испытаниях конструкций может указываться в рабочих чертежах на монолитные конструкции и (или) технологических картах контроля. Испытания проводят на участке конструкции площадью от 100 до 600 см². Количество испытаний на участке не менее пяти. Толщина конструкции на участке испытаний должна составлять не менее 100 мм.

Контроль нанопфибробетона в конструкции методом ультразвуковой томографии

Принцип действия приборов ультразвуковой томографии основан на испускании низкочастотных звуковых колебаний. Ультразвук проникает в изучаемый объект, отражается. Все фиксируется прибором, который при помощи специальных устройств преоб-

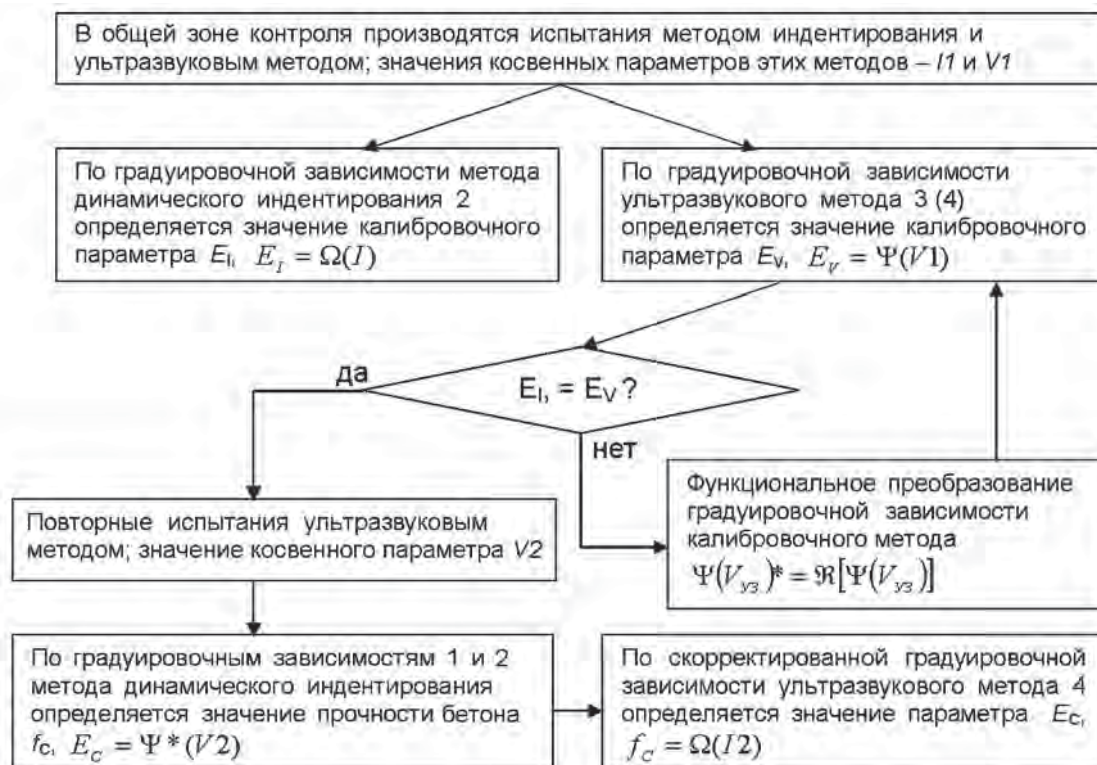


Рис. 3. Алгоритм объединения показателей неразрушающих методов контроля [11–14]

Fig. 3. Algorithm for combining indicators of non-destructive testing methods [11–14]

разует простые данные в сложное графическое отображение, что позволяет быстро считывать информацию [15, 16].

Для реализации метода ультразвуковой томографии может использоваться томограф ультразвуковой низкочастотный А1040 MIRA (рис. 4). Данный прибор предназначен для обследования монолитных бетонных (фибробетонных) и железобетонных строительных конструкций с целью поиска пустот, каналов, силовой арматуры, инородных включений, расслоений, трещин и прочих полостей, как пустых, так и заполненных жидкостью или твердым материалом, отличающимся от окружающего бетона физико-механическими свойствами [15, 16].

В приборе используется метод синтезированной фокусируемой апертуры с комбинационным зондированием, при котором происходит фокусировка ультразвука в каждую точку полупространства. Массив данных формируется путем сбора информации со всех измерительных пар антенного устройства томографа. Принимаемые антенной решеткой сигналы

обрабатываются на встроенном компьютере непосредственно в процессе работы.

Общая площадь участков, подлежащих контролю, должна быть не менее 10% от общей площади контролируемой поверхности. Число и расположение контролируемых участков должно указываться проектной организацией в рабочих чертежах конструкций в зависимости от геометрических размеров, назначения и технологии их изготовления. Область для проведения замера должна быть не более: для линейных конструкций – одного участка на 4 м длины; для плоских конструкций – одного участка на 4 м² площади; для монолитных конструкций сплошных стен – одного участка на 8 м² площади.

Определение прочности и критического коэффициента интенсивности напряжений нанопибробетона способом прямого отрыва

Задачей данного метода является определение критического коэффициента интенсивности напря-

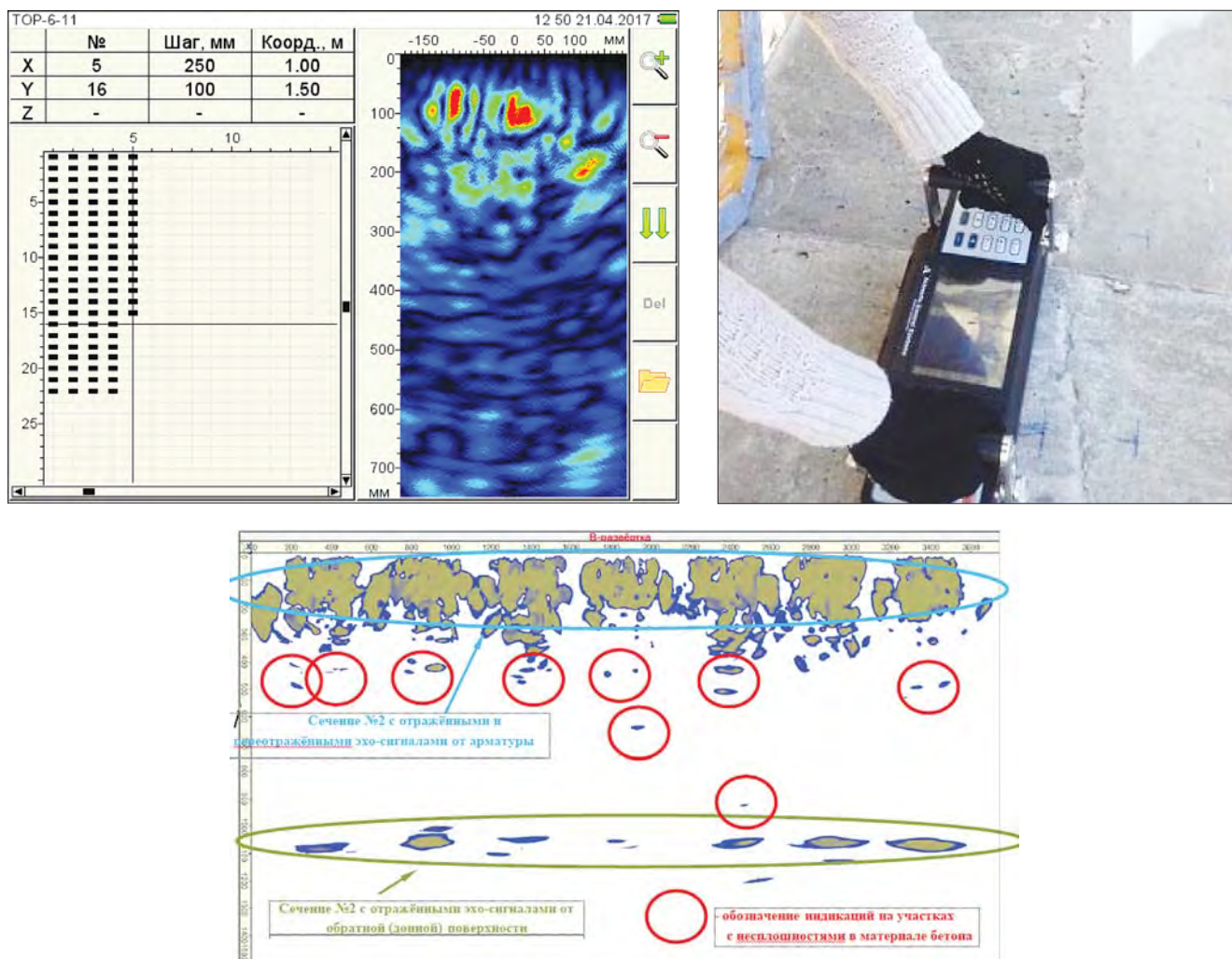


Рис. 4. Ультразвуковая томография прибором А1040 MIRA в режиме сплошного сканирования
 Fig. 4. Ultrasound tomography using the А1040 MIRA device in continuous scanning mode

жений наноприобетона эксплуатируемой конструкции при нормальном отрыве. Данный метод основывается на методе отрыва со скалыванием по СТБ 2264 и ГОСТ 22690 (рис. 5).

В зависимости от коэффициента интенсивности напряжений непосредственно в конструкции можно спрогнозировать такие параметры наноприобетона, как трещиностойкость, морозостойкость и долговечность материала.

Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений наноприобетона реализуют следующим образом [18]. В выбуренный в наноприобетонном массиве шпур радиусом r_0 устанавливается специальное анкерное устройство и часть наноприобетона выдерживается пресс-насосом типа ГПНС (гидравлический пресс-насос самоцентрирующийся), в виде усеченного конуса с максимальным радиусом разрушения r_{max} и длиной шпура h . Разрушение происходит по поверхности конуса, образующая которого совпадает с площадкой главных напряжений.

В процессе вырыва микрообъема непосредственно из конструкции на заданном участке, помимо величины усилия, определяют размеры усеченного конуса разрушения – радиус r_0 , длина h шпура, длина образующей l конуса разрушения и рассчитывают критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} наноприобетона по формуле [17]:

$$K_{IC} = \frac{3P[\cos^2(90-\alpha) - \sin^2(90-\alpha)]}{2\pi h^2(1 + \frac{r_0}{r_0+h \cdot \operatorname{tg}\alpha})} \cdot \sqrt{2\pi l} \left[\left(\frac{0,8}{\left(\frac{R}{l}\right)^3 - 1} + 0,7 \right) \right] \quad (2)$$

где P – усилие вырыва, МН; α – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура;

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{R}{h}\right) \quad (3)$$

При испытании после образования трещин происходит нарушение сцепления фибры с бетоном, сопровождающееся перемещением вырываемого микро-

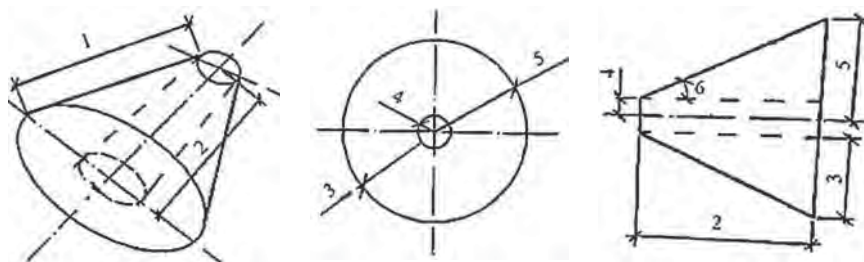


Рис. 5. Усеченный конус разрушения после отрыва со скалыванием: 1 – длина образующей конуса разрушения l ; 2 – длина шпура h ; 3 – разница между максимальным радиусом конуса разрушения и радиусом шпура R ; 4 – радиус шпура r_0 ; 5 – максимальный радиус конуса разрушения r_{max} ; 6 – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура α [17]

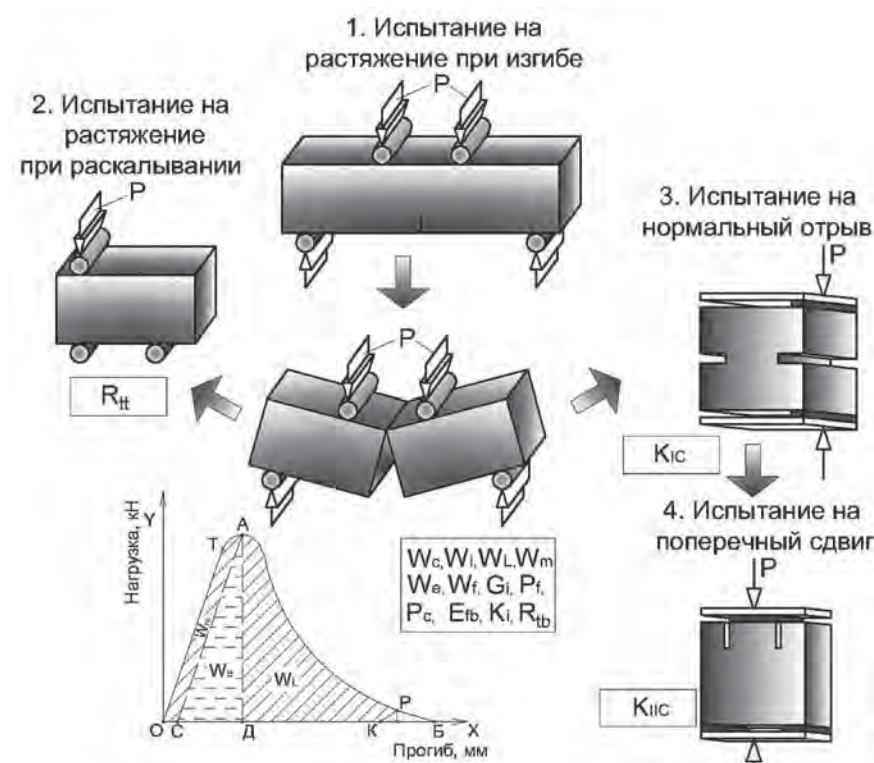


Рис. 6. Модель многопараметрической методики испытания наноприобетона в лабораторных условиях

Fig. 6. Model of a multi-parameter test procedure for nanofibre concrete in laboratory conditions

объема относительно тела конструкции. Прочность наноприобетона, являющуюся параметром качества, определяют по величине усилия, а расчет критического коэффициента интенсивности напряжений производится с учетом геометрических параметров шпура и усеченного конуса разрушения.

