

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0005-9889

# БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

4-5

612-613

2022

WWW.RIFSM.RU

ИЗДАЕТСЯ С 1955 ГОДА



IX МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-  
ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «ОПОРЫ И ФУНДАМЕНТЫ ДЛЯ ВЛ: ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА»

МЕРОПРИЯТИЕ ПРОЙДЕТ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО  
ФОРУМА «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» (МФЭС)

24–25  
НОЯБРЯ  
2022

**МОСКВА**  
ВДНХ,  
ПАВИЛЬОН 55, ЭТАЖ 3

Организатор конференции



INTERNATIONAL  
ASSOCIATION OF  
FOUNDATION  
CONTRACTORS

10<sup>2022</sup> ЛЕТ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Генеральный спонсор конференции



Официальная поддержка



МФЭС



Генеральные информационные партнеры



НИЦ строительство  
научно-исследовательский центр



12+



[www.fc-union.com](http://www.fc-union.com)

[info@fc-union.com](mailto:info@fc-union.com), +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

**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  
Per. ПИ № ФС 77-76959 от 09.10.2019  
ISSN 0005-9889 (Print)  
Основан: Институт НИИЖБ Госстроя СССР и ВНИИЖелезобетон Минстройматериалов СССР

# БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

**4-5 (612-613)  
Июль-октябрь'2022**

Издается с 1955 г.

А.И. ЗВЕЗДОВ, Д.В. КУЗЕВАНОВ, Ю.С. ВОЛКОВ <b>Профессор А.А. Гвоздев. К 125-летию со дня рождения . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>InterConPan-2022. Технологический суверенитет для индустриального домостроения в Российской Федерации . . . . .</b>	<b>7</b>
В.Р. ФАЛИКМАН, П.Н. СИРОТИН <b>Современные методы оценки реакционной способности заполнителей . . . . .</b>	<b>15</b>
Р.О. РЕЗАЕВ, А.А. ДМИТРИЕВ, Д.В. ЧЕРНЯВСКИЙ <b>Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав-свойство». Часть I (Теория). . . . .</b>	<b>25</b>
В.Н. СТРОЦКИЙ, В.И. САВИН, В.В. ПОЛТАЕВ <b>Деформационные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике . . . . .</b>	<b>38</b>
Е.А. САДОВСКАЯ, С.Н. ЛЕОНОВИЧ <b>Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний . . . . .</b>	<b>46</b>
Д.Ю. СНЕЖКОВ, С.Н. ЛЕОНОВИЧ, Н.А. БУДРЕВИЧ, MIAO JIJUN <b>Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами. . . . .</b>	<b>52</b>
Е.А. ЧЕРНЫГОВ <b>Исследование работы с бетоном трехпроволочных канатов . . . . .</b>	<b>60</b>
Т.А. МУХАМЕДИЕВ, С.А. МАЙОРОВ <b>Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели . . . . .</b>	<b>66</b>
А.Н. БОЛГОВ, А.З. СОКУРОВ, А.В. НЕВСКИЙ <b>О разработке нового свода правил СП 513.1325800 «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования». . . . .</b>	<b>72</b>

## 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 – KIT (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, профессор, член-корреспондент РААСН, председатель Совета директоров ООО «Институт ВНИИЖелезобетон» (Москва)  
**СТЕПАНОВА В.Ф.**, д-р техн. наук, заведующая лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)  
**ТАМРАЗЯН А.Г.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, советник РААСН (Москва)  
**ТРАВУШ В.И.**, д-р техн. наук, главный конструктор, заместитель генерального директора по научной работе ЗАО «ГОРПРОЕКТ», вице-президент РААСН (Москва)  
**УШЕРОВ-МАРШАК А.В.**, д-р техн. наук, профессор Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры (Украина)  
**ФАЛИКМАН В.Р.**, канд. хим. наук, д-р материаловедения, руководитель Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (Москва)  
**ХОЗИН В.Г.**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань)

## Авторы

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

## Редакция

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

## Перепечатка

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

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

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

**Founder of the journal:**

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

**Publisher:** «STROYMATERIALY»

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

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

# BETON I ZHELEZOBETON

Published since 1955

**4-5 (612-613)  
 July-October'2022**

A.I. ZVEZDOV, D.V. KUZEVANOV, Yu.S. VOLKOV <b>Professor A.A. Gvozdev. To the 125<sup>th</sup> Anniversary of the Birth.</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>InterConPan-2022. Technological Sovereignty for Industrial Housing Construction in the Russian Federation</b> . . . . .	<b>7</b>
V.R. FALIKMAN, P.N. SIROTIN <b>Present Methods for AAR Estimating.</b> . . . . .	<b>15</b>
R.O. REZAEV, A.A. DMITRIEV, D.V. CHERNYAVSKY <b>Application of Probabilistic Approaches for the Construction of "Composition-Property" Models. Part I (Theory)</b> . . . . .	<b>25</b>
V.N. STROTSKIY, V.I. SAVIN, V.V. POLETAEV <b>Deformation Characteristics of Lightweight Concrete Based on Granular Foam Glass Ceramics</b> . . . . .	<b>38</b>
E.A. SADOVSKAYA, S.N. LEONOVICH <b>Comparative Analysis of Calculation of the Stress Intensity Factor Based on the Results of Equilibrium and Non-Equilibrium Tests</b> . . . . .	<b>46</b>
D.Yu. SNEZHKOVA, S.N. LEONOVICH, N.A. BUDREVICH, MIAO JIJUN <b>Evaluation of the Quality of Bored Piles by Seismoacoustic and Interwell Ultrasonic Methods</b> . . . . .	<b>52</b>
E.A. CHERNYGOV <b>Investigation of the Work of Three Wire Ropes with Concrete.</b> . . . . .	<b>60</b>
T.A. MUKHAMEDIEV, S.A. MAIOROV <b>Taking into Account the Operation of Compressed Composite Polymer Reinforcement when Calculating the Strength of Compressed Elements According to the Deformation Model</b> . . . . .	<b>66</b>
A.N. BOLGOV, A.Z. SOKUROV, A.V. NEVSKIY <b>On the Development of a New Set of Rules SP 513.1325800 "Anchor Fastenings to Concrete. Design Rules"</b> . . . . .	<b>72</b>

**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)

**GRANOV 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)

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

**RAKHMANOV V.A.**, Candidate of Sciences, Professor, Corresponding Member of RAACS, Chairman of the Board of Directors LLC «Institute VNIIZhelezobeton» (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**

А.И. ЗВЕЗДОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по науке;  
Д.В. КУЗЕВАНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, директор; Ю.С. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ученый секретарь

<sup>1</sup> АО НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

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

## Профессор А.А. Гвоздев. К 125-летию со дня рождения

*Работа посвящена 125-летию со дня рождения Алексея Алексеевича Гвоздева, одного из ярких представителей отечественных ученых XX в. Имя А.А. Гвоздева неразрывно связано с историей развития строительных конструкций в СССР. Он был выдающимся педагогом, исследователем, инженером и крупным организатором строительной науки. Плодотворная научная, инженерная, педагогическая и общественная деятельность доктора технических наук, профессора, академика А.А. Гвоздева была высоко оценена государством. Он был награжден рядом орденов, многими медалями за военные и гражданские заслуги, ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда, звание заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** А.А. Гвоздев, бетон, железобетон, история, методы расчета, НИИЖБ.

**Для цитирования:** Звездов А.И., Кузеванов Д.В., Волков Ю.С. Профессор А.А. Гвоздев. К 125-летию со дня рождения // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 3–6.

A.I. ZVEZDOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Deputy General Director for Science;

D.V. KUZEVANOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Director; Yu.S. VOLKOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Scientific Secretary

<sup>1</sup> Research Center of Construction Joint Stock Company (6, 2nd Institutskaya Street, 109428 Moscow, Russian Federation)

<sup>2</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev (Research Center of Construction Joint Stock Company (6, 2nd Institutskaya Street, 109428 Moscow, Russian Federation)

### Professor A.A. Gvozdev. To the 125<sup>th</sup> Anniversary of the Birth

The work is dedicated to the 125th anniversary of the birth of Alexey Alekseevich Gvozdev, one of the brightest representatives of Russian scientists of the XX century. The name of A.A. Gvozdev is inextricably linked with the history of the development of building structures in the USSR. He was an outstanding teacher, researcher, engineer and major organizer of building science. Fruitful scientific, engineering, pedagogical and social activities of Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician A.A. Gvozdev was highly appreciated by the State. He was awarded a number of orders, many medals for military and civil merits, he was awarded the title of Hero of Socialist Labor, the title of Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation.

**Keywords:** A.A. Gvozdev, concrete, reinforced concrete, history, design, NIIZHB.

**For citation:** Zvezdov A.I., Kuzevanov D.V., Volkov Yu.S. Professor A.A. Gvozdev. To the 125<sup>th</sup> anniversary of the birth. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 3–6. (In Russian).



Алексей Алексеевич Гвоздев  
(1897–1986) [6]

В 2022 г. исполнилось 125 лет со дня рождения **Алексея Алексеевича Гвоздева**, одного из ярких представителей российских ученых XX в., посвятившего свою научную и инженерную деятельность развитию строительной механики, созданию теории железобетона, исследованию, разработке и применению в строительстве различных железобетонных конструкций [1–5].

Начиная с 1930-х гг. имя А.А. Гвоздева как выдающегося педагога, исследователя, инженера и крупного организатора строительной науки неразрывно связано с историей развития строительных конструкций в СССР.

Алексей Алексеевич Гвоздев родился 9 мая 1897 г. в селе Богучарово Тульской губернии, где находилось поместье семьи Гвоздевых. Интересно отметить, что Л.Н. Толстой, когда писал свой великий роман «Война и мир», поместье одного из главных своих героев, князя Андрея Болконского, расположил именно в Богучарове.

Алексей Алексеевич окончил в 1922 г. Московский институт инженеров путей сообщения (МИИТ). Начало карьеры инженера А.А. Гвоздева совпало с началом эпохи первых пятилеток, стержнем заданий которых было строи-

тельство многочисленных промышленных объектов. Правительство СССР понимало значение науки для решения этих грандиозных задач. В 1927 г. в Москве был создан Государственный институт сооружений – ГИС, куда А.А. Гвоздев был приглашен на должность заведующего отделом расчета конструкций.

В течение почти всей жизни А.А. Гвоздев успешно совмещал проектную и исследовательскую работу с преподаванием в высших учебных заведениях. Так, он преподавал строительную механику и строительные конструкции сначала в МИИТ, затем в МВТУ, с 1932 по 1941 г. он профессор кафедры строительной механики Военно-инженерной академии и далее до 1962 г. – профессор кафедры железобетонных конструкций МИСИ. С началом войны А.А. Гвоздев был призван в Красную Армию в чине военного инженера 1-го ранга, где он выполнял исследования воздействия взрывной волны на железобетонные конструкции, и внес свой вклад в развитие фортификационных сооружений.

Велики заслуги А.А. Гвоздева в создании отечественной нормативной базы в части теории и практики расчета строительных, прежде всего железобетонных, конструкций.

Первым обязательным всесоюзным нормативным документом в этой области стали технические условия и нормы проектирования и возведения железобетонных и бетонных конструкций и сооружений, изданные в 1931 г. Этот документ был разработан группой специалистов, в которую входил наряду с профессорами Н.М. Беляевым, В.М. Келдышем, А.Ф. Лолейтом инженер А.А. Гвоздев.

В 1933 г. Гвоздеву самому было присвоено ученое звание профессора, а в 1935 г. присуждена по совокупности трудов ученая степень доктора технических наук.

Разработка методов расчета железобетонных конструкций опиралась на результаты обширных экспериментов, поэтому много времени и сил А.А. Гвоздев уделял созданию экспериментальной базы. В стране строились новые заводы, фабрики, электростанции. Росла индустриализация строительства, одним из основных путей которой стало применение сборных конструкций.

На Первой Всесоюзной конференции по бетону и железобетону в 1930 г. А.А. Гвоздев выступил с докладом по проблеме проектирования и изготовления новых тогда сборных железобетонных конструкций.

Для анализа недостатков и выявления путей дальнейшего развития сборного железобетона научно-техническое общество строителей приняло решение провести широкое обсуждение нового метода строительства. Обсуждение состоялось в марте 1933 г. в Москве и носило название «Всесоюзный

технический суд над сборным железобетоном» с выступлением «обвинения и защиты», с «допросом свидетелей». В процессе подготовки «суда» возникло затруднение в назначении «обвинителей». Выступить в качестве «защитника» желающих было достаточно, но взять на себя функции «обвинителя» прогрессивного метода строительства никто из крупных специалистов в области железобетона не хотел. И тогда эту обязанность взял на себя А.А. Гвоздев, являвшийся одним из организаторов «суда». Защитники сообщали, как правило, хорошо известные данные и поэтому их выступления не привлекли большого внимания в зале суда. Наоборот, речь «обвинителя» оказалась весьма содержательной. В результате бурной дискуссии метод сборного строительства «судом» был полностью оправдан и, более того, вошел в Директиву по капитальному строительству очередной Всесоюзной партийной конференции, что в реалиях того времени означало придание политического значения преимущественному применению сборного железобетона.

Научная деятельность А.А. Гвоздева касалась многих областей, но главным образом была направлена на:

- развитие строительной механики статически неопределимых систем и оболочек;
- решение проблем прочности и деформативности железобетона;
- разработку и развитие нормативных документов по расчету железобетонных конструкций.

В 1949 г. вышел капитальный труд А.А. Гвоздева «Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия», в котором он дал теоретическое обоснование метода предельного равновесия для расчета несущей способности конструкций из материалов, обладающих упругопластическими свойствами, нашел общий метод расчета прочности для железобетонных элементов.

За разработку основных положений и доказательство двух фундаментальных теорем метода предельного равновесия А.А. Гвоздеву в 1967 г. была присуждена медаль Густава Тразенстора Бельгийским инженерным обществом, которой награждаются ученые за крупный вклад в области прикладной математики.

Объем применения в строительстве сборных и монолитных железобетонных конструкций быстро возрастал. В 1956 г. для научного обеспечения дальнейшего развития строительной отрасли было принято решение организовать самостоятельный НИИ бетона и железобетона (НИИЖБ) в структуре вновь созданной Академии строительства и архитектуры СССР.

Институт был образован путем разделения ЦНИПС на три института: по бетону и железобето-

ну – НИИЖБ, по другим строительным конструкциям – ЦНИИСК и по строительной физике – НИИСФ.

Одной из ведущих лабораторий НИИЖБ стала Центральная лаборатория теории железобетона и новых видов арматуры, которую, естественно, возглавил профессор А.А. Гвоздев.

Алексей Алексеевич стремился донести результаты исследований до широкого круга ученых, для чего организовывал подготовку регулярного издания сборников трудов лаборатории. Результаты этих исследований опубликованы более чем в тридцати сборниках трудов лаборатории, изданных под редакцией ее руководителя.

Таким образом, под руководством А.А. Гвоздева была создана отечественная школа расчета и проектирования железобетонных конструкций, разработаны оригинальные и разнообразные методы экспериментально-теоретических исследований бетона, арматуры, железобетонных элементов и статически неопределимых конструкций при различных видах воздействий. К началу 80-х гг. XX в. в лаборатории числилось около шестидесяти сотрудников и более десяти аспирантов. Непосредственно под его научным руководством за время, которое А.А. Гвоздев возглавлял лабораторию, более ста специалистов защитили кандидатские диссертации, а десять – докторские.

А.А. Гвоздев всегда интересовался новыми путями развития железобетонных конструкций. Как пример, можно привести его внимание к исследованиям по стеклопластиковой арматуре, перспективы применения которой были весьма неопределенными.

Велика заслуга А.А. Гвоздева в поддержке развития предварительно напряженного железобетона, хотя по рассказам автора этого метода профессора Виктора Васильевича Михайлова, Алексей Алексеевич первоначально отнесся к его идее весьма скептически. В дальнейшем же А.А. Гвоздев рассматривал железобетон с обычной арматурой как частный случай предварительно напряженного железобетона. В разработанном под его руководством СНиП 2.03.01.84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» прямо указано (п. 1.4): «При выборе элементов должны предусматриваться преимущественно предварительно напряженные конструкции из высокопрочных бетонов». В 1978 г. Международная Федерация по предварительно напряженному железобетону – FIP присудила А.А. Гвоздеву свою высшую награду – медаль имени основателя федерации Эжена Фрейссине. Четырьмя годами ранее этой же медалью был награжден В.В. Михайлов.

Наряду с теоретическими направлениями в науке о железобетоне А.А. Гвоздев внес огромный вклад в разработку норм проектирования железобетонных

конструкций. Более пятидесяти лет А.А. Гвоздев возглавлял разработку нормативных документов по проектированию бетонных и железобетонных обычных и предварительно напряженных конструкций.

Разработка первых в мире нормативных документов по проектированию бетонных и железобетонных конструкций по предельным состояниям стала возможной благодаря систематическим теоретическим и экспериментальным исследованиям, которые велись под руководством А.А. Гвоздева.

НИИЖБ в 1980-х гг. обладал развитой экспериментальной базой, в институте работало более тысячи сотрудников, в том числе более тридцати пяти докторов наук, ежегодно защищалось почти пятьдесят диссертаций. В 1970–1980 гг. Алексей Алексеевич немало сделал, чтобы вывести институт на мировой уровень. Он воплотил свою мечту (переступая в 1927 г. порог ГИС) – создал исследовательский центр по бетону и железобетону, укомплектованный современной по тем временам экспериментальной базой и высококвалифицированными специалистами.

А.А. Гвоздев много лет начиная с 1930 г. активно участвовал в работе Всесоюзного научно-технического общества строителей. Каждые четыре-пять лет проводились всесоюзные конференции по бетону и железобетону, на которых подводились итоги выполненных исследований и определялись задачи на будущее; А.А. Гвоздев был непременным пленарным докладчиком по развитию теории железобетона.

В начале 1970-х гг. Европейский комитет по бетону – ЕКБ начал разработку первых международных норм по расчету железобетонных конструкций – будущего Еврокода-2 (EN 1992). А.А. Гвоздев был одним из активных участников разработки общеевропейских нормативных документов. Именно по предложению А.А. Гвоздева принятый в отечественных нормах метод расчета по предельным состояниям был включен первоначально в европейские нормы (Limit State Design), а затем был заимствован нормами ряда других стран – США, Японии и др. Мнение А.А. Гвоздева было решающим, а авторитет огромен. Был момент, когда в процессе работы над документом А.А. Гвоздеву было сложно лететь на заседание ЕКБ в Лондон и делегация ЕКБ из десяти человек во главе с президентом Комитета профессором Эндрю Шортом прибыла в Москву. Внеочередная сессия ЕКБ по разработке европейских норм прошла в гостинице «Космос».

В мае 2014 г. в Российской академии наук состоялась Международная конференция по железобетону, на которой с обширным докладом выступил профессор Марио Чиорино из Италии, в котором он отметил выдающиеся заслуги А.А. Гвоздева в создании мето-

дов расчета железобетонных конструкций с учетом длительных деформаций.

Плодотворная научная, инженерная, педагогическая и общественная деятельность профессора А.А. Гвоздева была высоко оценена государством. В 1967 г. его удостоили звания Героя Социалистического Труда. Кроме того, он был награжден двумя орденами Ленина, орденами Красного Знамени, Красной Звезды и многими медалями.

До своей смерти в 1986 г. Алексей Алексеевич оставался в строю: он был членом комитета по присуждению Ленинских премий, участвовал в работе ученых советов, консультировал при разработке сложных проектов.

В 2007 г. в память о заслугах Гвоздева перед отечественной наукой его имя было присвоено НИИЖБ, которому он отдал много лет своей плодотворной жизни.

#### Список литературы

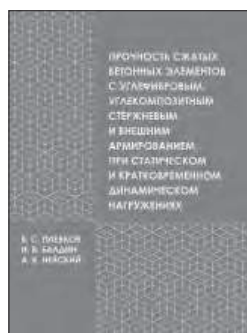
1. Михайлов К.В., Хайдуков Г.К. Алексей Алексеевич Гвоздев. М., 1997 г.
2. К 100-летию юбилею А.А. Гвоздева // *Бетон и железобетон*. 1997. № 2.
3. 100-летие А.А. Гвоздева. Тезисы докладов 4-й конференции. 21–22 мая 1997. Москва.
4. Институт бетона и железобетона. Очерки истории. НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1990.
5. 80-летие НИИЖБ им. А.А. Гвоздева: Сборник статей. М.: НИЦ «Строительство», 2007.
6. Вестник НИЦ «Строительство». Бетон и железобетон – проблемы и перспективы: Сборник статей. Вып. 1 (16) / Под ред. А.И. Звездова и В.Р. Фаликмана. М.: АО «НИЦ «Строительство», 2018. 172 с.

#### References

1. Mikhailov K.V., Khaidukov G.K. Alexey Alekseevich Gvozdev. Moscow, 1997. (In Russian).
2. To the 100th anniversary of A.A. Gvozdeva. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1997. No. 2. (In Russian).
3. 100th anniversary of A.A. Gvozdev. Abstracts of the 4th conference. May 21–22, 1997. Moscow. (In Russian).
4. Institute of Concrete and Reinforced Concrete. History essays. NIIZhB Gosstroy of the USSR. Moscow, 1990. (In Russian).
5. 80th anniversary of NIIZhB named after A.A. Gvozdev. Digest of articles. Moscow: Research Center “Construction”. 2007. (In Russian).
6. Vestnik of the Research Center “Construction”. Concrete and reinforced concrete – problems and prospects: Collection of works. Iss. 1 (16) / ed. by A.I. Zvezdova and V.R. Falikman. Moscow: JSC “NIC “Construction”. 2018. 172 p. (In Russian).

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

Авторы – В.С. Плевков, И.В. Балдин, А.В. Невский  
 ISBN 978-5-6048004-3-0  
 Томск, Издательство ТГАСУ. 2022, 176 с.



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

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

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



# InterConPan-2022

## Технологический суверенитет для индустриального домостроения в Российской Федерации

### InterConPan-2022

#### Technological Sovereignty for Industrial Housing Construction in the Russian Federation

АО «ЦНИИЭП жилища» (Москва) и объединенная редакция журналов «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» (Москва) при поддержке Комитета Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству в сфере строительства выступили организаторами XII Международной научно-практической конференции «InterConPan-2022: инновации для индустриального домостроения», которая прошла 28–29 июня 2022 г. в Конгресс-Центре Торгово-промышленной палаты в Москве. В мероприятии приняли участие более 170 специалистов строительно-инвестиционных компаний, домостроительных предприятий и проектных организаций, представители машиностроительных и инженеринговых компаний, поставщики программного обеспечения, ученые вузов и научно-исследовательских институтов из 27 регионов Российской Федерации и трех зарубежных стран. Партнерами конференции в этом году стали ООО «Петро Билдинг Системс» (Санкт-Петербург); ЗАО «Рекон» (Чебоксары); Allbau Software GmbH (Германия); ООО «ШНЕЛЛ РУС» (Италия). Производственный партнер – ГК «МонАрх» (Москва).

JSC «TSNIEEPzhilishcha» (Moscow) and the joint editorial board of the journals «Construction Materials»® and «Housing Construction» (Moscow) with the support of the Committee of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation on Entrepreneurship in the field of construction were the organizers The XII International Scientific and Practical Conference «InterConPan-2022: innovations for industrial housing construction», which was held on June 28–29, 2022 at the Congress Center of the Chamber of Commerce and Industry in Moscow. The event was attended by more than 170 specialists of construction and investment companies, house-building enterprises and design organizations, representatives of machine-building and engineering companies, software suppliers, scientists from universities and research institutes from 27 regions of the Russian Federation, three foreign countries. The partners of the conference were Petro Building Systems LLC (St. Petersburg); Recon CJSC (Cheboksary); Allbau Software GmbH (Germany); SCHNELL RUS LLC (Italy). The production partner is Monarch Group of Companies (Moscow).

Особое место среди технологий строительства жилья занимает индустриальное домостроение, позволяющее максимально быстро возводить большой объем комфортного жилья по доступной для массового потребителя цене. Данная технология полностью отвечает задачам Стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ до 2030 г., которая обсуждается и дорабатывается в Минстрое РФ.

Участники конференции заслушали более 20 докладов и обсудили ключевые вопросы развития отрасли:

– снижение зависимости индустриального домостроения от поставок импортного оборудования, развитие отечественных технологий, их своевременное и эффективное внедрение для обеспечения технологического суверенитета;

– внедрение цифровых технологий в проектирование, производство и строительство;

– современное « типовое » проектирование: разработка, внедрение и широкое использование при возведении зданий и сооружений научно обоснованных типовых объемно-плани-





ровочных и конструктивных решений, модульных зданий комплектной поставки, что позволит развить эффективные методы широкого повторного использования надежных, технологичных и отработанных проектных решений, обеспечивая рациональное использование материальных и финансовых ресурсов при сокращении сроков строительства;

– нормативно-технические документы в области индустриального домостроения и использования модульных зданий и сооружений, а также вопросы упрощения нормативного правового регулирования строительства зданий с применением модульных технологий.

Более тридцати докладов заслушано в ходе работы XII Международной научно-практической конференции «InterConPan-2022: инновации для индустриального домостроения».

Коллеги обменивались опытом и обсуждали вопросы технологического суверенитета в области индустриального домостроения.

Исполняющий обязанности директора Федерального центра нормирования и стандартизации Минстроя России **А.В. Копытин** (Москва) отметил, что в утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации 27.09.2021 № 2692-р дорожной карте «Реинжиниринг правил промышленного строительства» определен упрощенный порядок градостроительной деятельности – сокращенный состав проектной документации и осуществление экспертизы только в части привязки модульного здания к земельному участку. А декларируемый в Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. запуск массового строительства индивидуальных жилых домов индустриальным способом требует «включения в план мероприятий по реализации национальных проектов технологий индустриального домостроения, в том числе технологий сборно-монолитного каркаса, блочно-модульного строительства и деревянного домостроения, а также современных строительных материалов,





включая алюминиевые, композитные и полимерные и полученные за счет вторичной переработки сырья или отходов строительства и сноса».

Проекты монолитно-сборных домов для первоочередной застройки малоэтажных поселков представил д-р техн. наук, научный руководитель АО «ЦНИИЭП жилища» (Москва) **С.В. Николаев**. Он рассказал об опыте строительства пилотного дома, на котором отработаны технологические и ценовые вопросы. Монолитно-панельный дом со сборно-монолитными петлевыми соединениями и многупустотными плитами перекрытий – это симбиоз двух видов строительства: от монолитного домостроения взято бетонирование узлов соединений панелей для надежного восприятия усилий в узлах соединений и создания надежной преграды для протеканий и промерзаний, от панельного – заводское гарантированное качество наружных, внутренних стен, перекрытий, бетонных лестниц и перегородок. При этом комфортное жилье стоит на 15–20% ниже самого дешевого панельного жилья и строится в два-три раза быстрее монолитного: от инвестирования строительства до въезда в дом не более 1,5 месяцев. Применение сборно-монолитных соединений позволяет достичь абсолютной герметичности горизонтальных и вертикальных стыков в доме, исключить сварочные работы и тем самым обеспечить экологичность возведения зданий. Полученные результаты позволяют определить (в ценовых параметрах 2021 г.) себестоимость строительства в 45 тыс. р./м<sup>2</sup> и сроки строительства до 1,5 месяцев для домов с закрытым тепловым контуром.