При испытаниях методом отрыва со скалыванием участки следует располагать в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры. Центры мест испытаний должны быть удалены друг от друга не менее чем на 200 мм, от края конструкции – не менее чем на 150 мм.

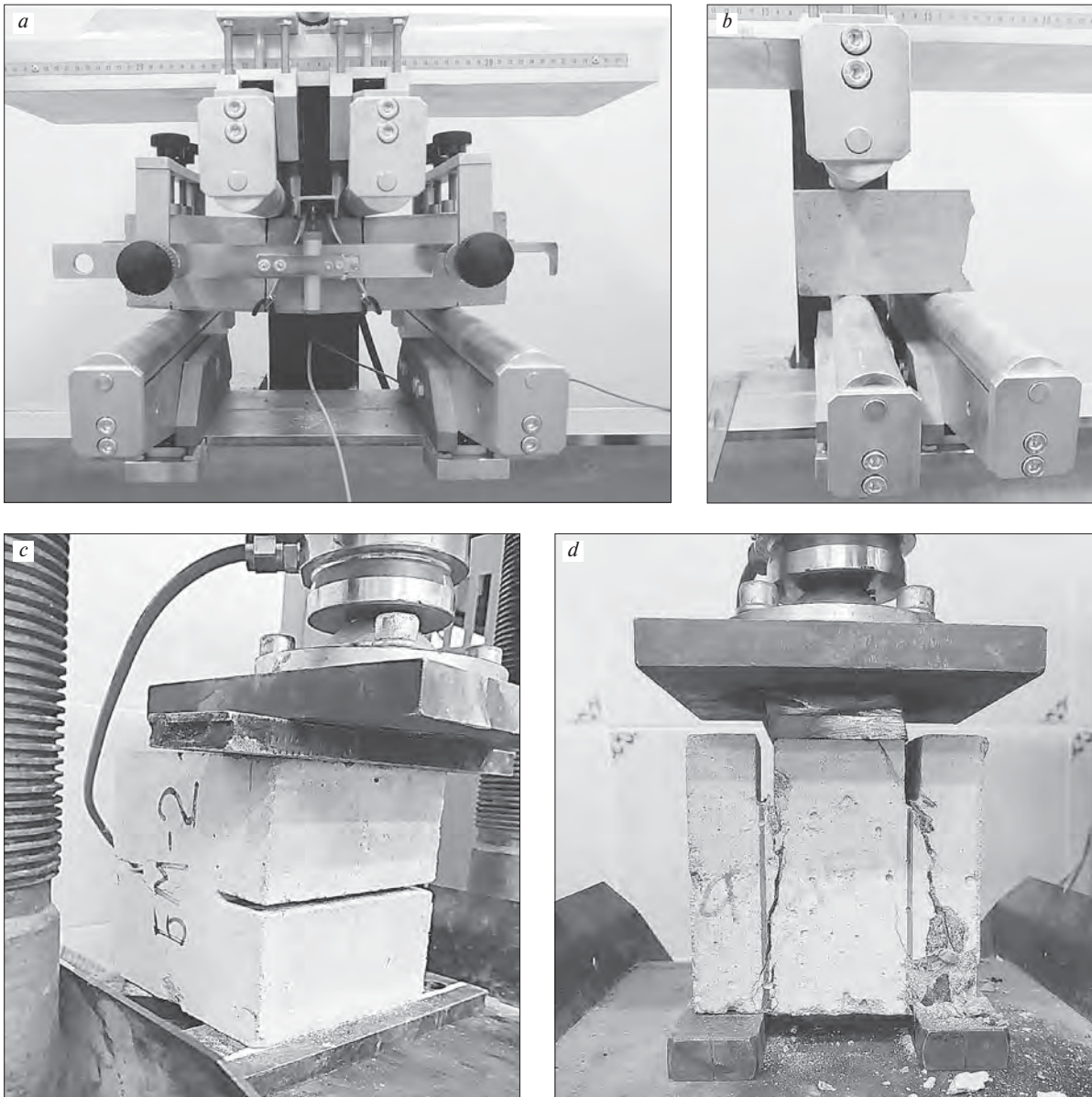


Рис. 7. Испытания нанофибробетона в лабораторных условиях: а – растяжение при изгибе с регистрацией диаграммы разрушения; б – растяжение при раскалывании; с – нормальный отрыв при внецентренном сжатии; д – поперечный сдвиг

Fig. 7. Tests of nano-fibro concrete in laboratory conditions: a – stretching during bending with the registration of the fracture diagram; b – stretching during splitting; c – normal pull-off during off-center compression; d-transverse shear

Результаты испытаний нанофибробетонных образцов
Test results of nanofibre concrete samples

Параметры	Нанобетонная матрица					
	Количество фибры (% по объему смеси)	Без фибры	Фибра стальная волнистая (1%)	Фибра стальная анкерная (1%)	Фибра полимерная волнистая (1%)	0,07% базальтовая + 0,26% микрофибра стальная прямая + 0,26% стальная анкерная
Растяжение при изгибе R_{fb} , МПа		2,8	5,9	9,4	6,2	4,2
Удельные энергзатраты G_f , Дж/м ²		208,9	800,58	1329,08	312,72	760,22
Растяжение при раскалывании R_{fb} , МПа		1,7	3,1	3,2	2,8	2,3
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , МН/м ^{3/2}		0,7	3,5	2,6	0,97	1,9
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IIC} , МН/м ^{3/2}		3,9	3,7	7,2	4,5	5,8

Лабораторные испытания

Многопараметричная методика испытания нанофибробетона в лабораторных условиях позволяет определить силовые и энергетические характеристики трещиностойкости при статическом кратковременном нагружении (рис. 6). Характеристики трещиностойкости определяют при неравновесных механических испытаниях [18].

Суть данной методики заключается в получении всех заявленных показателей качества нанофибробетона в результате испытания одного образца из серии. Образец-призма с надрезом (инициатором напряжений) первоначально испытывается на растяжение при изгибе по четырехточечной схеме нагружения (рис. 7, а). В результате испытания определяется значение прочности на растяжение и фиксируется полная диаграмма деформирования. По полученной диаграмме деформирования рассчитываются энергетические показатели и показатель вязкости разрушения – квазистатический коэффициент интенсивности напряжений (K_I) [19].

После испытания на изгиб образуются две половинки образца-призмы, пригодные для дальнейших испытаний. Одну половинку испытывают на растяжение при раскалывании (рис. 7, б). Методика испытания на прочность при раскалывании соответствует изложенной в ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» методике испытаний на растяжение при раскалывании по образцам-кубам. Из второй половинки с помощью режущих инструментов с алмазным напылением формируют образец-куб с инициаторами трещин в виде симметричных надрезов. Полученный образец испытывают на нормальный отрыв (рис. 7, в). Испытания проводятся при внецентренном сжатии. В результате испытания определяется значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на нормальный отрыв K_{IC} МН/м^{3/2}) [20].

После испытания на нормальный отрыв образуются два фрагмента (пластины). На полученных пластинах с помощью режущих инструментов с алмазным напылением выполняют зону концентрации напряжения в виде симметричных надрезов на одной грани изделия [19]. Испытания образцов-пластин проводятся при центральном сжатии (рис. 7, д). В результате испытания определяется значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на поперечный сдвиг K_{IIc} (Н/м^{3/2}) [21].

Для проведения испытаний изготавливаются образцы-призмы согласно требованиям ГОСТ 10180.

Список литературы

1. Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики нанобетона

Отношение высоты к ширине (диаметру) образца принимается равным 4. Рекомендуемые размеры призмы – 100×100×400 мм; 150×150×600 мм. Представленная методика позволяет получить оценку вязкости разрушения нанофибробетона на одном образце из серии, что исключает погрешности и неточности показателей качества материала, связанные с разными условиями твердения, формования, неточностями в дублировании состава.

В таблице приведены результаты испытаний по предложенной лабораторной методике нанофибробетонных образцов-призм в строительной лаборатории «Атомстройэкспорт» (Российская Федерация) на строительной площадке Белорусской АЭС в Республике Беларусь. За основу были взяты составы бетонных смесей, используемых при строительстве Белорусской атомной станции.

Заключение

Представленная методика позволяет оценить качество нанофибробетона в построечных условиях. Согласно изложенной методике, используются методы, основанные на ультразвуковом прозвучивании, ударном импульсе и методе прямого отрыва. Комбинация этих методов позволяет получить дополняющие друг друга показатели. Так, прямой показатель качества – прочность нанофибробетона в конструкции определяется комплексным методом и методом, основанным на способе отрыва. Косвенный показатель – скорость распространения ультразвука (что характеризует однородность материала) определяется комплексным методом и методом ультразвуковой томографии. В лабораторных испытаниях используется комбинация известных широкоиспользуемых стандартизированных методов испытаний. Определяемые по предлагаемой методике характеристики трещиностойкости (наряду с другими характеристиками механических свойств) могут быть использованы для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества нанофибробетонов;
- сопоставления нанофибробетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- анализа причин разрушений конструкций.

References

1. Polonina E.N., Leonovich S.N., Koleda E.A. Physical and mechanical characteristics of nanobeton. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. No. 4 (37), pp. 100–111. (In Russian).

- // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 100–111.
2. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055.
 3. Коледа Е.А., Леонович С.Н., Жданок С.А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2018. № 2. С. 16–23.
 4. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Неразрушающий контроль качества фибробетонных конструкций как компонент системы мониторинга рисков при эксплуатации производственного объекта // *Системные технологии*. 2016. № 2 (19). С. 85–95.
 5. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества. *Технология строительства и реконструкции: TCR-2015: Сборник докладов Международной научно-технической конференции*. Минск: БНТУ, 2017. С. 282–287.
 6. Abou El-Mal Hesham, Sherbini A.s., Sallam Hossam. Mode II fracture toughness of hybrid FRCs // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. No. 9. 10.1007/s40069-015-0117-4
 7. Xuesen Li, Jie Dai, Mingke Deng. Shear behavior of high ductile fiber reinforced concrete beams // *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60. Iss. 1, pp. 1665–1675. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.017>
 8. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. О вязкости разрушения фибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2008. № 3 (16). С. 80–83.
 9. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6–14
 10. Marcello Congro, Eleazar Cristian Mejía Sanchez, Deane Roehl, Ederli Marangon. Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. 106958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106958>
 11. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами: Монография. Минск: БНТУ, 2016. 330 с.
 12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Physicomechanical
 2. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile strength of nanofibrous concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055.
 3. Koleda E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A. Results of tensile tests of nanofibre concrete with complex fiber reinforcement. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2018. No. 2, pp. 16–23. (In Russian).
 4. Koleda E.A., Leonovich S.N. Non-destructive quality control of fiber-reinforced concrete structures as a component of the risk monitoring system during the operation of a production facility. *Sistemnye tekhnologii*. 2016. No. 2 (19), pp. 85–95. (In Russian).
 5. Koleda E.A. Fibroconcrete crack resistance characteristics as a determining factor of quality. *Crack resistance characteristics of fiber-reinforced concrete as a determining factor of quality. Construction and reconstruction technology: TCR-2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU. 2017, pp. 282–287. (In Russian).
 6. Abou El-Mal Hesham, Sherbini A.s., Sallam Hossam. Mode II fracture toughness of hybrid FRCs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. No. 9. 10.1007/s40069-015-0117-4
 7. Xuesen Li, Jie Dai, Mingke Deng. Shear behavior of high ductile fiber reinforced concrete beams. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60. Iss. 1, pp. 1665–1675. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.017>
 8. Pukharenko Yu.V., Golubev V.Yu. On the fracture toughness of fiber-reinforced concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2008. No. 3 (16), pp. 80–83. (In Russian).
 9. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Construction of modern concrete structures: defining principles and technological platforms. *Stroitelnye Materialy [Construction Materials]*. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).
 10. Marcello Congro, Eleazar Cristian Mejía Sanchez, Deane Roehl, Ederli Marangon. Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach. *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. 106958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106958>
 11. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Osnovy monitoringa vozvodimykh i ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh konstruktсии nerazrushayushchimi metodami [Fundamentals of non-destructive monitoring of erected and operated reinforced concrete structures]. Monograph. Minsk: BNTU. 2016. 330 p.
 12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Physicomechanical

- characteristics of concrete modified by a nanostructured-carbon-based plasticizing admixture // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 12–18.
13. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона // *Наука и техника*. 2017. Т. 16. № 4. С. 289–297.
14. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 25–32
15. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н. Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля. // *Контроль. Диагностика*. 2003. № 2. С. 30–39.
16. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы // *В мире неразрушающего контроля*. 2002. № 2 (16). С. 6–10.
17. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Influence of the nanostructured-carbon-based plasticizing admixture in a self-compacting concrete mix on its technological properties // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 2, pp. 375–382.
18. Леонович С.Н. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве // *Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности: Электронный сборник научных трудов международной научно-технической конференции*. Макеевка: ДОННАСА, 2020. С. 47–52.
19. Леонович С.Н., Зверев В.Ф., Литвиновский Д.А. Критерии хрупкого разрушения высокопрочного бетона. *Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН*. Казань, 2014. С. 169–173.
20. Патент РБ 16194. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Заявитель Белорусский национальный технический университет. Опубл. 30.08.2012.
21. Патент. RU 2621618. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Ким Л.В. Опубл. 06.06.2017.
- characteristics of concrete modified by a nanostructured-carbon-based plasticizing admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 12–18.
13. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Multiwave ultrasonic testing of concrete. *Nauka i tekhnika*. 2017. Vol. 16. No. 4, pp. 289–297. (In Russian).
14. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Improving the reliability of the control of concrete strength by non-destructive methods based on their combination. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 1, pp. 25–32. (In Russian).
15. Shevaldykin V.G., Samokrutov A.A., Kozlov V.N. Ultrasonic low-frequency piezoelectric transducers with dry point contact and their application for non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika*. 2003. No. 2, pp. 30–39. (In Russian).
16. Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic flaw detection of concrete by the echo method: state and prospects. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2002. No. 2 (16), pp. 6–10. (In Russian).
17. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Influence of the nanostructured-carbon-based plasticizing admixture in a self-compacting concrete mix on its technological properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 2, pp. 375–382.
18. Leonovich S.N. Method of quality control of steel fiber reinforced concrete by stress intensity factor at normal separation. *Behavior of concrete and reinforced concrete structures in the presence of loads and heat and humidity effects of various duration: Electronic collection of scientific papers of the international scientific and technical conference*. Makeevka: DONNASA, 2020, pp. 47–52. (In Russian).
19. Leonovich S.N., Zverev V.F., Litvinovsky D.A. Brittle fracture criteria for high-strength concrete. *Fracture Mechanics of Building Materials and Structures: Materials of the VIII Academic Readings of the RAASN*. Kazan. 2014, pp. 169–173. (In Russian).
20. Patent RB 16194. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [Method for determining the critical stress intensity factor of high-strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovskii D.A. Applicant Belarusian National Technical University; Publ. 30.08.2012. (In Russian).
21. Patent. RU 2621618. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [Method for determining the critical stress intensity factor of high-strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovskii D.A., Kim L.V. Publ. 06.06.2017. (In Russian).

УДК 691.539.216

В.В. БЕЛОВ, д-р техн. наук, зав. кафедрой
«Производство строительных изделий и конструкций» (vladim-bel@yandex.ru),
И.В. ОБРАЗЦОВ, канд. техн. наук, инженер Центра электронных образовательных ресурсов (sunspire@list.ru)
Тверской государственной технической университет (170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22)

Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов

Рассмотрены и обобщены основные закономерности формирования оптимальной зерновой структуры строительных композиционных материалов на цементной основе с минеральными наполнителями. Предложен комплексный способ компьютерной 3D-реконструкции зерновой структуры и расчета оптимальных составов сырьевых смесей, позволяющий варьировать широкий спектр параметров и оценивать производные свойства дисперсных систем, а также подбирать оптимальные гранулометрические составы смесей. Представлены экспериментальные данные исследований по достижению оптимальной структуры строительного композиционного материала.

Ключевые слова: дисперсная система, структурообразование, пространственная структура, структурная топология, оптимальная гранулометрия, плотная упаковка, компьютерная реконструкция, модель.

Для цитирования: Белов В.В., Образцов И.В. Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 29–38.

V.V. BELOV, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Chair "Production of Building Products and Structures" (vladim-bel@yandex.ru),
I.V. OBRAZTSOV, Candidate of Sciences (Engineering), Engineer of EScience&Learning Center
Tver State Technical University (22, Afanasy Nikitin Embankment, Tver, 170026, Russian Federation)

Optimal Structures of Raw Materials Mixtures When Manufacturing Construction Cement Composites

The main regularities of the formation of the optimum grain structure of construction composite materials on a cement basis with mineral fillers are considered and generalized. A complex method of 3D computer reconstruction of the grain structure and calculation of optimal compositions of raw materials mixtures is proposed, which makes it possible to vary a wide range of parameters and evaluate the derived properties of dispersed systems, as well as select optimal granulometric compositions of mixtures. Experimental data of studies on achieving the optimal structure of a building composite material are presented.

Keywords: disperse system, structure formation, spatial structure, structural topology, optimum granulometriya, dense packaging, computer reconstruction, model.

For citation: Belov V.V., Obraztsov I.V. Optimal structures of raw materials mixtures when manufacturing construction cement composites. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 29–38. (In Russian).

Процесс получения высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих строительных материалов ставит перед исследователями ряд задач, в числе которых разработка оптимальных составов, рецептур, технологических режимов и многие другие. Особенно интенсивно разрабатываются композитные строительные материалы, сочетающие в себе несколько компонентов, обладающих различными свойствами. Для получения строительного материала с требуемыми характеристиками необходимо оценивать эти свойства и уметь их регулировать.

Сыпучий материал является средой с очень специфическими свойствами, где доминирует случайность форм и размеров частиц, физико-механических свойств и условия взаимодействия частиц друг с другом, которые вдобавок зависят от влажности материала [1]. Формирование структуры дисперсных систем

во многом обуславливает свойства композиционных материалов, получаемых на их основе. Прочность пространственной структуры дисперсной системы и ее устойчивость, характер поведения при течении, скорость разрушения и восстановления структуры непосредственно связаны друг с другом [2].

В современном материаловедении проблема оптимизации структуры и свойств строительных композиционных материалов является первоочередной задачей технологов-проектировщиков, решение которой позволяет одновременно повысить экономичность, надежность и долговечность строительных композиционных материалов. Решение первоочередной задачи оптимизации возможно за счет синергизма многих областей научного знания, в том числе технологии строительных материалов, физики, химии, математики, программирования и др.

Вопросы оптимизации составов дисперсных систем широко рассматриваются многими исследователями в области строительного материаловедения [2–4]. Проявление физических явлений уплотнения (заполнения пустот) и раздвижки одних минеральных материалов другими с меньшими размерами зерен и их количественная оценка обеспечивают не только заполнение единицы объема монолитным веществом или материалом, но и формирование оптимальной макроструктуры минеральной части сыпучих смесей [5].

Существуют различные методики достижения оптимальных составов бетона и строительных смесей. Большинство методик базируются на аппроксимации зерновой структуры – представлении ее системой твердых сфер и математическом расчете гранулометрического состава [6–7]. Многие способы реализуются методами компьютерного моделирования с применением современных производительных алгоритмов: метода моделирования и аналитических расчетов, метода динамики многих тел (МКД), метода конечных элементов (МКЭ), метода гидродинамики потоков (CFD), метода дискретных элементов (DEM) и др. [8, 9].

На макроуровне структура бетона представляет собой плотно упакованные зерна заполнителя, раздвинутые и склеенные цементным тестом [9]. Если рассматривать сырьевую смесь на макроуровне, то ее можно представить как дисперсную систему «заполнитель–вяжущая часть», где пространственный скелет образуют плотно уложенные крупные зерна заполнителя, промежутки между которыми заполнены частицами вяжущей части (рис. 1).

Поровое пространство, формируемое типом укладки крупных частиц, определяет фактическое количество частиц вяжущей части, которая в процессе

твердения образует контактную зону или связующую матрицу, являющуюся с позиции механической прочности слабым элементом структуры [10]. Следовательно, для достижения плотной и прочной структуры необходимо выполнение двух условий: плотная упаковка зернового скелета заполнителя и равномерное распределение связующего вещества в структуре материала, образующего прочные контакты между частицами заполнителя.

Критерием оптимальности для грубодисперсных систем является плотность упаковки зерен. Известно, что правильный выбор зернового состава заполнителей для сырьевой смеси, обеспечивающий минимальную пустотность, или максимальную плотность упаковки зерен – один из важнейших аспектов задачи оптимизации [11]. Наибольшая плотность зерновой структуры грубодисперсной части (зерна заполнителя) строительного композита достигается за счет заполнения зернами меньших размеров пустот между крупными зернами, так называемая непрерывная гранулометрия заполнителя [3–5].

Как отмечалось выше, существует множество методов подбора оптимальной гранулометрии заполнителя. По результатам многочисленных исследований [3–5, 12] авторами выбран и реализован наиболее эффективный метод расчета гранулометрии заполнителя, базирующийся на компьютерном подборе непрерывного гранулометрического состава смеси различных по зерновым характеристикам компонентов [13, 14]. В основу метода заложен принцип генерирования компьютером случайных объемных долей смешиваемых компонентов известного зернового состава и последующая проверка приближения суммарного расчетного состава к эталонной гранулометрической кривой [15]. Метод был модернизирован дополнительно разработанным алгоритмом

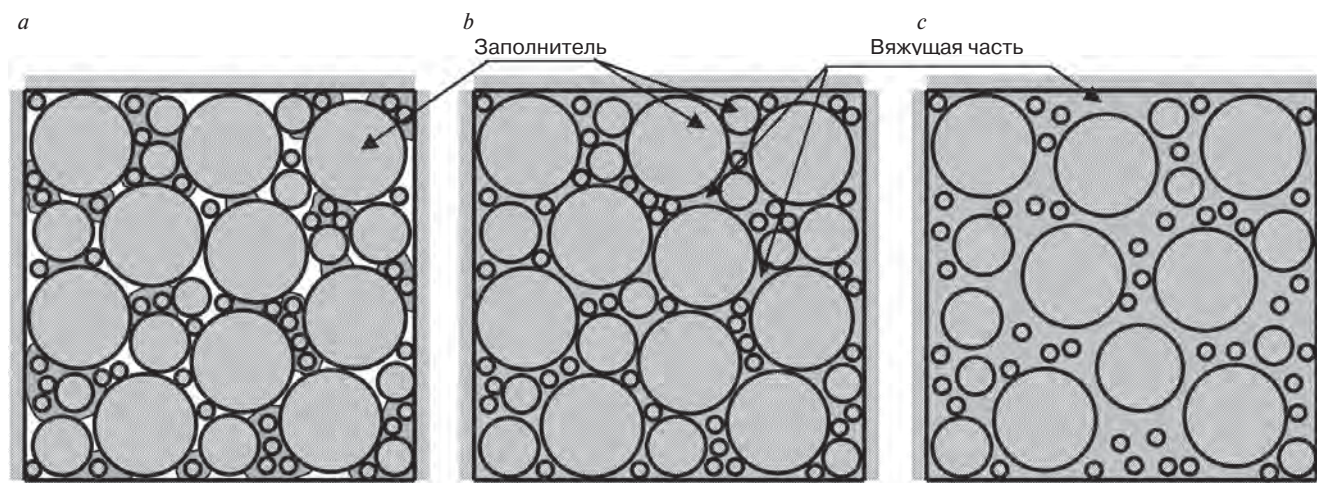


Рис. 1. Модель элементарной ячейки макроструктуры дисперсной системы «заполнитель – вяжущая часть»: а – недостаток вяжущей части; б – плотная упаковка заполнителя; с – избыток вяжущей части

Fig. 1. The model of the unit cell of the macrostructure of the dispersed system «filler-binder part»: a – lack of binding part; b – dense packing of the filler; c – excess of the binding part

автоматического поиска наилучшего решения, позволяющим уменьшать погрешность вычислений при достижении n -го числа удовлетворяющих решений, а также в математическую основу расчета было заложено модифицированное проф. В.В. Беловым [4] уравнение эталонной кривой Функа-Дингера, которое наиболее точно описывает реальную дисперсную систему с учетом наличия мелких фракций и различной формы зерен:

$$\frac{G_{np}}{100} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{X^n - D_{\min}^n}{D_{\max}^n - D_{\min}^n}, \quad (1)$$

где G_{np} – проход частиц (%) через сито размером X , мм; D_{\max} – наибольшая крупность зерна в смеси, мм; D_{\min} – наименьшая крупность зерна в смеси, мм; $n=0,5$ – коэффициент распределения; $\alpha=1-K_{\phi}$, для реальных частиц сыпучих систем, по данным многих исследователей, может изменяться в пределах от 0,08 до 0,14 (K_{ϕ} – коэффициент формы зерен).

Коэффициент формы шара равен единице. При этом чем сильнее форма зерен отличается от идеальной сферической формы, тем большую долю в зерновом составе должна занимать меньшая фракция. Данное условие регулируется коэффициентом α . Коэффициент n оказывает влияние в основном на содержание средних фракций, и на основании экспериментов можно утверждать, что более точные результаты получаются при использовании этого коэффициента, равного 0,5.