На эффективности использования отечественных кассетных установок остановился **В.В. Мошкин** – ген. директор ООО «Петро Билдинг Системс» (Санкт-Петербург). Он отметил, что в сравнении с горизонтальным формованием минимум в десять раз меньше задействуется производственной площади: кассетная установка на 20 отсеков занимает 150 м<sup>2</sup>. Поверхность панелей не требует дополнительной обработки. Кантования изделия не требуется. Использование магнитной бортовоснастки позволяет быстро перенастраивать оборудование под другие проекты. Ремонтпригодная система





обогрева позволяет устранить неполадки без разрезания рубашки, а эффективная термообработка изделия с двух сторон положительно влияет на производительность оборудования. Производительность оборудования до двух оборотов в сутки кассетной установки на 20 отсеков позволяет производить 200 тыс. м<sup>2</sup> стеновых панелей в год.

Ген. директор Концерна «КРОСТ» (Москва) **А.А. Добашин** сделал акцент на промышленно-строительном суверенитете. Строительная отрасль РФ имеет зависимых от импорта позиций: из материалов – стекло, пигменты, химия (20%); из изделий – муфты, грувлоки, саморезы, инструмент (40%); из конструкций – высокопрочные закладные (10%); из оборудования – краны, лифты, опалубка, кондиционеры, насосы, генераторы, линии для производства ЖБИ, датчики, станки ЧПУ, строительная техника, оборудование для испытаний (80%). Это приводит к перенастройке технологической цепочки, а в итоге к срыву поставок, росту стоимости, увеличению сроков сдачи объекта. Еще в 2021–2022 гг. Концерн «КРОСТ» локализовал производство высококачественной опалубки для производства сборного железобетона на основе итальянских технологий. В результате срок изготовления уменьшился в четыре раза, стоимость – в два раза. Сотрудничество с НИИСФ РААСН позволило ввести в эксплуатацию климатическую камеру, предназначенную для испытаний большеразмерных фрагментов ограждающих светопрозрачных конструкций зданий на водонепроницаемость, воздухопроницаемость, ветрозащитенность. До конца 2021 г. такие испытания приходилось осуществлять на зарубежных экспериментальных базах. С помощью этой установки можно осуществлять испытания конструкций площадью до 75 м<sup>2</sup>, фрагментов сооружений высотой на три этажа.

Кроме того, Алексей Алексеевич рассказал о комбинаторике как методе проектирования современной промышленной коллекции зданий, позволяющей вычислять необходимое количество элементов и их комбинаций в каждом домокомплекте; число видов работ, выполняемых параллельно как на заводе, так и на строительной площадке; необходимое количество операций при производстве промышленных элементов для оптимизации производства. Благодаря комбинаторике весь строительный процесс можно разложить на типовые операции, оптимизировать трудовые и временные затраты на каждую операцию, в конечном счете фундаментально ускорить строительство.





Эстетическим качествам жилых домов предложил уделять больше внимания **В.А. Шембаков**, ген. директор ЗАО «Рекон» (Чебоксары), поставляющего комплекс отечественного оборудования для индустриального возведения зданий. Достижение архитектурной выразительности отдельных индустриальных элементов возможно за счет использования фиброцемента в наружных четырехслойных панелях, выполненных на универсальном стенде. Он отметил, что при соединении современных технологий, обеспечивающих прочность конструкций, с архитектурной выразительностью в итоге будут выполнены базовые требования строительства – безопасность, сейсмостойчивость, функциональность, энергоэффективность и ресурсосбережение.

Об опыте возведения высотных крупнопанельных домов подробно рассказал **Е.В. Румянцев**, руководитель управления R&D Департамента Продукта ООО «ПИК-Строительные Технологии» (Москва). В соответствии с СП 276.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» здание, имеющее «пожарную» высоту более 75 м, является высотным, а по ГрК РФ здание высотой более 100 м является уникальным. Известно, что современные требования нормативных документов по проектированию сборных ж/б конструктивных систем зданий (СП335, СП356) не распространяются на высотные здания, а СП 276.1325800.2016 содержит прямой запрет на использование сборных железобетонных конструктивных систем и допускает использование сборных конструкций только в качестве несъемной опалубки, а также при обосновании в качестве плит перекрытий, лестничных площадок и маршей. Известен отечественный опыт возведения сборных зданий в Челябинске (75 м) и Екатеринбурге (80 м). В докладе была представлена разработанная система мониторинга конструкций при возведении 33-этажного дома до 100 м высотой: при контроле несущих конструкций (внутренних и наружных стен) необходимо контролировать вертикальные относительные деформации, косвенно – напряжения, изменения вертикальной нагрузки струнными датчиками деформаций; при контроле конструктивной системы здания в совокупности необходимо контролировать угловые деформации (крен), параметры колебаний (частоты и амплитуды) цифровыми двухосевыми наклономерами и трехкомпонентным акселерометром. При возведении пилотных домов особенное внимание было уделено выполнению вертикальных сты-





ков с помощью перевязки стеновых панелей, заливке стыков с помощью «холодных» самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей.

В докладе **Д. Хайретдинова** (Allbau Software GmbH) было отмечено, что если рассмотреть развитие сборного проекта от получения исходных данных проектирования к выдаче производственных данных и планированию, то обычно эти стадии разделяются ручными операциями, на которых теряется производительность – ручная загрузка в машину шаблонов сеток, очистка чертежа изделия для графопостроителя, ручной ввод объемов комплектующих с чертежа в карточку изделия 1С и т. д. В Allplan Precast же эти операции соединены бесшовно, и производительность не только не теряется, но наращивается, в частности за счет применения специализированных модулей и функций в Allplan Precast для OpenBIM, которые вошли в состав пакетов для удобного заимствования модели архитектора, автопробивания проемов, работы с альбомом типовых узлов, проектирования объемных изделий, в том числе и лестниц.

Обзор вариантов производства объемных модулей и опыта их применения сделал член Комитета по предпринимательству в сфере строительства Торгово-промышленной палаты РФ **Р.Х. Морзаганов**. Он отметил преимущества использования опрокидывающейся поршневой формы при индустриальном производстве: сокращение сроков производства; более высокий объем производства (4–5-кратное бетонирование изделий в сутки в одной форме); высокое качество поверхности всех сторон; отсутствие дополнительной установки панелей крыши или пола; уменьшенные площади для окончательной отделки. Последующая сборка плоских элементов в объемный блок с установкой инженерных коммуникаций и чистовой отделкой позволяет организовать универсальное производство любых плоских и объемных элементов; изготавливать объемные блоки разной конфигурации и размеров с финишной отделкой на заводе; создавать объекты жилого и общественного назначения с разнообразной архитектурой; возводить и малоэтажное и многоэтажное жилье.

В проекте решения XII Международной научно-практической конференции «InterConPan-2022» участники отметили, что индустриальное домостроение превосходит по скорости, качеству и экономичности все другие методы строительства жилья – кирпичное, монолитное, крупноблочное. Только крупнопанельное и объемно-блочное домостроение от малоэтажного до высотного способно в короткие сроки решить главную социально-экономическую задачу государства – обеспечение населения России качественным и недорогим жильем. Для бесперебойной работы предприятий, производящих железобетонные конструкции, необходимо обеспечить технологический суверенитет: наладить бесперебойную поставку современного оборудования на заводы и отработать схему восстановления вышедшего из строя импортного оборудования. Отмечено, что одна из главных задач – подготовка высококвалифицированных инженеров-технологов-строителей. Существующая в строительных вузах России двухуровневая система «бакалавр–магистр» готовить таких специалистов практически не может. В настоящее время предприятия стройиндустрии испытывают острый дефицит инженеров-технологов, которых выпускали строительные факультеты строительных вузов страны. В соответствии



с Постановлением ЦК КПСС и Правительства СССР от 1954 г. «О производстве бетонных и железобетонных изделий для сборного строительства» к 1989 г. в СССР действовало 6 тыс. заводов и комбинатов общей мощностью 150 млн м<sup>3</sup> бетонных изделий и конструкций для всех видов строительства. В настоящее время в каждом регионе РФ имеется работающий завод ЖБК, КПД или ОБД. Поэтому наступило время перехода технических вузов России на подготовку полноценных инженеров, а для строительной индустрии – инженеров-технологов-строителей по учебному плану и программам, соответствующим современному уровню развития науки и технологий. Участники конференции предложили, в частности, разработать новый учебный план и рабочие программы дисциплин по специальности «Индустриальное домостроение» к началу 2023/24 учебного года на основе базовых государственных архитектурно-строительных университетов, а ведущие проектные институты и предприятия сборных железобетонных конструкций, КПД и ОБД просить обеспечить студентам специальности «Индустриальное домостроение» возможность прохождения практики и последующее устройство на инженерные должности на своих заводах.

В рамках конференции состоялся круглый стол, посвященный обсуждению вопросов комплексного проектирования и организации сопровождающих производств. Особенное внимание участники круглого стола уделили снижению материалоемкости изделий КПД и вопросам использования пористых заполнителей для производства изделий КПД. Коллеги обменялись мнениями о производстве крупногабаритных модулей и перспективах отечественного производства оборудования для обеспечения технологического суверенитета.

О возможности индустриальных технологий при восстановлении разрушенных в чрезвычайных ситуациях жилых, общественных и промышленных объектов известно много. Необходимо отметить возможность быстрой ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций за счет оперативного развертывания мобильного производства, сокращения сроков нового строительства и восстановительных работ; высокой гибкости производства в результате применения универсального оборудования для изготовления индивидуальных и стандартных ж/б изделий индустриальным способом, изготовления конструкций по индивидуальным проектам восстановления утраченных элементов зданий (перекрытий, внутренних, наружных стен и лестнично-лифтовых узлов). Эта технология уже предлагается некоторыми застройщиками.





29 июня 2022 г. участники «InterConPan-2022» в рамках выездной сессии посетили инновационный завод по производству крупных модулей ГК «МонАрх».

Технополис модульного домостроения изготавливает модули площадью до 100 м<sup>2</sup> разных габаритов.

В докладе зам. ген. директора ООО «Концерн МонАрх» **А.С. Мещерякова**, который он сделал на пленарном заседании 28 июня, было отмечено, что максимальная длина модуля 15,5 м, максимальная ширина 7,5 м, максимальная высота 3,5 м. Основные особенности технологии заводского производства сверхгабаритных модулей: бесперебойность производства в оптимальных условиях; заводское качество, которого сложно достичь в условиях строительной площадки; контролируемая себестоимость. 90% операций по возведению дома происходят в заводских условиях. В результате достигается более 95% заводской готовности квартир и мест общего пользования с отделкой, сантехническими и электромонтажными работами.

Участники InterConPan-2022 посетили шоу-румы одно-, двух-, трехкомнатных квартир в эксплуатирующемся офисном центре; побывали в первом экспериментальном семиэтажном двухсекционном доме. Специалисты ООО «Комбинат Инновационных Технологий – МонАрх» подробно рассказали о технологии крупногабаритного модульного домостроения, с помощью которой **впервые в мире** изготовлены сверхкрупногабаритные модули площадью свыше 100 м<sup>2</sup>; освоены крупногабаритные модули (до трех этажей) лестничных клеток с полной отделкой и устройством фасадов в заводских условиях; организовано производство трехэтажного блока лифтов с начинкой оборудования и комплектующих в заводских условиях.

Самый распространенный вопрос, который возникал у участников конференции: как обеспечить доставку готовых блоков к месту монтажа? Оказалось, что данная технология уменьшает нагрузки на городскую дорожную сеть при транспортировке сверхкрупногабаритных модулей на объект. Например, при возведении одного дома необходимо 120–150 ночных рейсов вместо 1 тыс. дневных. При этом снижаются шумовые воздействия на окружающую среду в процессе возведения здания: все отделочные работы уже выполнены. Причем в заводских условиях можно добиваться энергосбережения и энергоэффективности. Специалисты ГК «МонАрх» декларировали строительство одного здания выше нулевого цикла за один месяц вместо одного года и, как следствие, ускорение сроков окупаемости проекта. Кроме того, данная технология пригодна для возведения домов в районах Крайнего Севера за счет сокращения трудоемкости работ на стройплощадке в несколько раз и быстрого перевода готовых объектов на постоянное энергоснабжение.



*Объединение профессионалов гарантирует успех!  
Оставайтесь с нами! Ждем встречи в 2023 году!*



В.Р. ФАЛИКМАН, д-р материаловедения (vfalikman@yandex.ru),  
П.Н. СИРОТИН, инженер (pn.sirotin@yandex.ru)

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

## Современные методы оценки реакционной способности заполнителей

Рассматриваются существующие ограничения действующей редакции ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» при оценке реакционной способности горных пород и щебня, имеющих принципиальное значение с точки зрения обеспечения долговечности зданий и сооружений из бетона и железобетона. Показаны подходы к оценке реакционной способности заполнителей для бетонов, устанавливаемые в нормативно-технических документах ведущих международных и национальных организаций по стандартизации. Проанализирована принципиальная возможность выработки алгоритма комплексной оценки реакционной способности заполнителей для бетонов и выбора стратегии снижения риска развития внутренней коррозии бетона в зависимости от условий эксплуатации, предполагаемого срока службы и уровня ответственности сооружений.

**Ключевые слова:** реакционная способность заполнителей для бетонов, внутренняя коррозия бетонов, методы испытаний заполнителей, подбор составов бетонов, долговечность бетонов.

**Для цитирования:** Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Современные методы оценки реакционной способности заполнителей // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 15–24.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-15-24>

V.R. FALIKMAN, Doctor of materials science (vfalikman@yandex.ru),  
P.N. SIROTIN, Engineer (pn.sirotin@yandex.ru)

Research, design and technological institute of concrete and reinforced concrete – NIIZhB named after A.A. Gvozdev, Scientific Research Center «Construction»  
(6, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### Present Methods for AAR Estimating

The paper considers the existing restrictions of the current edition of GOST 8269.0–97 «Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests» in the evaluation of the reactivity of rocks and crushed stone of fundamental importance in terms of durability of buildings and structures made of concrete and reinforced concrete. The approaches to an estimation of reactivity of aggregates for concrete, established in normative-technical documents of the leading international and national standardization organizations, are shown. There has been analyzed the principle possibility of producing the algorithm of the complex estimation of the aggregates reactivity for concrete and choosing the strategy of reduction of the internal concrete corrosion risk depending on operating conditions, presumed service life and responsibility level of the structures.