На современном этапе развития строительного материаловедения возникли теория искусственных строительных конгломератов (И.А. Рыбьев) и полиструктурная теория (В.И. Соломатов). В соответствии с последней теорией композиционные строительные материалы, в частности бетоны, представляются полиструктурными, т. е. составленными из нескольких структур, переходящих одна в другую по принципу «структура в структуре». Такое разделение носит не формальный, а объективный характер и оказывает исключительно плодотворным при направленном структурообразовании, формировании свойств материала и обосновании его технологии.

Например, *макроструктуру* бетона наблюдают невооруженным глазом или при небольшом увеличении. В качестве структурных элементов здесь выделяют крупный заполнитель, песок, цементный камень, воздушные поры. Иногда удобно принимать макроструктуру, состоящую из двух элементов: крупного заполнителя и растворной части, в которой объединяются цементный камень и песок. Микроструктуру наблюдают при значительном увеличении под микроскопом. Так, изучают структуру цементного камня, которая состоит из непрореагировавших зерен цемента, дисперсных частиц наполнителя, ново-

образований и микропор разных размеров. Большое значение для свойств бетона имеет различный характер микроструктуры цементного камня в объемном (в порах между зернами заполнителя) и пленочном (на их поверхности) состояниях. В межзерновом пространстве и крупных порах чаще появляются новообразования в кристаллическом виде. В оболочке новообразований вблизи границы с поверхностью заполнителя (контактной зоне), где возможности роста кристаллов ограничены, преобладают гелеобразные субмикроструктурные продукты гидратации с повышенной связностью. Поэтому прочность цементного камня в пленочном состоянии выше, чем в объемном, и контактные зоны в бетоне имеют повышенную прочность, что благоприятно сказывается на прочности бетона в целом.

Представление композиционных строительных материалов полиструктурными позволяет поэтапно оптимизировать их структуру и свойства. Это значительно расширяет возможности исследователя: каждый структурный уровень рассматривается как новый материал с заданными качественными показателями, достижение которых является самостоятельной задачей, решаемой с привлечением индивидуальных рецептурных и технологических ресурсов (рецептурно-технологических факторов).

Количество структурных уровней зависит от рецептуры композита и опыта исследователя (технолога). В общем случае выделяют микро-, мезо- и макроструктуру. При этом предполагается, что для практической технологии и установления объективных закономерностей структурообразования и формирования свойств композита его структуру, а именно полиструктуру, достаточно рассматривать как минимум на двух характерных уровнях – уровнях микро- и макроструктуры.

Управление свойствами субмикроструктуры – на атомарном или молекулярном уровнях – в настоящее время не проработано, так как многообразие механизмов взаимодействия между атомами и молекулами имеет универсальный характер и не зависит от структурного уровня материала.

При переходе от макро- к микроструктуре строительных композитов структурная топология раскрывает признак самоподобия системы, или фрактальный характер структуры [16, 17]. Однако принцип формирования структуры на микроуровне отличается тем, что гравитационная упаковка частиц перестает быть структурообразующим фактором. Для каждого структурного уровня устанавливают показатели качества, по которым проводится оптимизация. При переходе на следующий структурный уровень (к новому материалу) оптимизированные рецептура и технология предыдущего уровня уточняются. Поэтому

последовательное совмещение уровней (от микро- до макроструктуры) требует выделения критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (продукта технологии).

Для топологически подобных структурных уровней, т. е. содержащих дисперсные фазы (например, цементного камня), таким критерием является подвижность смеси (цементного теста). Часто материал (композит) рассматриваемого структурного уровня, полученный из смеси с требуемой подвижностью, обладает меньшей прочностью по сравнению с композитом, структура которого оптимизирована по прочности. Однако использование подвижной смеси на последующем структурном уровне обеспечивает изготовление качественного материала, рецептура и технология приготовления которого определяются собственными показателями качества. В этом случае реализуется принцип совмещения структур, согласно которому оптимальный по выбранному показателю качества материал (структурный уровень) получают из неоптимальных по конечному показателю, но необходимых по технологическим критериям предыдущих структурных уровней.

Вязущую основу строительного композиционного материала составляет тонкодисперсная система «вязущее–микронаполнитель». Как было отмечено выше, специфика взаимодействия тонкодисперсных частиц в такой системе характеризуется преобладающими поверхностными силами [3, 18]. При переходе

размеров частиц от нескольких десятков миллиметров (крупный заполнитель) до нескольких микрометров (цемент, микронаполнитель) существует некоторый минимальный (критический) размер зерна, ниже которого происходит изменение баланса действия поверхностных и гравитационных сил. Этот размер частиц является критерием агрегируемости (возможности налипания мелких частиц на крупные с образованием агрегатов-глобул). При размере минеральных частиц меньше критического следует ожидать принципиальной невозможности плотной упаковки частиц вследствие образования арочных и мостиковых структур [3]. Учитывая поверхностное взаимодействие частиц, структуру вяжущей части сырьевой смеси можно представить с точки зрения пространственно-структурной топологии [19], разделив ее на три типа, обусловленных различными объемными соотношениями компонентов (рис. 2).

Зерновая структура на тонкодисперсном уровне представляет подобие структуры заполнителя, что, в свою очередь, ставит задачу оптимизации микроструктуры – нахождения оптимальных соотношений размеров зерен и их количественного содержания в системе.

Согласно экспериментальным данным [18], плотность минерального скелета мелкозернистого бетона повышается при условии, что отношение объемов каждой последующей фракции наполнителя к предыдущей составляет 7:3 (8:3) при диаметре частиц мелкой фракции в 8–10 раз меньше, чем крупной. Со-

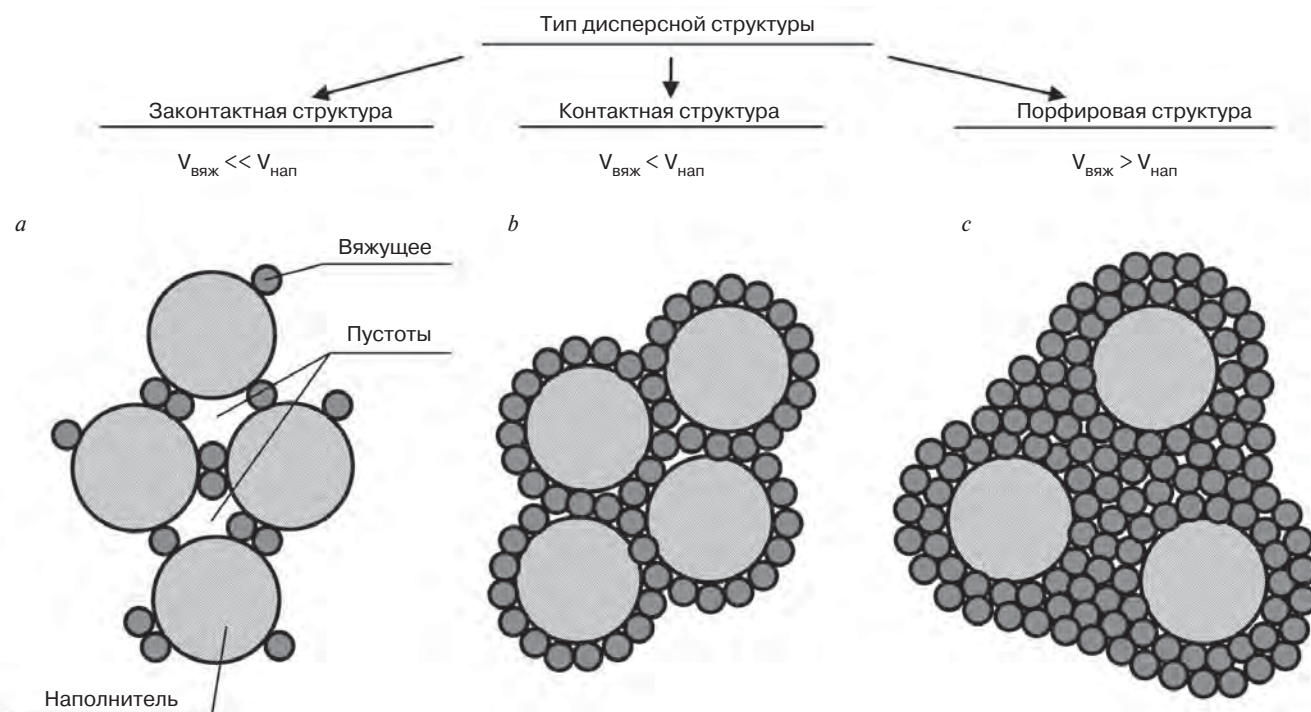


Рис. 2. Структурная топология бинарной дисперсной системы на уровне вяжущей части
Fig. 2. Structural topology of a binary dispersed system at the level of the binding part

гласно гипотезе, сформулированной авторами [20], о максимальном заполнении пустот, количество тонкокомолотых фракций песка определяется объемом пустот предыдущей фракции. В результате использование микронаполнителей (Н) трехфракционного состава ($H_1=6-7$ мкм; $H_2=0,6-0,7$ мкм; $H_3=50-90$ нм) позволяет в лабораторных условиях получить бетон с прочностью при сжатии порядка 130 МПа. Важным аспектом в [17] является то, что тонкокомолотая составляющая (до 100 нм) песка начинает проявлять активность, образуя мосты, связывающие ее с цементной матрицей, а также выполнять роль дискретного армирования. Полученный мелкозернистый бетон обладает прочностью при сжатии в 3–4 раза больше обычного, что достигнуто на основании гипотезы [18] о гранулометрии, введением нанодисперсных составляющих до 30 кг/м^3 или 2–3% от массы цемента.

Проф. С.П. Сивков отмечает, что небольшое (3,5–4,5 мас. %) количество карбонатного наполнителя в составе цемента положительно влияет на его свойства, при этом карбонат кальция выступает в качестве активного компонента. При более высоком содержании CaCO_3 начинает выступать в качестве инертного наполнителя. При умеренном содержании CaCO_3 и обеспечении необходимого гранулометрического состава (размер зерен цемента должен быть меньше, чем размер зерен кальцита) такая добавка может улучшить микроструктуру и свойства цементного камня в соответствии с теорией микробетона В.Н. Юнга. Дальнейшее увеличение количества добавки ухудшает свойства цемента за счет снижения плотности и увеличения пористости затвердевшего цементного камня [19].

Критерием оптимальности в тонкодисперсных системах выступает число контактов частиц, так на-

зываемых эффективных центров кристаллизации. Структурная топология определяет координацию ближайшего окружения частицы в трехмерном пространстве координационным числом и плотностью их упаковки в системе. Координационное число определяется количеством зерен (частиц) вокруг центрального зерна, соприкасающихся с ним. Рассмотрим топологические модели тонкодисперсной части при трех конфигурациях зерен: частицы наполнителя крупнее частиц вяжущего; частицы наполнителя сравнимы по размерам с частицами вяжущего; частицы наполнителя мельче частиц вяжущего.

На рис. 2 изображены три типа микроструктуры вяжущей части: законтрастная (а), контактная (b), порфиристая (c), обусловленные различным количественным соотношением $V_{\text{нап}}/V_{\text{вяж}}$. Законтрастная структура (рис. 2, а и 3, а) формируется при высоком $V_{\text{нап}}/V_{\text{вяж}}$ при условии $V_{\text{вяж}} \ll V_{\text{нап}}$; когда жесткий каркас наполнителей связан вяжущим в точечных контактах между ними, частички наполнителя не покрыты сплошной оболочкой вяжущего, а межчастичные пустоты не заполнены вяжущим. Такая структура является непрочной, характеризуется малым координационным числом и неплотной упаковкой частиц. Порфиристая структура (рис. 2, c и 3, c) формируется при условии $V_{\text{вяж}} > V_{\text{нап}}$, при этом $V_{\text{нап}}/V_{\text{вяж}} < 1$, частицы наполнителя «плавают» в вяжущем. Оптимальной с позиции экономии компонентов и плотности структуры является контактная структура (рис. 2, b и 3, b) с повышенным отношением $V_{\text{нап}}/V_{\text{вяж}}$ при условии $V_{\text{вяж}} < V_{\text{нап}}$. Частички наполнителя создают жесткий скелет, соприкасаясь между собой через тонкий слой вяжущего, при этом каждая частичка наполнителя покрыта слоем вяжущего, а межчастичные пустоты заполнены вяжущим [19]. Система с такой структурой является системой заполненного типа, при этом