**Keywords:** AAR in concrete, “internal deterioration” of concrete, testing methods for aggregates, concrete mix design, durability of structural concrete.

**For citation:** Falikman V.R., Sirotin P.N. Present methods for AAR estimating. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 15–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-00-00>

Суммарный ущерб от коррозии в масштабах промышленно развитых стран составляет, как правило, несколько процентов от валового внутреннего продукта и представляет собой серьезную экономическую проблему. Еще более важной является проблема безопасности, поскольку потеря вследствие коррозионного воздействия функциональной способности конструкций в жилых зданиях, объектах критически важной инфраструктуры чревата не только материальным ущербом, но и представляет собой угрозу жизни и здоровью людей. С учетом этого одной из основных задач в технологии бетонов является обеспечение требуемой долговечности

бетонных и железобетонных конструкций и срока их эксплуатации в конкретных условиях. При этом, помимо коррозионного повреждения бетона вследствие воздействия внешних факторов, существует особый вид коррозионных процессов, вызываемый взаимодействием компонентов бетона без обменных реакций с внешней средой – так называемая внутренняя коррозия [1, 2]. К этому типу коррозии относят процессы позднего или вторичного образования этtringита в затвердевшем бетоне, образование таумасита и ряд других процессов, однако наиболее распространенным процессом внутренней коррозии бетона является взаимодействие реакционно-

способных заполнителей со щелочами, содержащимися в бетоне.

Указанный вид коррозии впервые наблюдался и был идентифицирован в Северной Америке в 30-х гг. прошлого века. В 1940 г. он был детально описан в США Т. Стэнтоном [3] по результатам исследования причин повреждения дорожных покрытий в Калифорнии, получив название «щелочная реакция заполнителей» (AAR). Аналогичные процессы коррозии бетона затем были охарактеризованы и описаны в 1947 г. Боугом [4] и в 1952 г. Кюлем [5].

AAR обычно проявляется в виде расширения бетона и образования трещин, что сопровождается снижением прочности, упругости, коррозионной стойкости бетона и может значительно снизить срок службы сооружения. При этом различают два вида трещин: трещины, образовавшиеся в результате неравномерного расширения бетона, и трещины, возникшие в местах ослабления конструкции, когда расширение отдельных ее частей или элементов приводит к высоким напряжениям при сжатии, растяжении, срезе или кручении.

Трещины, являющиеся непосредственным результатом расширения бетона, образуют типичный для бетона неправильный узор. Эти трещины шире всего у поверхности конструкции, достигая 38 мм в тех местах, где внутреннее расширение очень велико, но проникают они в бетон лишь на небольшую глубину, обычно только на несколько сантиметров, теряясь в лабиринте разветвленных микротрещин. Они могут стать местом вытеснения на поверхность щелочных силикагелей и образования выцветов соединений, выщелоченных из бетона.

Трещины, по которым происходит нарушение конструкции, свидетельствуют о наличии высоких внутренних напряжений в бетоне. Поэтому их развитие следует рассматривать как важный показатель надежности сооружения. Кроме того, такие трещины могут сильно ухудшить работу машин и оборудования, установленных на бетонных фундаментах.

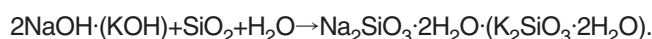
В Великобритании, США, Японии, Канаде, Дании, Ирландии, Новой Зеландии, ЮАР и других странах отмечены массовые случаи разрушения вследствие AAR [6]. Международная федерация по конструкционному бетону fib проанализировала около 100 случаев повреждения конструкций из бетона, связанных с AAR, через 6–10 и 20–30 лет после начала эксплуатации, в том числе в гидротехнических сооружениях, дорожных и аэродромных покрытиях, мостах, тоннелях, шпалах, фундаментах и других конструкциях. Так, результаты обследования Федеральным ведомством по гидротехническим сооружениям в г. Карлсруэ (Германия) шлюзов, плотин, мостов, находившихся в эксплуатации в течение

30–50 лет, имевших типичные повреждения, показали, что в 77% случаев повреждение бетона было связано с наличием в бетоне гравия, в том числе в 17% случаев в заполнителе были обнаружены реакционноспособные породы: риолиты, граувакки, сланцы, в 9% – риолиты, граниты, метаморфические породы, в 6% – граувакки [7].

В работе [8] сообщается о 38 случаях повреждения аэродромных покрытий от AAR, вызванного воздействием щелочесодержащих противогололедных реагентов в аэропортах, принадлежащих США, и о 22 случаях повреждений водопроводных сооружений.

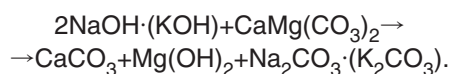
Как правило, при классификации видов реакционноспособного заполнителя выделяют два механизма химического взаимодействия со щелочами, содержащимися в бетоне, – реакцию щелочей с кремнеземом и реакцию щелочей с карбонатом магния в составе доломитов и доломитизированных известняков [6, 9].

В общем виде реакция щелочей с аморфным кремнеземом может быть выражена:



Образующийся в ходе реакции гель силиката натрия и калия увеличивается в объеме и вызывает характерное растрескивание бетона – как правило, с хорошо идентифицируемым при микроскопии трещин высохшим белесоватым гелем, наличием реакционной каймы по границам зерен заполнителя и частичной или полной потерей механического сцепления между зерном и цементным камнем [10, 11]. Гель четко идентифицируется с применением уранилацетата  $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [6].

Взаимодействие щелочей с карбонатами в составе доломитов (кальцитизация доломитов, раздоломичивание) в общем виде выражается следующей реакцией:



Потенциальный деструктивный процесс в этом случае обусловлен не образованием расширяющегося силикагеля, а увеличением в объеме крупных частиц заполнителя при реакции гидроксида щелочного металла с небольшими кристаллами доломита в глинистой матрице (т. е. распаду доломита на кальцит и брусит с образованием карбоната натрия или калия).

Для объяснения потенциальной реакционной способности отдельных горных пород, таких как филлиты, аргиллиты и некоторые граувакки, рядом авторов [9] высказано предположение о специфическом механизме взаимодействия, поскольку в этом случае реакция щелочей происходит не с аморфным кремнеземом, а с содержащимися в этих горных породах

силикатами слоистой структуры – филлосиликатами. Тем не менее на данный момент большинством специалистов не рассматривается выделение этой реакции как отдельного вида AAR [6].

В России и бывшем СССР хорошо известны случаи повреждения за счет AAR фундаментных конструкций жилых домов, шпал на железной дороге, железобетонных конструкций ряда общественных и промышленных зданий и сооружений, конструкций портовых сооружений. Впервые в СССР исследования AAR проводили В.М. Москвин и Г.С. Рояк [12]. В последующем в работах В.М. Москвина, С.М. Рояка и Г.С. Рояка, Ф.М. Иванова, А.М. Викторова, Г.В. Любарской, Н.К. Розенталя, Г.В. Чехний, З.Б. Энтина, Б.Э. Юдовича, М.Л. Нисневича., М.И. Лопатникова, Н.С. Левковой, Т.А. Затворницкой, Т.М. Петровой, В.Г. Хозина и др. исследовались отдельные заполнители и процессы взаимодействия щелочей цемента и добавок с реакционноспособными заполнителями, был определен перечень реакционноспособных пород Советского Союза и дана ориентировочная оценка сырьевой базы [13].

Большой объем экспериментальных работ был выполнен в период с 1963 по 1969 г. в лаборатории каменных материалов НИС Гидропроекта и одновременно в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта и Среднеазиатском отделении Гидропроекта в Ташкенте. В 80-х гг. детальную оценку ресурсов заполнителей и их минералогии провел институт ВНИИПИСтромсырье [14].

За последние десятилетия в Научно-исследовательском институте бетона и железобетона (НИИЖБ) исследовали не менее 50 различных заполнителей (щебня, гравия, песка) с содержанием растворимого в щелочах  $\text{SiO}_2$  от 20 до 1100 ммоль/л (Н.К. Розенталь, Г.В. Любарская, Г.В. Чехний, А.Н. Розенталь). Там же выполнены испытания щебня из доломитизированных известняков месторождений Данковское и Зубцовское с содержанием карбонатов  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  в щебне около 40%. Морозовой и сотрудниками [15] выполнен анализ содержания реакционноспособного кремнезема в гравии различных месторождений р. Кама, использованном заводами товарного бетона и сборного железобетона г. Казани за период 2001–2005 гг.

С учетом значительного срока протекания процесса внутренней коррозии в бетоне в естественных условиях и соответственно отсроченного проявления внешних симптомов развития деструктивных процессов особое значение приобретают методы идентификации реакционноспособного заполнителя и методы оценки риска развития коррозии при использовании потенциально реакционноспособных заполнителей.

В соответствии с требованиями действующего в Российской Федерации ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» щебень и гравий для строительных работ должны быть стойкими к воздействию окружающей среды; при этом щебень и гравий, предназначенные для применения в качестве заполнителей для бетонов, должны также обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента. ГОСТ 8267–93 определяет реакционную способность горной породы как характеристику наличия минералов, содержащих растворимый в щелочах кремнезем, и в качестве критерия, позволяющего без ограничений применять щебень и гравий в бетонах, устанавливает содержание не более 50 ммоль/л аморфных разновидностей диоксида кремния, растворимых в щелочах (Приложение А). Однако по результатам проведенных отечественными специалистами многочисленных исследований можно констатировать, что содержание растворимого диоксида кремния в заполнителе 50 ммоль/л не может являться критерием опасности повреждения бетона от AAR. При использовании этого критерия некоторые заполнители могут быть неоправданно оценены как реакционноспособные. В то же время при содержании растворимого диоксида кремния ниже указанного значения некоторые заполнители вызывают существенные деформации бетона, приводящие к его растрескиванию.

Определение реакционной способности в ГОСТ 8267–93 предполагается как линейная последовательность испытаний горной породы либо щебня и гравия следующими методами:

– минералого-петрографическим – на стадии разведки месторождения и для оценки горных пород и щебня для использования их в качестве сырья для производства заполнителей бетонов;

– химическими – в случае обнаружения наличия потенциально реакционноспособных пород и минералов пород и минералов для оценки количественного содержания в них растворимого в щелочах кремнезема;

– ускоренным с измерением деформаций бетонов – для определения возможности проявления щелочной коррозии бетонов в случае, когда количественное содержание растворимого в щелочах кремнезема превышает установленные нормативные значения;

– непосредственным испытанием образцов бетонов – для определения возможности проявления щелочной коррозии бетона в случае, когда относительные деформации расширения образцов бетона, определенные ускоренным методом, превышают установленные значения.

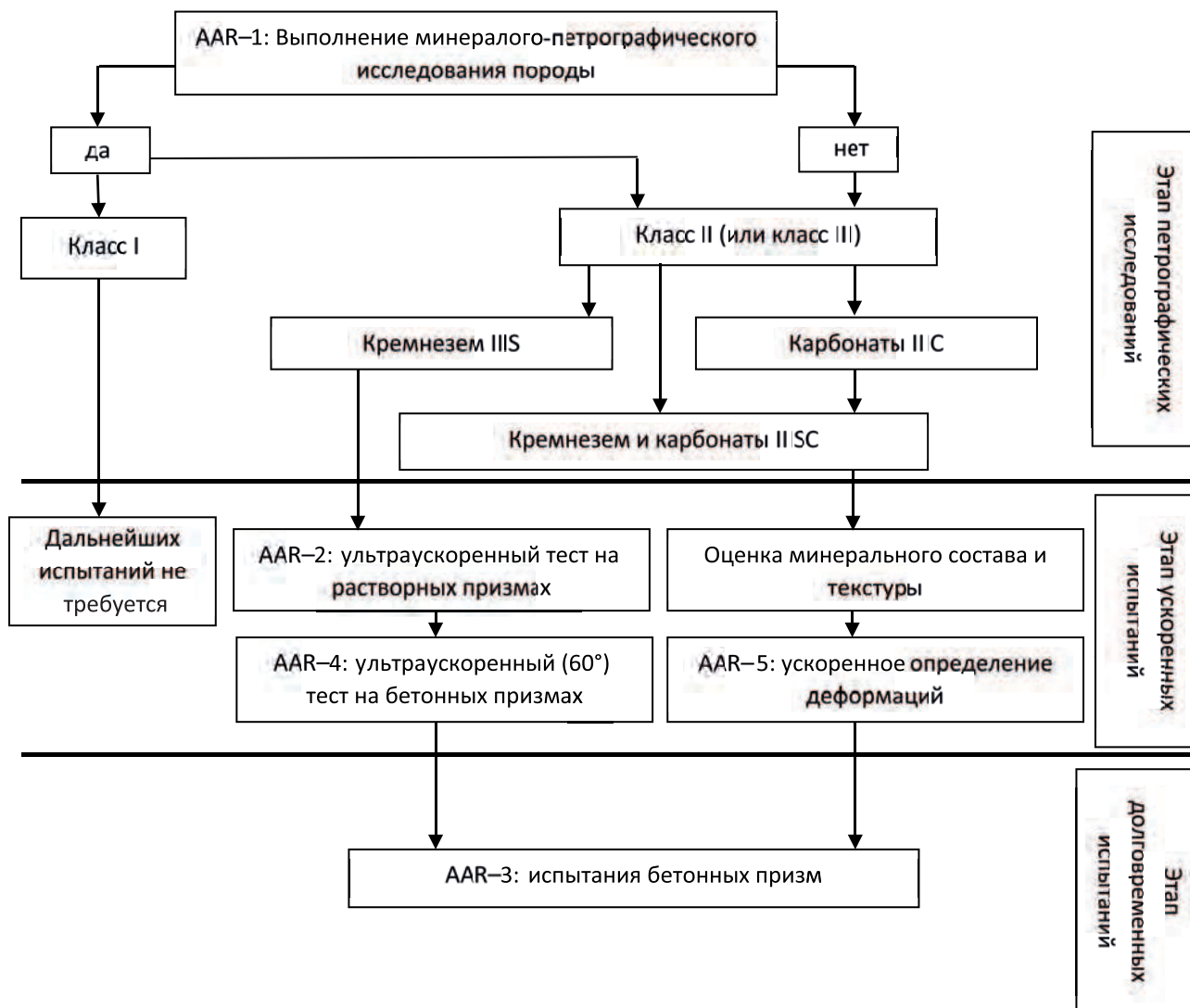


Рис. 1. Принципиальный алгоритм оценки реакционной способности по методам RILEM AAR  
 Fig. 1. Principal algorithm for evaluating reactivity according to RILEM AAR methods

Для оценки реакционной способности в ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» используются методы, близкие разрабатываемым RILEM для оценки реакционной способности кремнеземистых пород. При этом необходимо учитывать, что в методе ускоренного определения деформаций на растворных призмах по ГОСТ 8269.0–97 есть существенные отличия от процедуры по RILEM AAR–2. Согласно ГОСТ 8269.0–97 проводить измерения по определению изменения длины растворных призм следует не сразу после извлечения призм из раствора NaOH, а после остывания до температуры 20±5°C, но не менее чем через 4 ч. Это различие в определенной степени усложняет оценку результатов испытаний в силу того, что охлаждение образцов перед измерением снижает значения приращения деформаций, а одним из критериев при-

знания заполнителя нереакционноспособным является условие, что последний (одиннадцатый) результат испытания отличается от трех предшествующих результатов измерений не более чем на 15%.

Важно также отметить, что действующая редакция стандарта не устанавливает критериев и методов определения риска развития коррозии бетона при использовании реакционноспособных карбонатных заполнителей.

Необходимо подчеркнуть, что существующие в действующих национальных и международных стандартах [16] правила подхода к оценке реакционной способности заполнителя и методам ее определения в значительной степени основаны на работах технических комитетов RILEM TC 106–AAR, TC 258–AAA, TC 219–ACS, в том числе и нового комитета – ARM (RILEM Technical Committee 300–ARM: Alkali-aggregate reaction mitigation. <https://www.rilem.net/groupe/300-arm-alkali-aggregate-reaction-mitigation-424>).

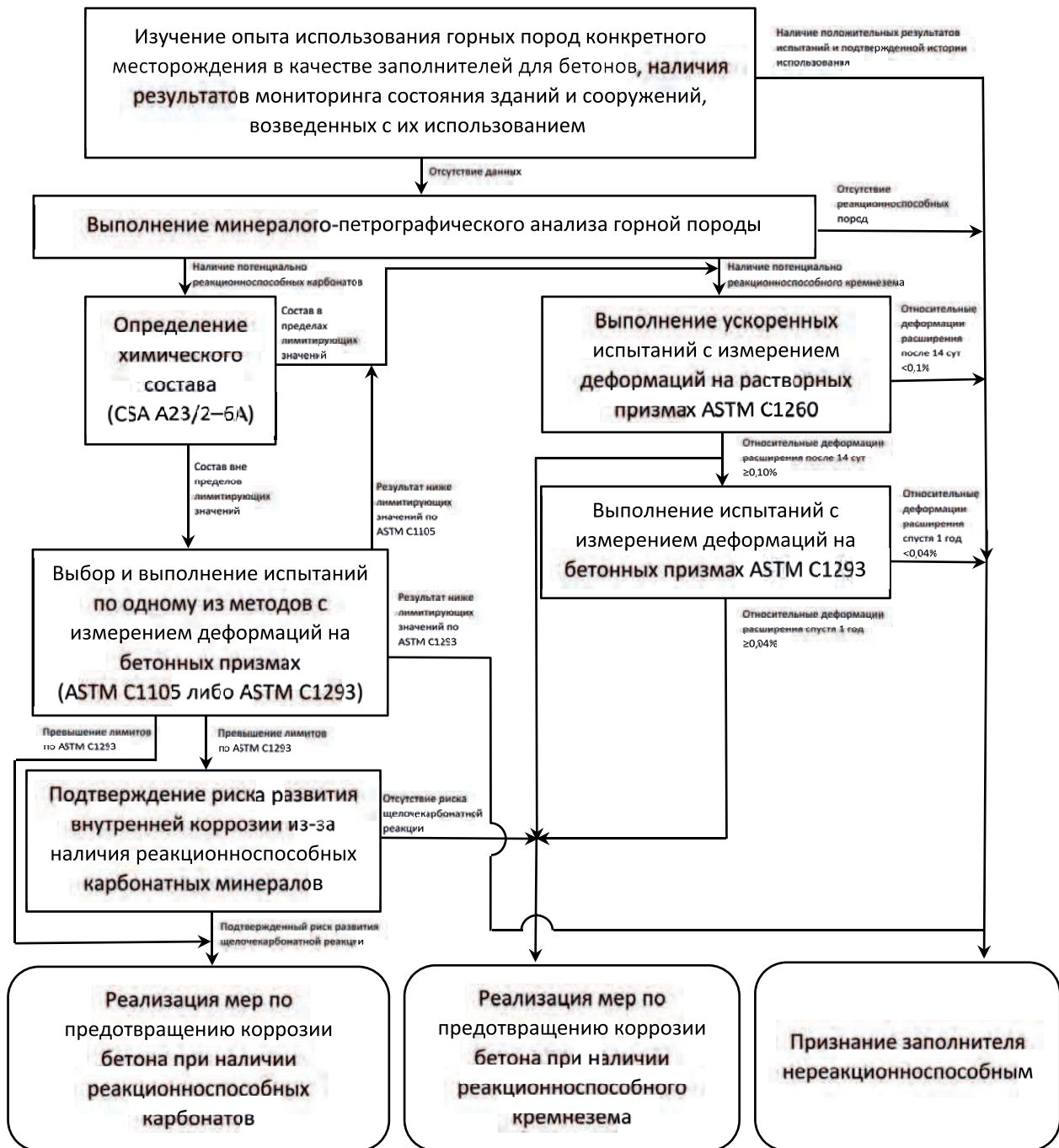


Рис. 2. Принципиальный алгоритм процедур ASTM по оценке реакционной способности заполнителя для бетонов (сплошными линиями показан рекомендованный путь выполнения шагов)

Fig. 2. The principle algorithm of ASTM procedures for assessing the reactivity of aggregates for concretes (solid lines show the recommended way of performing steps)

Принципиальный алгоритм предлагаемой RILEM процедуры оценки реакционной способности заполнителей и выбор методов испытаний в зависимости от минералого-петрографической характеристики породы представлены на рис. 1.

Весьма интересно сравнить подход к формулировке требований и методы испытаний в российской нормативной документации с зарубежными стандартами. Так, Американским обществом испытаний ма-

териалов ASTM развивается система комплексной оценки реакционной способности заполнителя и риска развития внутренней коррозии в бетоне, в целом схожая с предлагаемой RILEM (рис. 2).

Стандарты ASTM предусматривают испытания реакционноспособного заполнителя как с содержанием активного кремнезема, так и с содержанием карбонатных пород, способных реагировать со щелочами цемента. Не имеет прямого аналога

стандарт ASTM C586–19 (Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method), устанавливающий метод определения реакционной способности карбонатных пород по изменению длины кернов из горной породы, погруженных в раствор NaOH. Стандарт ASTM C1105–08a (Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction устанавливает метод испытания карбонатных пород в составах бетона путем оценки изменения длины бетонных призм в срок до 12 мес. Стандарты ASTM C1260–21 (Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM C1293–20a (Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction и ASTM C1567–21 (Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) являются адаптированными вариантами методов RILEM AAR–2 и AAR–3.

Важным для изучения представляется подход к нормированию методов оценки реакционной способности щебня, устанавливаемый Группой CSA (ранее – Канадская ассоциация стандартов; CSA), организацией по стандартизации, которая разрабатывает стандарты в 57 областях. В силу распространенности на территории Канады реакционноспособных карбонатных пород, в стандартах CSA присутствует развитый химический метод оценки реакционной способности – CSA A23.2–26A (Determination of Potential Alkali-Carbonate Reactivity of Quarried Carbonate Rocks by Chemical Composition). Этот стандарт рекомендуется для использования и ASTM. Кроме того, канадскими стандартами устанавливаются расширенные методы оценки влияния реакционной способности заполнителя на деформации бетонов (CSA A23.2–27A Standard Practice to Identify Degree of Alkali Aggregate Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete), а также методы оценки эффективности минеральных добавок и ингибиторов щелочной коррозии заполнителя для предотвращения риска развития внутренней коррозии бетонов (CSA A23.2–28A Standard Practice for Laboratory Testing to Demonstrate the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials and Lithium-Based Admixtures to Prevent Alkali-Silica Reaction in Concrete).

Довольно интересно отметить, что к настоящему времени Европейский комитет по стандартизации CEN не ввел в действие общий стандарт, прямо формулирующий методы испытаний для оценки реакционной способности заполнителя. Действующая редакция EN 12620:2002+A1:2008 (Aggregates for

Concrete) содержит ограниченный понятийный аппарат для нормирования требований в отношении внутренней коррозии бетона из-за наличия реакционно-способного заполнителя, не учитывая, например, щелочно-карбонатный вид коррозии. При необходимости оценки риска развития коррозии из-за наличия реакционноспособного кремнезема стандарт предписывает руководствоваться в этом отношении местными нормативными документами.

Еще одним чрезвычайно важным для анализа комплексом документов, по мнению авторов, являются стандарты и руководства, устанавливающие дифференцированную оценку заполнителей в зависимости от результатов определения их реакционной способности, а также формулирующие меры по предотвращению риска появления внутренней коррозии бетона при использовании потенциально реакционноспособных заполнителей.

В настоящее время введены в действие два подобных стандарта – стандарт Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог и транспортных средств (AASHTO R 80–17. Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction и стандарт ASTM C1778–20 (Standard guide for reducing the risk of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020). Стандарты основаны на рекомендациях (RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures: state-of-the-art report of the RILEM technical committee 219–ACS. Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5>), разработанных техническим комитетом RILEM TC 219–ACS, и различаются степенью адаптации под отраслевые нужды (дорожное и гражданское строительство соответственно).

Все три документа построены исходя из единых принципов:

- введение классификации заполнителей по реакционной способности в зависимости от результатов определения приращения относительных деформаций на растворных образцах в течение 14 сут или на бетонных образцах в течение 1 г.;

- введение классификации уровней риска развития внутренней коррозии в зависимости от класса заполнителя по реакционной способности и условий эксплуатации (с учетом прежде всего влажностного состояния и наличия агрессивного воздействия щелочей);

- введение классификации сооружений в зависимости от уровня ответственности, ориентировочного срока службы и доступности конструкций для инспекции и ремонта;

Таблица 1  
Table 1

**Классификация заполнителей по реакционной способности**  
**Classification of aggregates by reactivity**

Класс реакционной способности заполнителя	Описание реакционной способности заполнителя	Относительные деформации $\epsilon$ при испытаниях в течение 1 года по ASTM C1293, %	Относительные деформации $\epsilon$ при испытаниях в течение 14 сут по ASTM C1260, %
R0	нереакционноспособный	$\epsilon < 0,04$	$\epsilon < 0,10$
R1	средней	$0,04 \leq \epsilon < 0,12$	$0,10 \leq \epsilon < 0,30$
R2	высокой	$0,12 \leq \epsilon < 0,24$	$0,30 \leq \epsilon < 0,45$
R3	особо высокой	$\epsilon \geq 0,24$	$\epsilon \geq 0,45$

Таблица 2  
Table 2

**Классификация уровней риска развития внутренней коррозии бетона при использовании реакционноспособного заполнителя**  
**Classification of risk levels for the development of internal corrosion of concrete when using reactive aggregates**

Характеристика конструкции и условия эксплуатации	Класс реакционной способности заполнителя			
	R0	R1	R2	R3
Бетон для немассивных <sup>1</sup> конструкций в сухих <sup>2</sup> условиях	Уровень 1	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Бетон для массивных <sup>1</sup> конструкций в сухих <sup>2</sup> условиях	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Все бетоны для конструкций во влажных условиях, ниже уровня земли либо под водой	Уровень 1	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
Все бетоны, при эксплуатации подвергающиеся воздействию щелочей <sup>3</sup>	Уровень 1	Уровень 4	Уровень 5	Уровень 6

**Примечания:** <sup>1</sup> Массивная конструкция имеет как минимум один из размеров, превышающий 0,9 м. <sup>2</sup> Сухие условия соответствуют средней относительной влажности менее 60%. <sup>3</sup> Примерами конструкций, подвергающихся при эксплуатации интенсивному воздействию щелочей, могут служить морские сооружения и дорожные покрытия, обрабатываемые противогололедными реагентами (такими, как ацетат калия, формиат натрия и т. д.).

– формулировка требований к суммарному содержанию щелочей в составе бетона в зависимости от необходимого уровня превентивных мер по минимизации рисков развития внутренней коррозии бетона;

– формулировка рекомендаций по использованию минеральных добавок для минимизации рисков развития внутренней коррозии бетона, при необходимости – с одновременным ограничением суммарного содержания щелочей в составе бетона.

Далее приведена краткая основная информация по вводимой классификации и требованиям к реализации необходимого уровня превентивных защитных мер на примере ASTM C1778–20.

В табл. 1–3 приведена классификация заполнителей по степени их реакционной способности, классификация уровней риска в зависимости от используемого заполнителя и классификация сооружений по степени ответственности.