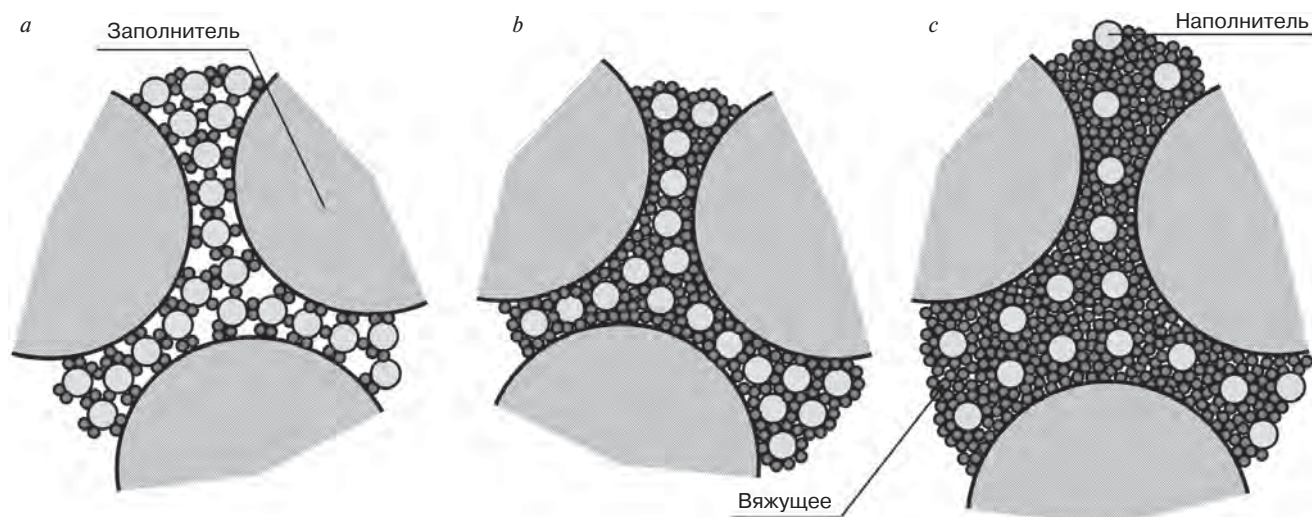


Рис. 3. Три типа структуры трехкомпонентной системы при условии, что зерна наполнителя крупнее зерен вяжущего ($D_{\text{нап}} > D_{\text{вяж}}$)
 Fig. 3. Three types of structure of a three-component system, provided that the filler grains are larger than the binder grains ($D_{\text{filler}} > D_{\text{binder}}$)

поровое пространство между частицами заполнителя в свою очередь заполнено частицами тонкодисперсной вяжущей части. Система заполненного типа характеризуется условием $V_{зап.зер} \ll V_{зап.пуст}$, где $V_{зап.зер}$ – объем заполняющих зерен; $V_{зап.пуст}$ – объем межзерновых пустот. При этом $V_{зап.зер} \gg V_{зап.пуст}$ система заполненного типа перейдет в систему раздвинутого типа, характеризуемую порфириковой структурой.

При равенстве размеров частиц наполнителя и вяжущего ($D_{нап} \approx D_{вяж}$) тонкодисперсная система становится более однородной и характер взаимодействия частиц примерно одинаков. На рис. 4 изображена топологическая модель тонкодисперсной структуры с одинаковым размером зерен вяжущего и наполнителя.

Вяжущие системы, в которых размер зерен наполнителя меньше размера зерен вяжущего ($D_{нап} < D_{вяж}$), имеют несколько иную структуру. Согласно теории проф. Ю.М. Баженова [23], оптимальной конфигурацией является отсутствие возможности непосредственного взаимного контактирования частиц цемента между собой за счет расположения частиц микронаполнителя вокруг частиц цемента. Так, например, при смешивании с водой частицы цемента удалены друг от друга на расстояние, близкое к диаметру частиц микрокремнезема, что предотвращает возможность агрегирования. При таком расположении частиц микрокремнезема ускоряется процесс взаимодействия гидратной извести цемента с

близрасположенными потребителями ее, повышается микрооднородность структуры и прочность модифицированной цементной матрицы.

Если дисперсный наполнитель с суперпластификатором вводится в цемент рядового помола с $S_{ц} = 270 \text{ м}^2/\text{кг}$, то топология взаимного расположения частиц компонентов будет определяться количественным соотношением частиц (рис. 5).

Соотношение более крупных частиц вяжущего $N_{ц}$ и менее крупных частиц наполнителя $N_{н}$ можно выразить как:

$$\frac{N_{ц}}{N_{н}} = \frac{M_{ц} \cdot d_{н}^3 \cdot \rho_{н}}{M_{н} \cdot d_{ц}^3 \cdot \rho_{ц}}, \quad (2)$$

где $M_{ц}$ и $M_{н}$ – массовые доли частиц вяжущего и дисперсного наполнителя с оболочкой соответственно; $d_{ц}$ и $d_{н}$ – диаметры частиц цемента и дисперсного на-

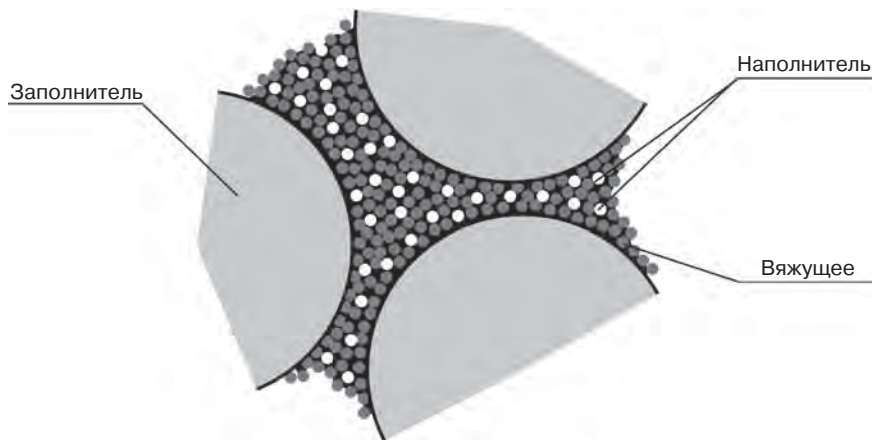


Рис. 4. Структурная топология трехкомпонентной системы при условии, что зерна наполнителя и зерна вяжущего одинакового размера ($D_{нап} \approx D_{вяж}$)
 Fig. 4. The structural topology of a three-component system, provided that the filler grains and the binder grains are of the same size ($D_{filler} \approx D_{binder}$)

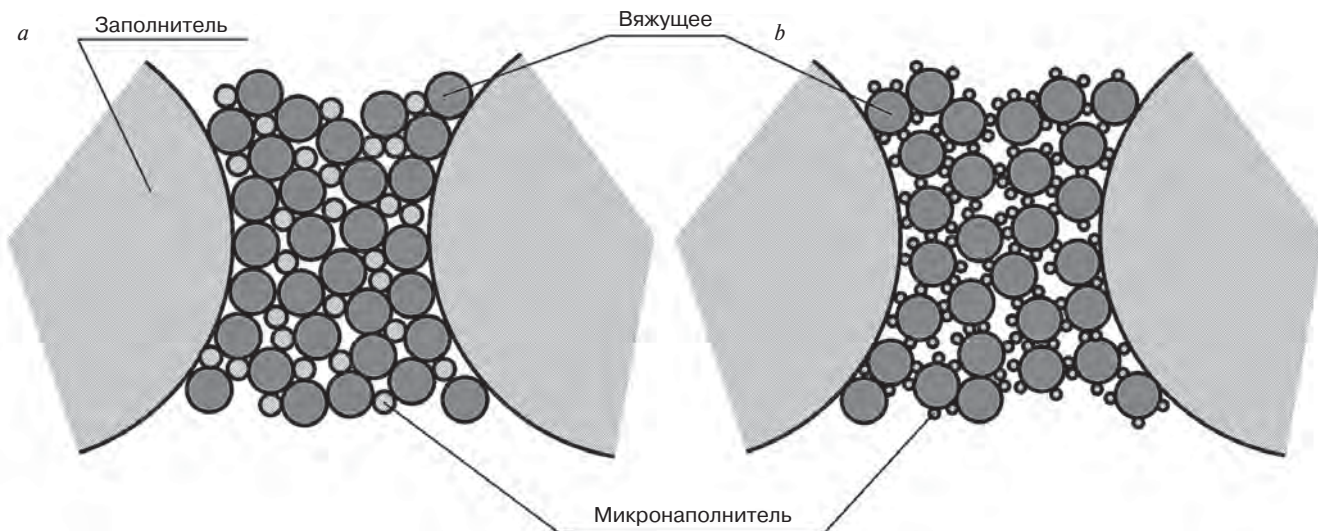


Рис. 5. Структурная топология взаимного расположения частиц цемента и дисперсного наполнителя со слоем суперпластификатора ($D_{нап} < D_{вяж}$): а – дисперсность минерального наполнителя $700 \text{ м}^2/\text{кг}$; б – дисперсность минерального наполнителя $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$
 Fig. 5. Structural topology of the mutual arrangement of cement particles and dispersed filler with a layer of superplasticizer ($D_{filler} < D_{binder}$): а – dispersion of mineral filler $700 \text{ м}^2/\text{кг}$; б – dispersion of mineral filler $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$

полнителя с оболочкой; $\rho_{ц}$ и $\rho_{н}$ – истинные плотности цемента и дисперсного наполнителя.

При массовой доле дисперсного наполнителя с суперпластификатором $M_{ц}=0,15$ ($M_{н}=0,85$); $\rho_{ц}=3,1$ и $\rho_{н}=2,6$ г/см³; $d_{ц}=7,2$ мкм и $d_{н}=3,4$ мкм соотношение крупных и мелких частиц составит 0,5, т. е. на одну крупную частицу цемента будет приходиться две мелкие частицы наполнителя. В топологическом размещении мелких и крупных частиц возможность контактирования частиц вяжущего между собой не полностью исключается вследствие того, что мелкие частицы дисперсного наполнителя будут преимущественно располагаться во вмещающих пустотах крупных цементных частиц. Вероятность образования локальных агрегатов из цементных частиц остается высокой.

Согласно [23], увеличение количества наполнителя выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности. При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента ($d_{ц} > d_{н}$), или достижение максимального насыщения цемента наполнителем без образования контактов частиц наполнителя между собой, если частицы наполнителя и цемента соизмеримы ($d_{ц} = d_{н}$).

Наиболее точно оценить параметры дисперсной структуры композита на микроуровне возможно, применяя методы компьютерного моделирования, а именно трехмерную геометрическую реконструкцию в декартовой системе координат с учетом физических законов взаимодействия частиц. Для построения геометрических 3D-моделей дисперсной структуры была поставлена задача: разработать программное средство, позволяющее установить начальные параметры системы, рассчитать пространственное расположение элементов системы с учетом физических принципов взаимодействия частиц – гравитационных и поверхностных сил, а также методом суммирования столкновений элементов рассчитать фактическое количество контактов частиц при определенной степени заполнения ими элементарного объема. Для решения поставленной задачи были выбраны следующие средства разработки: среда программирования Dark Basic Professional v.1.071 (free license) с функциональным расширением Dark Physics v.1.05 (лицензионная версия:

артикул F76BJ84Q79 от 2013-01-03) и пакет разработки Microsoft Visual Basic v.6.0.

Комплект программных библиотек Dark Physics базируется на технологии NVidia PhysX – кроссплатформенном физическом движке для симуляции ряда физических явлений. В основу расчетов физики твердого тела системой PhysX заложены фундаментальные физические законы. Как и в методе дискретных элементов [7, 9], каждая твердая частица рассматривается как отдельный объект и ее движение и взаимодействие рассчитываются уравнениями Ньютона и Эйлера. Функциональные возможности данной технологии позволяют одновременно рассчитывать большое число объектов, используя ресурсы графического процессора компьютера.

С помощью вышеуказанных средств разработки авторами разработана программа трехмерного геометрического моделирования тонкодисперсной структуры строительного композиционного материала.

Принцип работы программы следующий. Создается элементарная кубическая ячейка с размером ребра S , мкм (50–100 мкм). По выбору пользователя в ячейке создается условный скелет из крупных зерен заполнителя (0, 2, 4, 6 и 8 зерен), которые формируют конфигурацию порового пространства. Пользователь назначает величину зазора между зернами макроскелета, тем самым имитируя раздвижку зерен заполнителя. Затем в элементарной ячейке создается бинарный массив сфер, имитирующий дисперсную систему «вяжущее+заполнитель» (рис. 6). Пользователь задает диаметры сфер $D_{в}$ и $D_{н}$, их количества $N_{в}$ и $N_{н}$, а также плотности $\rho_{в}$ и $\rho_{н}$. Сферы распределяются случайным образом в пространстве макропоры. Одновременно на все сферы бинарной системы действуют физические законы – упругое соударение, гравитация и силы поверхностного притяжения. Пользователь может регулировать физические параметры – коэффициенты динамического и статического трения сфер, толщину слоя мелких частиц, притягиваемых к крупным (1–5 слоев), а также наличие сил тяжести, действующих на частицы, вычисляемых по их массам с учетом ускорения свободного падения.

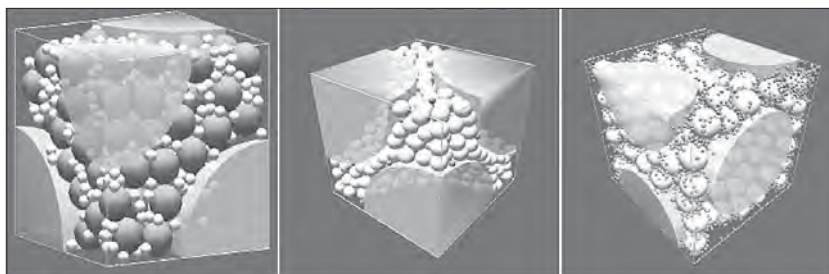


Рис. 6. Модели заполненного порового пространства при различных соотношениях диаметров частиц

Fig. 6. Models of the filled pore space at different ratios of particle diameters

После сбалансирования сил, действующих на систему сфер, пользователь отключает симуляцию физики и в основном цикле программы последовательно рассчитывается количество контактов между частицами по схемам: «наполнитель–вяжущее–наполнитель», «вяжущее–вяжущее», «наполнитель–наполнитель». Все параметры модели сводятся в таблицу и сохраняются в файл, откуда передаются в программу Microsoft Excel для статистической обработки.