В табл. 4 в зависимости от уровня риска (табл. 2) и класса ответственности сооружений (табл. 3) выделена классификация шести уровней необходимых

превентивных мер для минимизации риска развития внутренней коррозии, а в табл. 5 для каждого уровня приведены максимальные предписывающие значения по суммарному содержанию щелочей в составе бетона.

В табл. 6 приведены рекомендации по использованию минеральных добавок в качестве замены части цемента для обеспечения требуемого уровня превентивных мер (за исключением минимального уровня защиты V).

В табл. 7 приведены указания по корректировке расходов минеральных добавок в зависимости от содержания щелочей в цементе (%Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>).

В табл. 8 формулируются рекомендации по обеспечению максимальных уровней превентивных мер защиты при одновременном использовании активных минеральных добавок и ограничении содержания щелочей в бетоне.

Развитие российской нормативной базы в области методов оценки реакционной способности заполнителей для бетонов, а также требований к обеспечению надлежащей долговечности бето-

Таблица 3  
Table 3

**Классификация сооружений в зависимости от угрозы последствий развития внутренней коррозии бетона при использовании реакционноспособного заполнителя**  
**Classification of structures depending on the threat of the consequences of the development of internal corrosion of concrete when using reactive aggregate**

Класс	Последствия развития внутренней коррозии бетона в сооружениях	Допустимость угрозы развития коррозии	Примеры
SC1	Последствия для безопасности, экономики или окружающей среды отсутствуют либо незначительны	Допустимо некоторое повреждение конструкций	Ненесущие конструкции внутри зданий. Конструкции в сухой среде. Временные сооружения (срок службы до 5 лет)
SC2	Возможны определенные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды при серьезных повреждениях	Допустим средний риск	Тротуары, бордюры и водосточные желоба. Сооружения со сроком службы до 40 лет
SC3	Существенные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды при сравнительно малых повреждениях конструкций	Допустим минимальный риск	Тротуары, конструкции фундамента, подпорные стены, водосточные трубы, сельские дороги с малой интенсивностью, сборные ЖБК. Срок службы обычно от 40 до 74 лет
SC4	Значительные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды даже при малых повреждениях конструкций	Риск недопустим	Критические элементы инфраструктуры: мосты, электростанции, плотины, объекты использования атомной энергии, водопровод и водоочистные сооружения, туннели. Малодоступные (скрытые) конструкции. Срок службы обычно превышает 75 лет

Таблица 4  
Table 4

**Оценка уровня превентивных мер**  
**Assessment of the level of preventive measures**

Уровень риска <sup>1</sup>	Классификация сооружения <sup>2</sup>			
	SC1	SC2	SC3	SC4
1	V	V	V	V
2	V	V	W	X
3	V	W	X	Y
4	W	X	Y	Z
5	X	Y	Z	ZZ
6	Y	Z	ZZ	*

**Примечания:** <sup>1</sup> таблица 2; <sup>2</sup> таблица 3; \* недопустимый уровень риска, обязательно планирование компенсирующих мероприятий.

Таблица 5  
Table 5

**Максимальное содержание щелочей для обеспечения требуемого уровня превентивных мер**  
**Maximum alkali content to ensure the required level of preventive measures**

	Уровень превентивных мер					
	V	W	X	Y	Z	ZZ
Максимальное содержание щелочей в бетоне, кг/м <sup>3</sup>	Не ограничено	3	2,4	1,8	Использование активных минеральных добавок	



Таблица 6  
Table 6

**Минимальные расходы минеральных добавок для обеспечения надлежащего уровня  
превентивных мер  
Minimum consumption of mineral supplements to ensure an adequate level  
of preventive measures**

Вид минеральной добавки <sup>1</sup>	Содержание щелочей в добавке, % Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Минимальная доля замены цемента <sup>4</sup> , мас. %				
		W	X	Y	Z	ZZ
Золы-уноса <sup>2</sup> (CaO≤18%)	<3	15	20	25	35	см. табл. 8
	3–4	20	25	30	40	
Гранулированный доменный шлак	<1	25	35	50	65	
Микрокремнезем <sup>3</sup> (SiO <sub>2</sub> >85%)	<1	2·KGA	2,5·KGA	3·KGA	4·KGA	

**Примечания:** <sup>1</sup> минеральные добавки могут вводиться как самостоятельно, так и в составе смешанных вяжущих; <sup>2</sup> золы-уноса с содержанием CaO более 18% могут снижать вероятность реакции «щелочь – кремниевая кислота»; <sup>3</sup> минимальный расход МК (как доли в составе смешанного вяжущего) рассчитывается в зависимости от содержания щелочей в бетоне KGA, кг/м<sup>3</sup>, но вне зависимости от результата расчета он не должен составлять менее 7% мас., если введение МК является единственной превентивной мерой; <sup>4</sup> следует учитывать, что использование значительной доли минеральных добавок может служить фактором риска, если оно сопровождается увеличением проницаемости бетона (к примеру, это может приводить к интенсификации миграции щелочей в дорожном покрытии при обработке противогололедными составами).

Таблица 7  
Table 7

**Регулирование дозировки минеральной добавки в зависимости от уровня  
содержания щелочей в портландцементе  
Regulation of the dosage of the mineral additive depending  
on the level of alkali content in Portland cement**

Содержание щелочей в цементе (% Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	Расход минеральной добавки
<0,7	Снижение минимального расхода на одну ступень по табл. 6
0,7–1	Использование указанного минимального расхода по табл. 6
1–1,25	Увеличение минимального расхода на одну ступень по табл. 6
>1,25	Без указаний

**Примечание.** Вне зависимости от содержания щелочей в цементе дозировка минеральных добавок не должна быть менее значений, указанных в табл. 6 для уровня W.

Таблица 8  
Table 8

**Использование минеральных добавок и ограничение содержания щелочей в бетоне  
для обеспечения максимальных уровней превентивных мер  
Use of mineral admixtures and limiting alkali content in concrete to ensure maximum levels  
of preventive measures**

Уровень превентивных мер	Минимальный расход минеральной добавки (при использовании как единственной меры)	Комбинация введения минеральных добавок и ограничения содержания щелочей	
		Максимальное содержание щелочей, кг/м <sup>3</sup>	Минимальный расход добавок
Z	Значение для уровня Z по табл. 6	1,8	Значение для уровня Y по табл. 6
ZZ	Недопустимо	1,8	Значение для уровня Z по табл. 6

нов, вероятнее всего, будет связано с имплементацией в существующие стандарты многих положений из вышеупомянутых документов. Очевидно, что это должно подразумевать и проведение комплекса научно-исследовательских работ по соот-

несению устанавливаемых положений с нормами отечественной практики. Требования экономики и необходимость следования принципам устойчивого развития в строительстве делают эту работу необходимой [17].

## Список литературы / References

1. Розенталь Н.К., Любарская Г.В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя // *Бетон и железобетон*. 2012. Т. 1. №. 6. С. 50–60.
1. Rozental' N.K., Lyubarskaya G.V. Corrosion of concrete by alkali interaction with silica in aggregate. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2012. Т. 1. №. 6. pp. 50–60. (In Russian).
2. Петрова Т.М., Сорвачева Ю.А. Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства // *Наука и транспорт. Транспортное строительство*. 2012. Т. 4. С. 56–60.
2. Petrova T.M., Sorvacheva Yu.A. Internal corrosion of concrete as a factor of the durability decreasing of transport construction objects. *Nauka i transport. Transportnoe stroitel'stvo*. 2012. Vol. 4, pp. 56–60. (In Russian).
3. Stanton T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1942. Vol. 107. Iss. 1. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005540>
4. Bogue R.H. The chemistry of Portland cement. New York: Reinhold Publishing Corporation. 1947. 572 p.
5. Kühl H. Zement-Chemie. В. 1–3. Berlin: Verlag Technik GmbH. 1951. 306 p.
6. Sims I., Poole A.B. (ed.). Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review. CRC Press. 2017. 767 p. <https://doi.org/10.2991/978-94-6239-157-4-25>
7. Reschke T. Untersuchungen und Instandsetzung von wasserbauwerken, die infolge einer alkali-kieselsäure reaktion geschädigt sind. *Beton*. 2004. Vol. 54. No. 1, pp. 14–21.
8. Stark J., Freyburg E., Seyfarth K., Giebson C., Erfurt D. 70 Jahre AKR und keine Ende in Sicht? *International Baustofftagung IBAUSIL*. Weimar. 2009. Tagungsbericht Band 2, pp. 255–260.
9. Blight G.E., Alexander M.G. Alkali-aggregate reaction and structural damage to concrete: engineering assessment, repair and management. CRC Press. 2011. <https://doi.org/10.1201/b10773>
10. Thomas M.D.A. et al. Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book. United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology, 2013. №. FHWA-HIF-13-019. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif13019.pdf>
11. Fernandes I. et al. (ed.). Petrographic atlas: characterisation of aggregates regarding potential reactivity to alkalis: RILEM TC 219–ACS recommended guidance AAR–1.2, for use with the RILEM AAR–1.1 petrographic examination method. Springer, 2016. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7383-6>.
12. Москвин В.М., Рояк Г.С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя. М.: Госстройиздат, 1962. 164 с.
12. Moskvina V.M., Royak G.S. Korroziya betona pri deistvii shchelochey tsementa na kremnezem zapolnitelya [Corrosion of concrete under interaction of cement alkalis and the aggregate active silica] Moscow: Gosstroyizdat. 1962. 164 p.
13. Falikman V.R., Rozentahl N.K. Russian Federation. In “Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review” (ed. by Sims I., Poole A. B.). CRC Press. 2017, pp. 433–466.
14. Золотых Е.Б. Типизация потенциально-реакционно-способных минералов месторождений нерудных строительных материалов. *Научно-технический отчет ВНИИПИСтромсырье*. М. 1990. 90 с.
14. Zolotykh E.B. Typification of potentially reactive minerals from non-metallic building material deposits. Scientific and technical report. *VNIIPiStromsyrye*. Moscow. 1990. 90 p.
15. Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Матеюнас А.И., Захарова Н.А., Акимова Э.П. Проблема щелочной коррозии бетонов в Республике Татарстан и пути ее решения // *Известия КГАСУ*. 2005. № 2. С. 58–63.
15. Morozova N.N., Khozin V.G., Mateyunas A.I., Zakharova N.A., Akimova E.P. Problem of alkali corrosion of concretes in the Republic of Tatarstan and the ways of its handling. *Izvestiya KGASU*. 2005. No. 2, pp. 58–63.
16. Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Обзор подходов к нормированию показателей качества крупного заполнителя в зарубежных стандартах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 4. С. 64–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73
16. Falikman V.R., Sirotin P.N. Review of approaches to standardization of coarse aggregate quality in foreign standards. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 4, pp. 64–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73
17. Фаликман В.Р. GLOBE – новая инициатива профильных международных организаций в области устойчивого строительства. *Бетон и железобетон*. 2020. № 2 (602). С. 3–7.
17. Falikman V.R. GLOBE as a new initiative in the field of sustainable construction by specialized international organizations. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2020. No. 2 (602), pp. 3–7. (In Russian).

Р.О. РЕЗАЕВ<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук (rezaev.roman@gmail.com);  
А.А. ДМИТРИЕВ<sup>2</sup>, инженер; Д.В. ЧЕРНЯВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук

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

<sup>2</sup> Томский политехнический университет (634050, Томск, пр. Ленина, 30)

## Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Часть I (Теория)

В цикле из двух статей обсуждается концепция построения вероятностных моделей свойств бетонных смесей и бетона в пространстве возможных составов на заданных материалах. В первой части статьи вводятся понятия: математического пространства составов с демонстрацией примеров его построения для бетонных смесей различного назначения, длина корреляции свойств составов и количественная мера близости составов, позволяющая постулировать непрерывность их свойств. На основе методов байесовской статистики и машинного обучения предлагаются способы эффективного использования для построения вероятностных моделей априорной информации о свойствах сырьевых материалов, накопленных статистических данных по свойствам бетонных смесей/бетонов, выраженных в виде различных эмпирических зависимостей и физико-химических моделей. Представленный в статье алгоритм позволяет создавать экономичные экспериментальные планы для построения многомерной поверхности отклика в пространстве возможных составов. Дальнейшая работа с полученной поверхностью отклика может осуществляться различными методами, например путем изучения срезов по интересующим координатным осям в произвольных плоскостях или направлениях.

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

**Для цитирования:** Резаев Р.О., Дмитриев А.А., Чернявский Д.В. Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав–свойство». Часть I (Теория) // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-25-37>

R.O. REZAEV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) (rezaev.roman@gmail.com);  
A.A. DMITRIEV<sup>2</sup>, Engineer; D.V. CHERNYAVSKY<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)  
<sup>1</sup> IFW Institute for Theoretical Solid State Physics (Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany)  
<sup>2</sup> Tomsk Polytechnic University (30, Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation)

### Application of Probabilistic Approaches for the Construction of "Composition–Property" Models. Part I (Theory)

In a series of two articles, the concept of constructing probabilistic models of the properties of concrete mixtures and concrete in the space of possible compositions on given materials is discussed. In the first part of the article, the following concepts are introduced: the mathematical space of compositions with demonstration of examples of its construction for concrete mixtures for various purposes, the length of the correlation of composition properties, and a quantitative measure of the proximity of compositions, which makes it possible to postulate the continuity of their properties. Based on the methods of Bayesian statistics and machine learning, methods are proposed for the effective use of a priori information on the properties of raw materials, accumulated statistical data on the properties of concrete mixes/concrete, expressed in the form of various empirical dependencies and physicochemical models, for constructing probabilistic models. The algorithm presented in the article makes it possible to create economical experimental plans for constructing a multidimensional response surface in the space of possible compositions. Further work with the obtained response surface can be carried out by various methods, for example, by studying slices along the coordinate axes of interest in arbitrary planes or directions.