В процессе расчета модели программа отображает массовые и объемные доли компонентов в системе. Задавая количество сферических частиц, можно приблизительно подобрать реальные вещественные пропорции компонентов. Чтобы построить модель тонкодисперсной части строительного композита, необходимо знать плотности компонентов и их удельные поверхности.

С помощью разработанной программы рассчитаны модели бимодальной тонкодисперсной смеси цемента и молотого известняка в элементарной ячейке $50 \times 50 \times 50$ мкм с различными соотношениями диаметров частиц, а также разными массовыми долями компонентов. При этом соблюдалось условие полного заполнения частицами элементарной ячейки в каждой конфигурации смеси. Целью расчета моделей являлось установление аналитических зависимостей между изменением среднего количества контактов частиц (координационных чисел) и изменением соотношений диаметров и массовых долей компонентов.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить аналитические зависимости, описывающие общие

закономерности формирования дисперсной структуры строительных цементных композитов на макро- и микроуровнях. В ходе исследований рассмотрены и обобщены наиболее эффективные методы описания процессов структурообразования, а также выбраны способы оптимизации составов строительных композитов. Разработанные математические средства подбора зернового состава и расчета геометрических характеристик зерновой структуры композита позволили смоделировать оптимальную структуру материала на основе варьирования комплекса влияющих факторов. Экспериментально получен ряд зависимостей свойств мелкозернистого бетона от рецептурных параметров. Выявлены экстремумы значений свойств бетона и установлены тренды их изменения. Экспериментальные данные об эффективном влиянии карбонатного наполнителя на свойства структуры согласуются с модельными показателями в границах применяемых соотношений компонентов системы.

Таким образом, решая задачи подбора состава бетона для различных критериев оптимальности, будь то экономия сырьевых материалов или повышение технико-эксплуатационных показателей материалов, необходимо направленно варьировать рецептурные параметры, подбирая требуемые соотношения компонентов, и согласовывать их с выходными свойствами материала. В данном исследовании методом математического моделирования установлены функциональные взаимосвязи между рецептурными параметрами и выходными свойствами бетона. Полученные данные не противоречат существующим независимым исследованиям.

Список литературы

1. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2008. 116 с.
2. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
3. Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси // *Строительные материалы*. 2009. № 9. С. 88–90.
4. Белов В.В., Смирнов М.А. Теоретические основы методики оптимизации гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов. *Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук*. Москва–Орел–Курск. 2011. С. 175–179.

References

1. Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovanie, optimizatsiya, raschet [Mixing processes of bulk materials: modeling, optimization, calculation]. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin, 2008. 116 p.
2. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannye vysokokachestvennyye betony [Modified high-quality concretes]. Moscow: ASV, 2006. 368 p.
3. Belov V.V., Smirnov M.A. Formation of the optimal macrostructure of the building mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 9, pp. 88–90. (In Russian).
4. Belov V.V., Smirnov M.A. Theoretical foundations of the methodology for optimizing the granulometric composition of compositions for the manufacture of non-firing construction conglomerates. *RAASN*.

5. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Вып. 13. 2008. С. 341–346.
6. Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М. Анализ упаковки полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // *Современные проблемы науки и образования*. 2007. № 6. С. 105–108.
7. Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // *Современные проблемы науки и образования*. 2007. № 6.
8. Слоэн Н.Дж.А. Упаковка шаров // *В мире науки. Scientific American*. 1984. № 3. С. 72–82.
9. Laurent P. Granger, Zdeněk P. Bažant, Fellow, ASCE. Effect of composition on basic creep of concrete and cement paste // *Journal Of Engineering Mechanics*. 1995. Vol. 121. Iss. 11, pp. 1261–1270.
10. Бердов Г.И., Зырянова В.Н. Пути совершенствования технологии и свойств строительных материалов // *Известия вузов. Строительство*. 2010. № 4. С. 51–61.
11. Белов В.В., Смирнов М.А. Оптимизация гранулометрического состава сырьевых смесей для получения пресованных бетонов на цементной связке // *Нанотехнологии в строительстве*. 2010. № 2. С. 7–17.
12. Образцов И.В., Белов В.В. Программно-вычислительный метод подбора зернового состава заполнителя. // *Межд. семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. Сборник докладов*. СПб.: АлитИнформ, 2011. С. 88–91.
13. Статюха Г.А., Телицына Н.Е., Суруп И.В. Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для сухих строительных смесей // *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2007. № 5/3 (29). С. 23–26.
14. Воробьев В.А., Илюхин А.В., Бокарев Е.И. Кластерные структуры и теория перколяции в компьютерном материаловедении строительных композиционных материалов // *Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук*. 2011. Вып. 15. С. 185–189.
15. Хархардин А.Н., Ходыкин Е.И. Фрактальная размерность дисперсных и пористых материалов // *Строительные материалы*. 2007. № 8. С. 62–63.
16. Головинский П.А. Физическая релаксация и структурообразование бетона. *Материалы международного конгресса. Наука и инновации в строительстве SIB-2008. Т. 1. Современные проблемы* *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk*. Moscow-Orel-Kursk. 2011, pp. 175–179). (In Russian).
5. Belov V.V., Smirnov M.A. New principles for determining the composition of high-quality concrete. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Vol. 13. 2008, pp. 341–346. (In Russian).
6. Korolev L.V., Lupanov A.P., Pridatko Yu.M. Analysis of the packaging of polydisperse particles in composite building materials. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2007. No. 6, pp. 105–108. (In Russian).
7. Korolev L.V., Lupanov A.P., Pridatko Yu.M. Dense packing of polydisperse particles in composite building materials. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2007. No. 6. (In Russian).
8. Sloan N.J.A. Packing of balls. *V mire nauki. Scientific American*. 1984. No. 3, pp. 72–82. (In Russian).
9. Laurent P. Granger, Zdeněk P. Bažant, Fellow, ASCE. Effect of composition on basic creep of concrete and cement paste. *Journal Of Engineering Mechanics*. 1995. Vol. 121. Iss. 11, pp. 1261–1270.
10. Berdov G.I., Zyryanov V.N. Ways to improve the technology and properties of building. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2010. No. 4, pp. 51–61. (In Russian).
11. Belov V.V., Smirnov M.A. Optimization of the granulometric composition of raw mixes for obtaining pressed concretes on a cement bundle. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2010. No. 2, pp. 7–17. (In Russian).
12. Obraztsov I.V., Belov V.V. Software-computational method for selecting the grain composition of the filler. // *Interd. The seminar is a competition for young scientists and postgraduates working in the field of binders, detergents and dry mixtures. Collection of reports*. Saint Petersburg: ALITinform. 2011, pp. 88–91. (In Russian).
13. Statyukha G.A., Telitsyna N.E., Surup I.V. Optimization of the granulometric composition of fillers for dry building mixes. *Shidnoevropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij*. 2007. No. 5/3 (29), pp. 23–26. (In Russian).
14. Vorobyev V.A., Ilyukhin A.V., Bokarev E.I. Cluster structures and percolation theory in computer materials science of building composite materials. *RAASN. Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk*. 2011. Iss. 15, pp. 185–189. (In Russian).
15. Kharkhardin A.N., Khodykin E.I. Fractal dimension of dispersed and porous materials. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2007. No. 8, pp. 62–63. (In Russian).
16. Golovinsky P.A. Physical relaxation and structure formation of concrete. *Materials of the International Congress. Science and Innovation in Construction SIB-2008. Vol. 1. Modern problems of construction materials science and technology*. Book 1 (A-N). Voronezh. 2008, pp. 100–112. (In Russian).

- строительного материаловедения и технологии. Кн. 1 (А–Н). Воронеж, 2008. С. 100–112.
17. Рахимов Р.З., Рахимов Н.Р. Топологические модели структуры и структурных элементов строительных композиционных материалов // *Цемент и его применение*. 2011. № 6. С. 62–65.
 18. Гусев Б.В. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах // *Нанотехнологии в строительстве*. 2009. № 3. С. 8–14.
 19. Сивков С.П. Современные тенденции в производстве цемента в РФ // *Российский ежегодник ССС*. 2011. С. 76–80.
 20. Хархардин А.Н., Топчиев А.И. Уравнения для координационного числа в неупорядоченных системах // *Успехи современного естествознания*. 2003. № 9. С. 47–53.
 21. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
 22. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // *Бетон и железобетон*. 1993. № 4. С. 10–12.
 23. Kalala J.T., Moys M.H. Discrete element method modelling of liner wear in dry ball milling // *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004. NOVEMBER. Pp. 597–602.
 17. Rakhimov R.Z., Rakhimov N.R. Topological models of the structure and structural elements of building composite materials. *Tsement i ego primenenie*. 2011. No. 6, pp. 62–65. (In Russian).
 18. Gusev B.V. Investigation of nanostructuring processes in fine-grained concretes. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2009. No. 3, pp. 8–14. (In Russian).
 19. Sivkov S.P. Modern trends in cement production in the Russian Federation. *Rossiiskii ezhegodnik SSS*. 2011. pp. 76–80. (In Russian).
 20. Kharkhardin A.N., Topchiev A.I. Equations for the coordination number in disordered systems. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2003. No. 9, pp. 47–53. (In Russian).
 21. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony* [Modified high-quality concretes]. Moscow: DIA, 2006. 368 p.
 22. Vlasov V.K. Regularities of optimization of the composition of concrete with dispersed mineral additives. *Beton i zhelezobeton*. 1993. No. 4, pp. 10–12. (In Russian).
 23. Kalala J.T., Moys M.H. Discrete element method modelling of liner wear in dry ball milling. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004. NOVEMBER, pp. 597–602.

Не забудьте оформить подписку на второе полугодие 2021 г.



ISSN 0005-9889

Подписку как на бумажную, так и на электронную версию можно оформить через редакцию.

Для этого необходимо прислать заявку в произвольной форме на эл. почту: mail@rifsm.ru

В заявке надо указать название организации (для выставления счета), юридический и почтовый адреса, телефон и контактное лицо.

На почте подписку можно оформить:



по объединенному каталогу «Пресса России»

индекс **85502**

УДК 624.04:624.94.012.45

А.Н. БОЛГОВ, канд. техн. наук (200651@mail.ru), С.И. ИВАНОВ, канд. техн. наук (5378018@mail.ru), А.З. СОКУРОВ, канд. техн. наук (6618188@gmail.com), А.В. НЕВСКИЙ, канд. техн. наук (lokop888@gmail.com)

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

О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях

Приведены результаты исследования работы узлов сопряжения железобетонных плит с колоннами, выполненных из бетонов разного класса по прочности, в монолитно-каркасных высотных зданиях. Кратко представлены результаты анализа отечественных и зарубежных нормативных документов по теме исследования. На основе обзора и обобщения результатов лабораторных испытаний узлов сопряжения плит с колоннами сформулированы факторы, оказывающие влияние на их прочность при сжатии. Описанные в статье численные исследования работы узлов типа «плита–колонна» выполнены с проведением предварительных верификационных расчетов, показавших хорошее совпадение с опытными данными по качественной картине разрушения и разрушающим нагрузкам. На основании результатов расчетов конечно-элементных моделей средних, крайних и угловых узлов «плита–колонна», в которых варьировались соотношения размеров колонн и толщин плит, их классов бетона по прочности при сжатии, а также действующего усилия на плиту и его предельного значения, предложены зависимости для расчета их прочности при сжатии.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, высотные здания, монолитный железобетонный каркас, стык плиты с колонной, узел «плита–колонна», высокопрочный бетон, прочность, смятие.

Для цитирования: Болгов А.Н., Иванов С.И., Сокуров А.З., Невский А.В. О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 39–44.

A.N. BOLGOV, Candidate of Sciences (Engineering) (200651@mail.ru), S.I. IVANOV, Candidate of Sciences (Engineering) (5378018@mail.ru), A.Z. SOKUROV, Candidate of Sciences (Engineering) (6618188@gmail.com), A.V. NEVSKII, Candidate of Sciences (Engineering) (lokop888@gmail.com)
Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev
JSC “Research Center “Stroitel’stvo”, Laboratory No. 2 (6, build. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Strength's Calculation of Reinforced Concrete Slab-Columns Joints in Monolithic Frame of High-Rise Buildings

The article presents the research work aimed at developing a methodology for calculating strength of reinforced concrete slab-columns joints made of different strength grade of concrete in monolithic frame of high-rise buildings. The results of Russian and foreign regulatory documents analysis and technical literature on this issue are briefly presented. On the basis of review and generalization of laboratory tests of slab-columns joints the factors influencing their compressive strength were formulated. Numerical analysis of “slab-column” type units' behavior was carried out with preliminary verification calculations, which showed good accuracy with experimental data on fracture pattern and ultimate breaking loads. Based on results of calculations of finite element models of middle, extreme and corner slab-columns joints, which had a variation of ratios of column dimensions and slab thicknesses, strength grade of concrete, stress acting on the slab and its maximum value, the formulas for compressive strength analysis were derived.

Keywords: reinforced concrete structures, high-rise buildings, monolithic reinforced concrete frame, slab-column connection, slab-column joint, high-strength concrete, strength, crushing.

For citation: Bolgov A.N., Ivanov S.I., Sokurov A.Z., Nevsky A.V. Strength's calculation of reinforced concrete slab-columns joints in monolithic frame of high-rise buildings. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 39–44. (In Russian).

Нормы проектирования высотных зданий в РФ СП 267.1325800.2016 [1] содержат общие требования к выбору конструктивных решений зданий, включая здания с монолитными железобетонными конструкциями. В стандарте указано, что расчет отдельных конструктивных элементов выполняют по СП 63.13330.2018 [2], при этом в стандарте приведены рекомендуемые классы бетона по прочности при сжа-

тии для вертикальных и горизонтальных конструкций. Указано, что для вертикальных конструкций – колонн, пилонов, стен и ядер жесткости следует применять тяжелые бетоны классов по прочности не менее:

- В35 – для зданий высотой 75–150 м (включительно);
- В45 – для зданий высотой 150–200 м (включительно);

– В60 – для зданий высотой 200–250 м (включительно);

– В80 – для зданий высотой более 250 м.

В то же время в перекрытиях следует применять легкие и тяжелые бетоны классов по прочности при сжатию не менее В30. Таким образом, нормами допускается отличие в классах бетона колонн и плит до 2,7 раза и более, при этом не приводится каких-либо расчетных положений или конструктивных мероприятий по обеспечению прочности узлов сопряжений плит с колоннами.

С целью обеспечения прочности узлов «плита–колонна» на действие сжимающих сил возможно выполнение примыкающего к колоннам участка плиты из бетона того же класса по прочности, что и колонны (рис. 1, а). Однако такое решение требует существенного усложнения технологии устройства перекрытий и большей продолжительности работ.

Исследования узлов «плита–колонна» из бетона различного класса по прочности (рис. 1, б) показывают, что бетон плиты, находясь в объемном напряженном состоянии, может иметь большую прочность, чем при осевом сжатии, т. е. проявляется так называ-

емый эффект обоймы, который может позволить применять в плитах в данных узлах более низкий класс бетона по прочности, чем у бетона колонн, без ущерба эксплуатационной надежности здания.

Обзор отечественных и зарубежных норм проектирования

Ряд зарубежных стандартов, таких как ACI 318-14 [3] и CSA A.23.3-04 [4], указывают допустимые диапазоны соотношений классов бетонов колонн и плит, обеспечивающих прочность узлов при сжатии.

В своде правил СП 63.13330.2018 [2] отсутствуют прямые требования к расчету узлов «плита–колонна» при выполнении сопрягаемых конструкций из бетона различного класса по прочности. В то же время в стандарте предусмотрен расчет железобетонных элементов на действие местного сжатия, в котором не оговорен класс конструкций или расчетные случаи, когда следует применять данную методику расчета.

Методика расчета на местное сжатие предполагает проверку прочности железобетонного элемента, нагруженного сжимающей силой по ограниченной

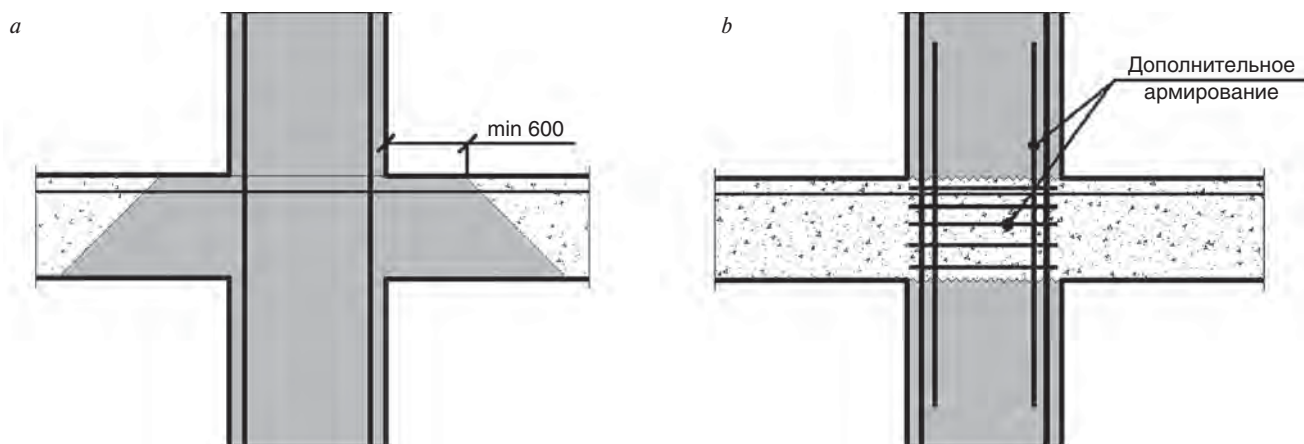


Рис. 1. Варианты конструирования стыков плит с колоннами: а – выполнение примыкающего к колонне участка плиты из бетона того же класса по прочности, что и колонны; б – выполнение плиты и колонны из бетонов различного класса по прочности

Fig. 1. Variants of designing joints between slabs and columns: а – execution of a slab section adjacent to a column from concrete of the same strength class; б – execution of slabs and columns made of concrete of various strength classes

Таблица 1
Table 1

Зависимости по расчету приведенной прочности бетона узлов «плита–колонна»
Formulas for calculating reduced concrete strength of «slab-column» joints

Нормативный документ	Расположение стыка		
	среднее	крайнее	угловое
ACI 318-19	$f'_{ce} = 0,75f'_{cc} + 0,35f'_{cpl}$ $f'_{cc} \leq 2,5f'_{cpl}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$
CSA A.23.3-04	$f'_{ce} = 1,05f'_{cc} + 0,25f'_{cs}$ $\leq f'_{cc}$	$f'_{ce} = 1,45f'_{cs}$ $\leq f'_{cc}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$
СП 63.13330.2018	$R_j = 2,4R_{b,s}$	$R_j = 1,96R_{b,s}$	$R_j = 1,6R_{b,s}$

Примечание. f'_{cc} , f'_{cpl} (f'_{cs}) – цилиндровая прочность бетона колонны и плиты соответственно; $R_{b,s}$ – призмная прочность бетона плиты.

площадке. В табл. 1 приведены зависимости по расчету приведенной прочности бетона узлов «плита–колонна» по зарубежным нормам, а также согласно отечественному своду правил СП 63.13330.2018 при рассмотрении только прочности бетона плиты на смятие. Из представленных в табл. 1 данных следует, что формулы СП 63.13330.2018 приводят к значительно большим оценкам прочности рассматриваемых узлов.

Анализ опытных данных, содержащихся в литературных источниках

В 1960 г. в США Bianchini A.C., Wood R.E. [5] провели испытания 45 опытных образцов, моделирующих поведение угловых, крайних и средних узлов «плита–колонна», в том числе крайних и средних узлов с балками; еще девять образцов представляли собой колонны, в части которых бетон принимался одной прочностью по высоте, а в других – средний участок, равный толщине плиты, принимался из бетона прочностью ниже. Нагружение образцов выполнялось при приложении осевой сжимающей нагрузки к колоннам. Целью исследований было определение соотношения прочностей бетонов колонн и плиты, при котором не происходит снижения прочности бетона колонн, а также выявление несущей способности колонн при нарушении этой границы соотношений прочностей бетонов. В испытаниях варьировалось соотношение прочности бетона колонны и плиты, размеры сечения колонны и толщина плит. В результате авторы установили, что эффективная прочность бетона узла выше прочности бетона плиты; при отношении прочности бетона плиты к бетону колонн не ниже 1,4–1,5 несущую способность узла можно оценивать с использованием в расчете прочности бетона колонн. При большем соотношении приведенную прочность промежуточных узлов было предложено рассчитывать по формуле:

$$f'_c = 1,5f'_{cf} + (f'_{cc} - 1,5f'_{cf}). \quad (1)$$

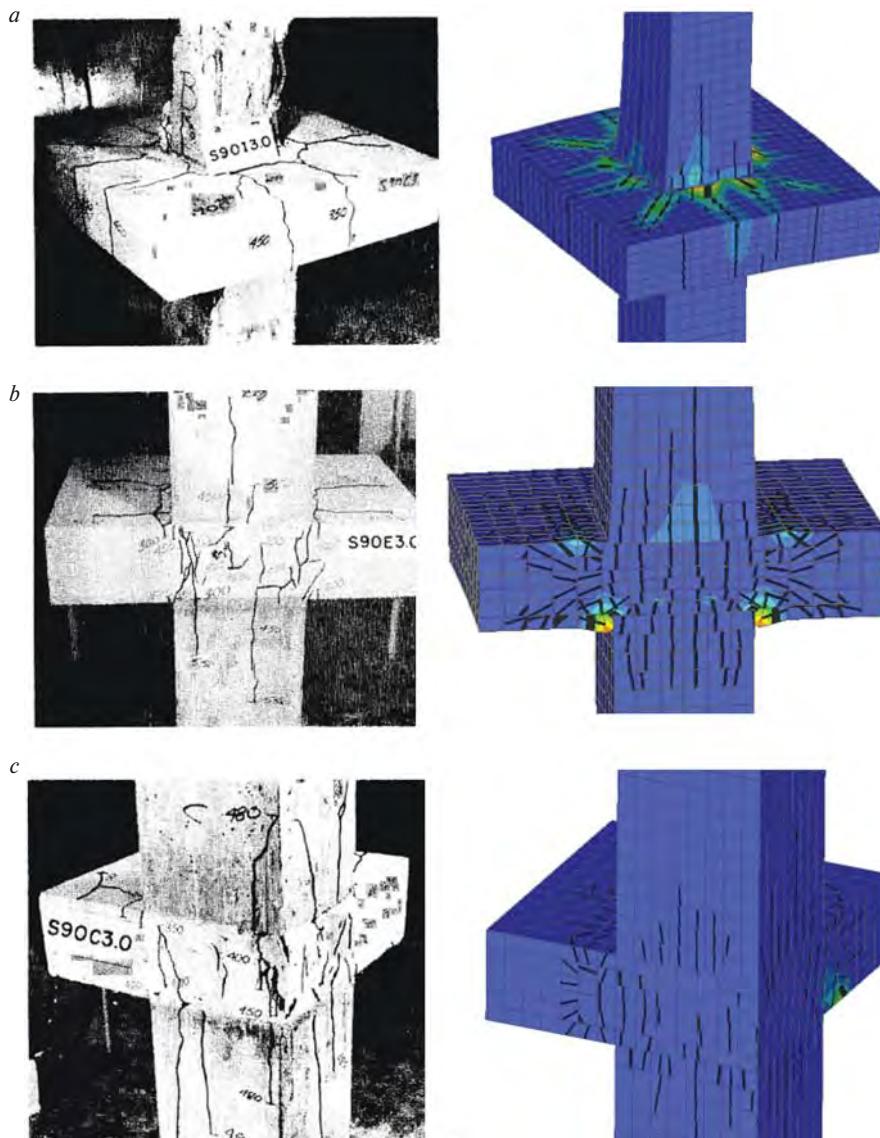


Рис. 2. Схемы трещинообразования узлов сопряжения плиты с колонной, полученные при испытании опытных образцов (слева) и в результате расчета их численных моделей (справа): а – средний узел (образец S90I3.0); б – крайний узел (образец S90E3.0); в – угловой узел (образец S90C3.0)

Fig. 2. Schemes of slab-column joints cracking obtained during testing of prototypes (left) and as a result of calculating their computational model (right): а – middle joint (sample S90I3.0); б – edge joint (sample S90E3.0); в – corner joint (sample S90C3.0)

В 1991 г. Gambel W.L., Klinar J.D [6] опубликовали статью, посвященную испытаниям узлов «плита–колонна», в которых прочность бетона колонны значительно превосходила прочность бетона плиты. Авторы привели результаты испытаний тринадцати опытных образцов, в которых варьировались положение узла (среднее, крайнее) и отношение прочности бетона колонны и плиты, при этом прочность бетона колонны составляла 96 МПа, плиты – от 21 до 42 МПа.

Все образцы испытывались с приложением сжимающей нагрузки к колоннам, изгибающие моменты в плите отсутствовали. Разрушение образцов происходило при выпучивании арматуры колонны в зоне узла и дроблении бетона в этой зоне.

Авторы предложили следующие расчетные зависимости прочности промежуточных и крайних узлов:

– для промежуточных узлов:

$$f'_{cp} = 0,67f'_{cs} + 0,47f'_{cc} \geq 1,45f'_{cs}; \quad (2)$$

– для крайних узлов:

$$f'_{cp} = 0,35f'_{cs} + 0,75f'_{cc} \geq 1,4f'_{cs}. \quad (3)$$

При прочности бетона плиты $1,4f'_{cs} \geq f'_{cc}$ эффективную прочность бетона узла рекомендовано принимать равной f'_{cc} .

В 1998 г. в Канаде Ospina C.E., Alexander S.D.B. [7] получили новые данные о работе узлов «плита–колонна». В своих исследованиях авторы справедливо указывают на недостатки в ранее проведенных опытах Bianchini A.C., Wood R.E. [5], а также в работе Gambel W.L., Klinar J.D [6], указывая на отсутствие нагрузки на плиту перекрытия при испытании узлов при сжатии и недостаточно изученную работу узлов с колоннами прямоугольной формы сечения. Авторами было испытано 20 образцов средних узлов «плита–колонна», в которых, помимо соотношения прочности бетона колонн и плит, варьировались: соотношение толщины плиты и колонны, величина нагрузки на плиту и соотношение сторон сечения колонн.