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

**For citation:** Rezaev R.O., Dmitriev A.A., Chernyavsky D.V. Application of probabilistic approaches for the construction of "composition–property" models. Part I (Theory). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 25–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-25-37>

При фиксированных протоколах приготовления бетонной смеси, сырьевых материалов, условиях твердения бетона, методиках испытания соответствующие свойства бетона/смеси будут однозначно определяться своим *составом* – соотношениями объемных долей входящих в смесь компонентов – фракциями заполнителей, цементом, водой, микро-

наполнителями и т. д. Обусловленная практикой необходимость поиска состава, обеспечивающего заданный комплекс свойств, или его условная оптимизация по критерию себестоимости, срокам набора прочности, подвижности смеси и т. д. неизбежно актуализирует проблему прогнозирования свойств бетона/смеси для произвольного состава, выбран-

ного из множества потенциально реализуемых на заданных сырьевых материалах. Степень сложности этой проблемы определяется комбинаторным характером выбора конкретного состава из всех возможных вариантов и, как правило, имеет экспоненциальный рост с увеличением количества компонентов смеси. Например, если рассматривать смеси бетона товарного назначения на стандартных материалах (ГОСТ 25192–2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования»; ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия»; ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия») с диапазоном их расхода на  $1 \text{ м}^3$  смеси, указанным в скобках, – щебень (от 900 до  $1300 \text{ кг/м}^3$ ), песок (от 650 до  $900 \text{ кг/м}^3$ ), цемент (от 200 до  $500 \text{ кг/м}^3$ ) и вода (от 170 до  $220 \text{ кг/м}^3$ ), то с шагом варьирования количества материала в смеси  $10 \text{ кг/м}^3$  мы получим 150000 возможных вариантов составов. Добавление в смесь, например, шлака с расходом из диапазона от 0 до  $150 \text{ кг/м}^3$  с прежним шагом варьирования увеличит количество возможных составов до 2250000. Цифры ориентировочные и допускают дискуссию по поводу выбора диапазона расхода материалов или шага варьирования, однако суть проблемы данный пример иллюстрирует в полной мере.

К решению проблемы прогнозирования свойств бетона/смеси можно подойти с различных сторон. Фундаментальный аналитический подход подразумевает, во-первых, всесторонний анализ свойств исходных материалов из какого-то класса, используемого для бетонной смеси, с последующим выделением из них наиболее важных для формирования интересующего целевого свойства бетона/смеси [1–11] (например, модуль крупности песка, форма частиц крупного заполнителя, гранулометрический состав сыпучих компонентов и т. д.). Во-вторых, в отдельную задачу можно выделить поиск различных безразмерных параметров, от которых зависит целевое свойство. Примером безразмерного параметра, имеющего доминирующий вклад в формирование прочности бетона товарного назначения, является водоцементное отношение В/Ц. Практическим выходом работы в данном направлении являются различные эмпирические закономерности [6], связывающие целевые свойства бетона/смеси с совокупностью релевантных параметров и характеристик сырьевых компонентов. Для каждого коэффициента, входящего в эмпирическую зависимость, определяется область его допустимых значений с соответствующими рекомендациями их выбора в зависимости от используемых материалов, как, например, в случае уравнения Болемея – Скрамтаева, в которое в явном виде входит В/Ц и несколько коэффициентов, зависящих от качества сырьевых ком-

понентов и активности цемента. Сильной стороной аналитического подхода является получение результатов независимых от специфики конкретных материалов в рамках некоторого класса, что особенно важно при разработке различных отраслевых стандартов, технических условий и рекомендаций для обоснования технологических решений. Эмпирические закономерности хорошо подходят для определения направления или стратегии, которую нужно использовать для достижения желаемых свойств бетона/смеси, однако при решении конкретных проблем оптимизации или поиска конкретного состава, согласно его определению в начале текста – количественное соотношение заданных материалов, – такого рода подходы, используемые в качестве моделей прогнозирования свойств, могут упустить важные каналы управления свойствами бетона. В целях примера воспользуемся вышеприведенной ссылкой на линейную связь прочности бетона товарного назначения с фактором В/Ц. Если ограничиться только этой зависимостью и пренебречь всеми оставшимися вкладами в прочность, то это приведет к потере как минимум 10–20% канала оптимизации прочности за счет варьирования [2, 5, 6] соотношения между мелким (П, песок) и крупным (Щ, щебень/гравий) заполнителями  $r = П / (П + Щ)$ . При этом чем шире область применения какой-либо конкретной эмпирической закономерности, тем больше неопределенность в выборе численных значений коэффициентов, входящих в данную закономерность, и тем больше неопределенность в прогнозных значениях свойств. Один из надежных способов определения коэффициентов эмпирической зависимости – непосредственная минимизация среднеквадратического отклонения прогнозных значений от фактических, полученных из экспериментальных данных. Последние, однако, как это часто оказывается на практике, можно аппроксимировать более точно, если заменить выбранную эмпирическую закономерность какой-либо другой функцией [12], справедливой в частном случае и учитывающей неявно специфику используемых конкретных материалов.

Формализация подобных сугубо утилитарных ad hoc подходов к построению прогнозных моделей свойств физической/технической системы на основании только выборки экспериментальных данных привела к развитию методов суррогатного моделирования [13], математического планирования экспериментов [14], регрессионного анализа и других подобных направлений [15]. В контексте оптимизации состава бетонных смесей данные методы широко известны и активно применяются, например для выявления корреляционных зависимостей между различными факторами и целевыми

свойствами [16–18]. Главное отличие этой группы методов от аналитического построения моделей состоит в том, что искомая модель свойства может быть построена, во-первых, всегда, а во-вторых, для любого набора материалов бетонной смеси без проведения предварительного их анализа. Для этих целей составляется матрица планирования факторных экспериментов, позволяющая выявить степень влияния того или иного фактора (или материала) на заданное свойство. Бетонная смесь/бетон и используемые материалы представляются как черный ящик, их внутренним устройством при таком подходе не интересуются и для описания функции отклика между входом (факторы, расходы материалов) и выходом (свойства бетона) часто пользуются полиномиальными закономерностями первого, второго и третьего порядков, что обеспечивает достаточное количество степеней свободы для аппроксимации большинства наблюдаемых экспериментальных данных в бетонных смесях/бетонах с высокой точностью, как правило, выше, чем при использовании обобщенных эмпирических зависимостей. Однако при всех положительных сторонах данной группы методов существуют и серьезные их недостатки, сужающие область практического применения. Суррогатные модели имеют слабую обобщающую способность – построенные на каком-то одном наборе конкретных материалов зависимости нельзя применять к другим материалам, даже если они близки по своим свойствам к первоначальным. Эта проблема уходит своими корнями в исследование вопросов об устойчивости моделей по своим коэффициентам [19], и если в случае линейных откликов построенные модели устойчивы, то для квадратичных и более высокого порядка зависимостей, обладающих более высокой точностью по сравнению с линейными моделями, говорить об устойчивости в общем случае нельзя: какое-либо незначительное отклонение в значении коэффициентов, вызванное вариацией исходных экспериментальных данных или сменой материалов, может привести к изменению канонического вида поверхности отклика [20]. Потенциальное решение данной проблемы может лежать во введении дополнительного условия на устойчивость при определении коэффициентов поверхности отклика, однако это приводит к усложнению методов и повышает их трудоемкость. Последнее является в целом отличительной особенностью методов суррогатного моделирования. Для построения многофакторной модели необходимо большое количество экспериментальных данных, причем это количество, как уже указывалось ранее, имеет экспоненциальный характер сложности – добавление в модель даже одного фактора сразу на порядок уве-

личивает количество необходимых для построения модели экспериментальных точек. Таким образом, можно утверждать, что решение задачи прогнозирования свойств состава с достаточной для практических целей точностью по заданному расходу материалов без излишней трудоемкости и необходимости глубокого анализа используемых материалов на сегодняшний день по-прежнему актуально.

Общей для практики применения как эмпирических зависимостей, так и суррогатных моделей (поверхностей отклика) является проблема учета коэффициента вариации экспериментальных данных, по которым была построена модель. Накопленный научным и производственным сообществом экспериментальный опыт работы с бетонными смесями/бетоном указывает на необходимость явного учета специфики случайных процессов при построении моделей прогнозирования. Это фундаментальная проблема, поскольку бетонная смесь представляет собой открытую неравновесную систему, сопряженную с неполнотой информации о ее свойствах, свойствах составляющих ее ингредиентов, а также процессов, формирующих ее реакцию на внешние воздействия. Такие условия и факторы выводят на первый план вероятностный характер всей совокупности рабочей информации, как входной, так и прогнозной, актуализируя проблему разработки методов вероятностного моделирования [21] и количественной оценки меры неопределенности прогнозных данных о свойствах бетонных смесей/бетона. Решению этой проблемы благоприятствуют современные тенденции развития [22] методов машинного обучения, анализа данных и т. д. В частности, в настоящее время наблюдается тектонический сдвиг вычислительных возможностей, обусловленный потребностью решения широкого класса задач в области прогнозирования и оптимизации в совершенно различных областях, от прогнозирования ставок котировок на торгах на различных биржах [23] до автоматической постановки диагноза больного пациента по рентгенографическим снимкам [24]. Ряд перспективных концепций и идей в области анализа данных, ранее труднореализуемых на практике, таких как, например, байесовская статистика и оптимизация [25], стали доступными для повсеместного использования на персональном компьютере. С учетом развития новых вычислительных подходов решение задачи прогнозирования свойств составов бетона по заданному количественному соотношению входящих компонентов обретает новые перспективы. Например, для описания множества всех составов бетонной смеси, состоящей из щебня/гравия, песка, цемента, микронаполнителя и некоторого набора химических добавок без учета воз-

духововлечения потребуется четыре независимые координаты. Если пытаться построить поверхность отклика в таком координатном пространстве классическими методами математического планирования, то потребуется существенно более 50 экспериментальных точек, в то время как вовлечение априорной информации даже о качественном характере потенциальной зависимости искомого свойства от различных параметров в контексте байесовской статистики позволит получить поверхность отклика на базе экспериментального плана из 10–15 точек. Отметим при этом, что какой-либо эмпирической модели для интересующего свойства может и не быть вовсе и альтернатива байесовской статистике – это последовательный перебор экспериментальных точек, что сопряжено со значительными временными и трудовыми затратами.

Целью настоящей работы является описание общей концепции и результатов построения прогнозной модели «состав–свойство», позволяющей получать количественную оценку свойств бетонной смеси/бетона исходя из соотношения между используемыми сырьевыми материалами. Параметры прогнозной модели калибруются по информации о типовых характеристиках используемых материалов: гранулометрический состав, истинные/насыпные плотности и т. д. и по результатам специального экспериментального плана, позволяющего оценить корреляции между значениями свойств различных составов. Построенная прогнозная модель представляет интерес как с практической стороны, поскольку позволяет быстро решить задачу оптимизации состава бетона по комплексу свойств или найти состав с заданными свойствами, так и с фундаментальной, предлагая новые инструменты для тестирования на правдоподобность физико-химических гипотез о вкладе различных факторов в интересующее свойство. Предлагаемая к обсуждению концепция решает проблемы неоднозначного описания поверхности отклика различными аналитическими функциями и устойчивости модели с помощью введения вероятностного пространства допустимых значений прогнозных свойств бетонной смеси/бетона, что позволяет в некотором смысле обобщать результаты, полученные на одном классе материалов, на более широкие классы. Практическое использование представленных методов раскрыто во второй части статьи, где, в частности, продемонстрированы результаты построения прогнозной модели прочности, осадки конуса на примере бетонных смесей товарного назначения на стандартных материалах (ГОСТ 25192–2012; ГОСТ 7473–2010; ГОСТ 26633–2015), а также возможности для оптимизации содержания активной минеральной добавки на примере золы-уноса [26–28]. Заключение, пред-

ставленное во второй части статьи, завершается обсуждением перспектив развития методов построения прогнозных моделей для решений практических и фундаментальных задач.

### Метод построения прогнозных моделей «состав–свойство» для бетонных смесей Формализация

Во введении было определено, что состав – это соотношение входящих в смесь компонентов П/Щ/Ц/П:Ц/В= $x:y:z$  при фиксированных свойствах материалов и, отталкиваясь от этого определения, можно описать математический формализм для множества составов относительно переменных  $(x, y, z)$ , дополнив их условием нормировки расходов материалов на единицу объема смеси. Однако это представление неудобно для включения в модель поправок на возмущение или построения моделей для бетонных смесей с низким содержанием цементного теста, когда его может быть недостаточно для заполнения межзерновых пустот заполнителей. Более наглядным и удобным в этой связи будет использование в качестве определения состава напрямую расхода материалов на единицу объема смеси. Совокупность всех возможных на заданных материалах составов  $\{m\}$  образует некоторое математическое множество  $M$ , практическая польза от введения которого будет в том случае, если все его элементы спроецировать/отобразить взаимнооднозначным образом на какое-либо подмножество хорошо изученного в математическом смысле пространства. Наиболее привлекательным для построения моделей является  $n$ -мерное евклидово пространство, размерность которого будет кодировать количество независимо изменяемых компонентов. Покажем на конкретном примере четырехкомпонентной бетонной смеси – Щ (щебень/гравий), П (песок), Ц (цемент), В (вода) – как можно определить взаимнооднозначное соответствие между трехмерным евклидовым пространством и всеми составами, возможными на данных материалах. Рассмотрим сперва случай смесей тяжелого бетона без учета воздухововлечения:

$$\frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{Щ}}^n} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}^n} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}^n} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}}^n} = 1, [\text{м}^3] \quad (1)$$

где  $\rho$  с соответствующими индексами задает истинные плотности вещества. Условие нормировки (1) на единицу объема смеси оставляет возможным независимое варьирование трех компонент и взаимнооднозначное соответствие между точками пространства (Щ, П, Ц) и каждым составом естественным образом определяется, как показано на рис. 1.