Авторы предложили следующие зависимости для расчета прочности средних узлов:

$$\text{– при } \frac{f'_{cc}}{f'_{cs}} \leq 1,4 \quad f'_{cc} = f'_{cs}; \quad (4)$$

$$\text{– при } \frac{f'_{cc}}{f'_{cs}} > 1,4 \quad f'_{cc} = \left(\frac{0,25}{h/c}\right)f'_{cc} + \left(1,4 - \frac{0,35}{h/c}\right)f'_{cs}. \quad (5)$$

В формуле (5) значение h/c принимают не менее 0,33. Для колонн прямоугольного сечения за c принимают длину меньшей стороны.

Интерес с точки зрения работы крайних и угловых узлов представляют испытания 54 образцов «сэндвич-колонн», проведенные в 1992 г. Shu C.C., Hawkins N.M. [8].

В своих исследованиях авторы приходят к следующим выводам: формулы ACI 318-83 небезопасны в отношении крайних и угловых узлов при отношении прочности бетона колонны к плите менее 1,4, тогда как выше этого отношения может иметься чрезмерный запас; формулы ACI 318-83 для средних узлов также не могут быть признаны безопасными, так как не учитывают изменения отношения h/c , при отдельных значениях которых прочность узлов может быть ниже. На

основании этого эффективную прочность крайних и угловых узлов авторы предложили вычислять по формуле:

$$f'_{cp} = f'_{cf} + A(f'_{cc} - f'_{cf}), \text{ где } A = 1 / (0,4 + 2,66 \cdot h/c) \quad (6)$$

Таким образом, учитывая имеющиеся сведения из испытаний, можно выделить основные влияющие на прочность узлов «плита–колонна» факторы, а именно:

1. *Расположение колонны* в среднем, крайнем или угловом положении оказывает существенное влияние на проявление эффекта обоймы и, как следствие, на эффективную прочность и деформативность узла, которую непременно следует учитывать.

2. *Соотношение прочности бетона колонны и плиты ($R_{b,c}/R_{b,s}$)*, как показывают опытные данные, оказывает косвенное влияние через изменение жесткости в поперечном направлении и, как следствие, изменение напряженно-деформированного состояния колонн и плиты в зоне узла.

3. *Соотношение размеров колонны и толщины плиты (c/h)* оказывает влияние на жесткость плиты: экспериментальными данными установлено, что с ростом отношения c/h прочность узла повышается и наоборот.

4. *Напряженное состояние плиты в зоне узла*, согласно опытным данным Ospina C.E., Alexander S.D.B. [7] и позднее Shu C.C., Hawkins N.M. [8], также является фактором влияния на прочность узла сопряжения конструкций: напряжения вблизи узла, вызванные действием изгибающего момента и поперечных сил, могут привести существенный вклад в снижение прочности для промежуточных узлов. Этот

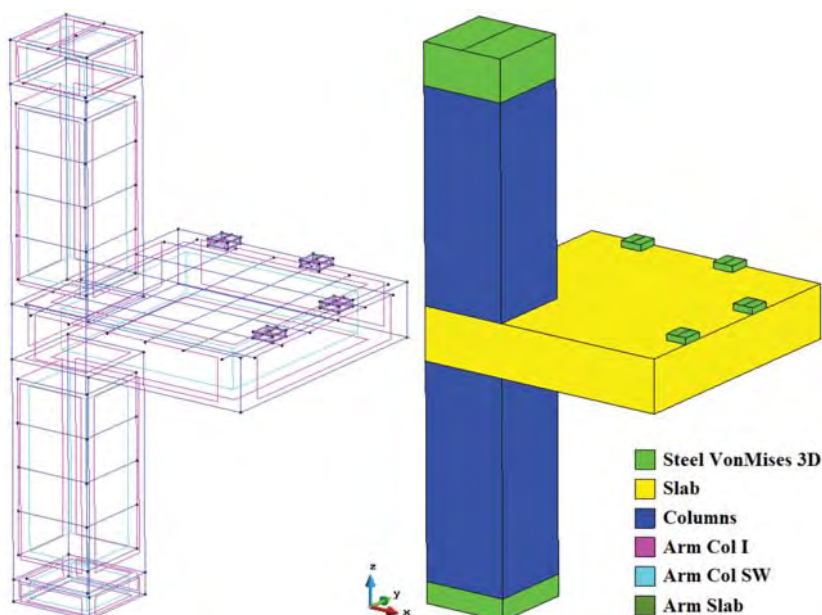


Рис. 3. Расчетная модель углового узла (1/4 часть)
Fig. 3. Computational model of corner joint (1/4 part)

Таблица 2
Table 2

Сопоставление разрушающих нагрузок, полученных в опытах и по результатам численных расчетов
Comparison of ultimate breaking loads obtained in experiments and from the results of numerical analysis

Марка узла	Тип	В опытах (N_{test}), тс	ATENA (N_{calc}), тс	N_{test}/N_{calc}
S90I3.0	Средний	311,4	274,7	1,13
S90E3.0	Крайний	252,6	223,4	1,13
S90C3.0	Угловой	213,5	230,7	0,93

эффект непременно требует учета при исследовании прочности узлов.

Ряд исследователей отмечают возможность повышения прочности узлов «плита–колонна» за счет устройства в плите «колодца» в зоне ядра колонны и последующего его заполнения бетоном вышележащей колонны, а также положительную роль дополнительной продольной арматуры в колонне в зоне узла. Данные приемы также могут быть рассмотрены как меры по повышению несущей способности узлов на сжатие.

Численные исследования

Проведены численные исследования узлов «плита–колонна», выполненные с применением программного комплекса Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis (ATENA), реализующего метод конечных элементов.

При моделировании конструкции образцов для численных исследований использовались объемные конечные элементы для бетона и опорных элементов, а также стержневые конечные элементы для арматуры.

Поведение материалов бетона и арматуры задавалось с применением стандартных наборов материалов, включенных в библиотеку программы, учитывающих их физическую нелинейность. При этом принимались средние (фактические) характеристики для бетона и арматуры. Для бетона применялась модель CC3DNonlinCementitious2, для арматуры – CCReinforcement, для стальных элементов опор – CCDElastIsotropic. При назначении характеристик материалов задавались значения кубиковой прочности бетона при сжатии (стандартный куб с размером ребра 150 мм), остальные параметры для бетона принимались стандартными внутрпрограммно.

Перед проведением численных исследований были выполнены верификационные расчеты для трех опытных образцов S90I3.0, S90E3.0, S90C3.0, испытанных в работе [5], представляющих собой средний, крайний и угловой узлы «плита–колонна» соответственно. К сожалению, авторы [5] не привели сведений о деформациях бетона при работе узлов, поэтому сравнение выполнялось только по качественной картине трещинообразования при их разрушении, а также по величине несущей способности.

Таблица 3
Table 3

Описание варьируемых параметров образцов для численных исследований
Description of variable parameters of samples for numerical analysis

Расположение узла	B_c/B_s	c/h	F/F_{ult}
Средний	$\frac{25 \pm 60}{25} = 1 \div 2,4$	$2 \div 3,2$	$0 \div 0,5$
Крайний		$2 \div 1,6$	
Угловой			

На рис. 2 приведены фотографии после испытания опытных образцов узлов сопряжения плиты с колонной и схемы образования трещин, полученные в результате расчета их численных моделей, а в табл. 2 – разрушающие нагрузки. В целом была обнаружена хорошая согласованность результатов моделирования с опытными данными как по разрушающим нагрузкам, так и качественно по трещинообразованию в бетоне моделей.

Численные исследования выполнялись для средних, крайних и угловых узлов. Коэффициент продольного армирования колонн принимался равным 0,3%, то же для верхнего армирования плиты – 1,1%. Хомуты колонн в зоне пересечения с плитой отсутствовали. В табл. 3 варьируемые параметры моделей, выраженные соотношениями классов бетона колонны (B_c) и плиты (B_s), высоты поперечного сечения колонны (c) и толщины плиты (h), действующего усилия на плиту (F) и его предельного значения (F_{ult}). Размеры плиты в плане принимались равными 2,4×2,4 м для среднего, 2,4×1,2 м для – крайнего и 1,2×1,2 м – для угловых узлов. Общий вид расчетной модели углового узла приведен на рис. 3.

Предельное значение продавливающего усилия на плиту (F_{ult}) устанавливалось по результатам предварительного численного моделирования при отсутствии сжимающей нагрузки на узел. В исследованиях прочности узлов при сжатии усилие на плиту принималось в процентах от расчетного значения, вычисляемого по формуле (7) и принимаемого по табл. 3:

$$\bar{F} \cdot \gamma_f = \frac{F_{ult}}{\gamma_{bt} \gamma_f}, \tag{7}$$

где \bar{F} – фактическое значение нагрузки при эксплуатации; F_{ult} – предельная несущая способность узла

Таблица 4
Table 4

Зависимости для расчета прочности узлов «плита–колонна», установленные по результатам численных исследований
Formulas for calculating strength of «slab–column» joints, established by results of numerical analysis

Положение узла	Зависимость	Коэффициент точности	σ , тс	ν , %
Среднее	$\frac{N_j}{N_c} = 1,46 - \frac{R_{b,c}/R_{b,s} + c/d}{8,3}$	0,98	0,05	5,4
Крайнее	$\frac{N_j}{N_s} = \frac{R_{b,c}/R_{b,s}}{3} + \frac{c/d}{1,8} - 0,31$	1	0,12	12,3
Угловое	$\frac{N_j}{N_s} = \frac{R_{b,c}/R_{b,s}}{9,5} + \frac{c/d}{1,3} - 0,39$	0,97	0,06	5,9

(среднее значение); γ_{br} , γ_f – коэффициенты надежности по нагрузке и материалу, принимаемые равными 1,15 и 1,5 соответственно.

Численные исследования показали, что разрушение узлов в зависимости от их положения (среднее, крайнее или угловое) отличается по своему механизму. Если разрушение средних узлов начиналось либо с дробления бетона колонн, либо с дробления бетона плиты, то крайние и угловые узлы, как правило, разрушались вследствие дробления бетона плиты.

В этой связи при анализе средних узлов выполнялось сравнение с прочностью колонны, рассчитываемой по формуле:

$$N_c = R_{bc}A_b + R_{sc}A_{sc} \quad (8)$$

где R_{bc} – призмная прочность бетона колонны, вычисляемая как $R_{ц}/1,16$ ($R_{ц}$ – прочность бетона образца цилиндра размером 150×300 мм).

Крайние и угловые узлы сравнивались с теоретической прочностью плиты при сжатии с площадью, ограниченной площадью колонны, рассчитываемой по формуле:

$$N_s = R_{bs}A_b + R_{sc}A_{sc} \quad (9)$$

где R_{bs} – призмная прочность бетона плиты, вычисляемая как $R_{ц}/1,16$ ($R_{ц}$ – прочность бетона образца цилиндра размером 150×300 мм).

В табл. 4 приведены зависимости для расчета прочности узлов «плита–колонна», полученные по результатам обработки численных исследований, а также их статистические параметры точности.

Выводы

1. При выполнении конструкций колонн и плит из бетонов разного класса по прочности наряду с проверкой прочности отдельных конструктивных элементов согласно СП 63.13330.2018 необходи-

мо проводить проверку прочности узла сопряжения «плита–колонна».

2. При расчете узлов необходимо учитывать следующие факторы: положение узла (среднее, крайнее или угловое), отношение классов бетона колонны и плиты, а также отношение размеров сечений колонны и толщины плиты.

3. При разработке инженерной методики расчета прочности узлов необходимо учитывать, что механизм разрушения зависит от положения узла: в случае если узел расположен в средней зоне, его прочность может определяться как прочностью верхней колонны, так и прочностью плиты между колоннами, а в случае крайнего либо углового узла его прочность определяется главным образом прочностью зоны плиты между колоннами.

Список литературы / References

- СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2016. 95 с.
- SP 267.1325800.2016. High rise buildings and complexes. Design rules. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. 2016. 95 p.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 143 с.
- SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete constructions. General provisions. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. 2018. 143 p.
- ACI 318-2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Reported by ACI Committee 318. USA, Farmington Hills: ACI. 2014. 519 p.
- CSA A23.3-04. Design of concrete structures. Canadian Standards Association. Canada, Ontario, Mississauga: CSI. 2006. 258 p.
- Bianchini A.C., Wood R.E. Effect of floor concrete strength on column strength. *Journal of the American Concrete Institute*. 1960. Vol. 31. No. 11, pp. 1149–1169.
- Gambel W.L., Klinar J.D. Test of high-strength concrete columns with intervening floor slabs. *Journal of Structural Engineering*. 1991. Vol. 117. No. 5, pp. 1462–1476.
- Ospina C.E., Alexander S.D.B. Transmission of interior concrete columns loads through floor. *Journal of Structural Engineering*. 1998. Vol. 124. No. 6, pp. 602–610.
- Shu C.C., Hawkins N.M. Behavior of columns continuous through concrete floors. *Journal of The American Concrete Institute*. 1992. Vol. 89. No. 4, pp. 405–414.

Требования к подготовке научно-технической статьи

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

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

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

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

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

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:


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

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

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

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

Технические требования к предоставляемым материалам

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

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

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