Следующий случай аналогичный первому, но с учетом воздухововлечения. Будем различать два

варианта – неконтролируемое (случайное) и контролируемое (управляемое) воздухововлечение [10, 11]. В первом варианте мы имеем дело с негативным явлением, когда технолог должен прилагать усилия для уменьшения объемной доли воздухововлечения до диапазона от 0 до 3%. Цель усилий состоит в том, чтобы достичь состояния смеси, описываемого точкой из предыдущего рассмотренного случая см. уравнение (1). Следовательно, по-прежнему имеется возможность использовать для описания составов пространство (Щ, П, Ц) (рис. 1), однако теперь с каждой его точкой будет ассоциироваться небольшая случайная компонента  $\delta\varepsilon$ :  $m \sim m_0 + \delta\varepsilon$ , где  $m_0$  – это целевой состав с нулевым содержанием воздуха, т. е. состав, который технолог стремится достичь. «Шумовая» компонента  $\delta\varepsilon$  будет постоянно отклонять целевой состав, который подразумевается исходя из уравнения (1), в какой-то другой состав, реально неизвестный, однако, в силу малости  $\delta\varepsilon$ , находящийся в пространстве (Щ, П, Ц) близко к целевому, и, следовательно, логично предположить, что свойства этих составов будут не сильно отличаться друг от друга. Отметим, что уже на этом этапе формализации мы можем наметить контуры для исследования таких важных с практической точки зрения вопросов, как анализ влияния на свойства бетона различных факторов неопределенности, случайных отклонений в параметрах технологического процесса и т. д. В зарубежной литературе это направление оформилось в виде так называемого *uncertainty quantification*, и достаточно широко применяется в задачах материаловедения [29], в частности, в монографии [30] дается систематическое изложение применения методов стохастического анализа, в том числе в контексте исследований прочностных свойств бетона.

Контролируемое воздухововлечение предполагает объемное содержание воздушных пор в смеси на уровне, которым уже нельзя пренебречь в уравнении абсолютных объемов, и необходимо вводить дополнительный член, связанный с объемом воздуха:

$$\frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{Щ}}^n} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}^n} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}^n} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}}} + V_{\text{возд}} = 1, \text{ м}^3 \quad (2)$$

В соответствии с вышеприведенной логикой для описания множества составов, описываемых уравнением (2), потребуется четырехмерное пространство – (Щ, П, Ц), и (В или  $V_{\text{возд}}$ ), четвертую координату можно выбрать в виде объемной доли либо воды, либо воздуха. Таким образом, можно построить взаимно однозначное соответствие между точками этого пространства и составами с контролируемым воздухововлечением.

Крупнопористый (тощий) бетон является примером группы составов, когда объема цементного теста

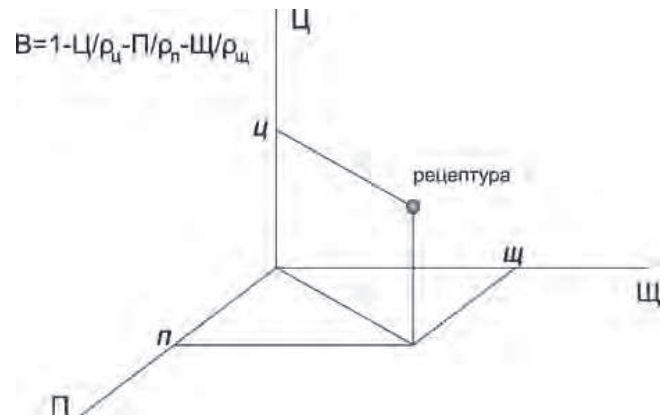


Рис. 1. Пространство для определения множества составов:  $\rho$  – истинная плотность вещества

Fig. 1. Space for determining the set of compositions,  $\rho$  is the true density of matter

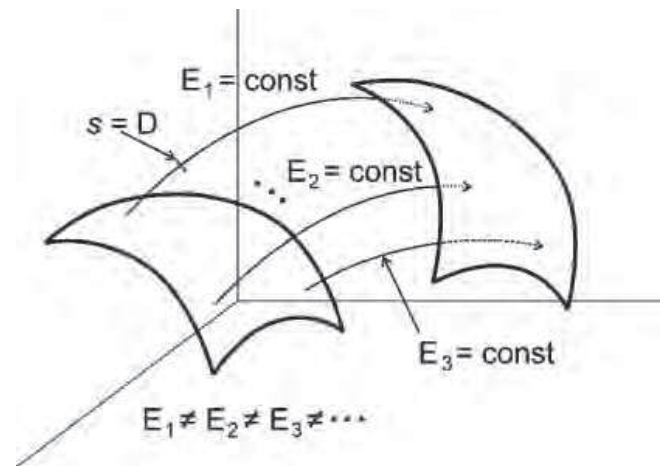


Рис. 2. Схема отображения поверхности отклика под действием фактора добавки:  $s$  – длина траектории;  $D$  – содержание добавки;  $E$  – значение свойства

Fig. 2. Scheme of displaying the response surface under the action of the additive factor:  $s$  – is the length of the trajectory;  $D$  – is the content of the additive;  $E$  – is the value of the property

может быть недостаточно для заполнения межзерновых пустот заполнителей [1]. В этом случае для определения пространства составов расходы материалов удобно нормировать на суммарный объем твердой+жидкой фазы:

$$\alpha = \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{Щ}}^n V_{\text{ТВ+Ж}}}; \beta = \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}^n V_{\text{ТВ+Ж}}}; \gamma = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}^n V_{\text{ТВ+Ж}}}; \delta = \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}} V_{\text{ТВ+Ж}}}; \quad (3)$$

$$V_{\text{ТВ+Ж}} = \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{Щ}}^n} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{П}}^n} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}^n} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{В}}}. \quad (4)$$

Таким образом, и в этом случае имеется возможность построения математического пространства составов. Одним из наиболее важных для построения и анализа математических моделей «состав–свойство» следствий отображения множества составов на евклидово пространство является возможность определить количественную меру «близости» составов.

акой мерой можно считать в соответствии с геометрической интуицией отрезок, соединяющий любые две точки в пространстве составов. Введение такого понятия позволяет *обоснованно* использовать на абстрактном пространстве составов различные инструменты, методы и концепции, развитые в математическом анализе, математической физике, теории динамических систем и т. д. В этом случае модель какого-либо свойства формализуется как способ отображения  $P$ , в простейшем варианте понимаемый как некоторая функция  $f(m)$ , определенный на пространстве составов, либо на множество вещественных чисел  $R^1$ , представляющих значения этого свойства, либо на вероятностное пространство, связанное со значениями изучаемого свойства.

Рассмотрим следующий иллюстративный пример, как можно, исходя из некоторых предположений, включить в модель «состав–свойство» пластифицирующую химическую добавку. Будем считать, что весь эффект от введения добавки сводится к аддитивному изменению свободной поверхностной энергии на некоторую величину  $\Delta E$  [31]. В результате можно из каждой точки поверхности, описывающей модель поверхностной энергии  $E(m)$  составов без добавки, «выпустить» некоторую траекторию, параметризуемую длиной  $s$ , тождественно равной содержанию добавки в смеси  $s \equiv D$  (схематически это выглядит, как показано на рис. 2), такую, что вдоль этой траектории значение поверхностной энергии будет постоянным:

$$E(m(D)) = \text{const}, \quad (5)$$

где  $D$  – содержание добавки;  $m = \{m_1, \dots, m_n\}$  – состав;  $m_i$  – составляющие ингредиенты. Если далее мы продифференцируем уравнение (5) по  $D$ , то получим:

$$\frac{\partial E}{\partial m_1} \frac{\partial m_1}{\partial D} + \dots + \frac{\partial E}{\partial m_n} \frac{\partial m_n}{\partial D} = 0. \quad (6)$$

Уравнению (6) должны удовлетворять функции замены расхода материалов при использовании добавки, чтобы сохранить свойства смеси. Эти функции можно использовать для оценки, например, экономической эффективности применения добавки. Отметим интересную аналогию между внешним сходством уравнения (5) и подходом к описанию динамических систем [32]. Такая аналогия содержит потенциал применения методов, развитых в теории динамических систем для исследования свойств поверхностей отклика под действием различных факторов. В текущем варианте работы оставим развитие этой идеи для предмета дальнейших исследований и далее сформулируем необходимость явного рассмотрения вероятностной компоненты при построении моделей «состав–свойство».

### Вероятностная модель

Математический аппарат теории вероятности был разработан для исследования систем, в которых невозможно выписать все причинно-следственные соотношения с необходимой точностью. Типичным примером является выбрасывание игральной кости в форме кубика на стол и фиксирование количества очков, которые выпадают на верхней грани; при каждом броске будет выпадать один из шести вариантов. Теоретически можно было бы выписать уравнения, определяющие силу трения кубика о поверхность стола; силу, с которой кубик бросается экспериментатором на стол и т. д. Эти уравнения известны – второй закон Ньютона, уравнение динамики вращательного движения и др. Однако любое незначительное отклонение в начальных и граничных условиях к уравнениям приведет к тому, что реальный результат будет отличаться от предсказанного. В таких случаях при составлении прогнозов результата эксперимента необходимо ставить цель не предсказать, какое конкретно количество очков будет выпадать, а *определить, с какой вероятностью* будет получаться то или иное количество очков. Если предполагать, что кубик симметричный, то вероятности выпадения каждой из граней равны друг другу. Однако при работе с реальными объектами и системами часто наблюдается неодинаковая вероятность получения различных результатов. Например, если кубик будет утяжелен на какую-то одну грань, то при большом количестве испытаний будет наблюдаться смещение в пользу одного и того же количества очков. Методы оценки вероятности получения различных результатов в подобных случаях представляют практический интерес. Большую роль при этом играет априорная информация. На примере асимметричного кубика это выглядит следующим образом. Предположим, что стоит задача определения, какая из граней кубика будет иметь наибольшую вероятность выпадения. Если ничего не известно о кубике, то фактически нужно понять, во-первых, асимметричный он или нет, и только потом выяснять, какая из его граней имеет наибольшую вероятность выпадения. В совокупности для этого необходимо выполнить не менее какого-то количества  $N_1$  бросков кубика (реализаций эксперимента). Однако, *если известно заранее*, что кубик асимметричен, например, по измерениям компонентов его момента инерции, то для того, чтобы выяснить на какую именно грань он асимметричен, потребуется  $N_2 \ll N_1$  экспериментов, гораздо меньше, чем в предыдущем случае. Любая априорная информация об изучаемой системе может представлять ценность для определения вероятности отклика этой системы на внешнее воздействие.



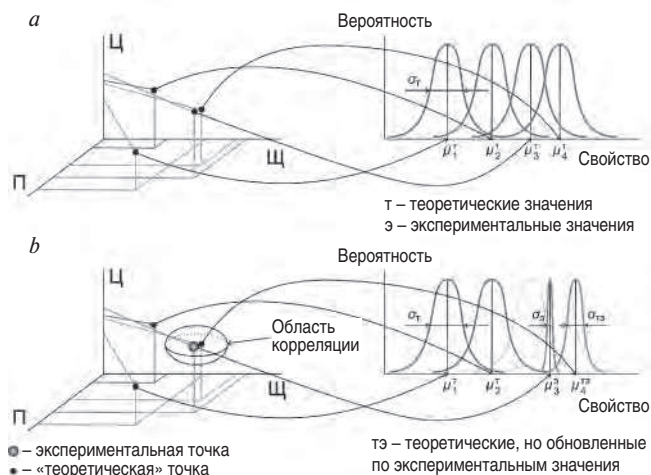


Рис. 3. Схематическое построение, демонстрирующее идею использования корреляции свойств составов в различных точках: а – до эксперимента; б – после эксперимента

Fig. 3. Schematic construction demonstrating the idea of using the correlation of composition properties at different points: a – before the experiment; b – after experiment

Бетонная смесь по природе своей имеет случайную компоненту. Сыпучие материалы, например, являются объектом изучения статистической физики [33], неравновесность процессов в смеси определяется направлением химических реакций, условия окружающей среды формируют случайные граничные условия, и, наконец, существуют различные методические и инструментальные ошибки, связанные с процессом измерения интересующего свойства. Как результат, к любой количественной оценке какого-либо свойства всегда необходимо относиться как к случайной величине, распределенной по некоторому закону вероятности. В практике работы с бетонными смесями этот момент часто учитывается с помощью такой величины, как коэффициент вариации. В этом смысле и результат прогноза значения свойства того или иного состава должен выполняться в вероятностном контексте. Для наглядности можно образно представить, что с каждой точкой пространства составов связана функция распределения вероятности принятия значений того или иного свойства. Существуют различные классы функций распределения, каждый из которых характеризуется своим набором параметров. Если для описания свойств бетонной смеси использовать нормальное распределение, то достаточно будет знать в каждой точке пространства составов два параметра – математическое ожидание  $\mu$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ . Отметим важный постулат: даже не выполнив ни одного эксперимента, всегда можно определить для каждого состава функцию распределения вероятности значений свойств. Однако в этом случае параметр  $\sigma$  будет большим, предсказывая большой диапазон размаха возможных значений. Экспери-

ментальные данные для любого состава автоматически сужают в этой точке среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  и смещают математическое ожидание  $\mu$  до экспериментальных значений (рис. 3). С учетом непрерывности свойств по точкам пространства составов при проведении измерений в какой-то одной точке автоматически генерируется информация о свойствах «соседних» составов, находящихся на некоторой «дистанции» от точки, в которой было проведено измерение. Размер этой дистанции зависит от соответствующей длины корреляции, которая, в свою очередь, зависит от свойств материалов и от самого изучаемого свойства. Каждая новая измеренная точка несет с собой пласт априорной информации для окружающих ее точек, которая позволяет по аналогии с асимметричным кубиком уменьшить количество экспериментов для оценки вероятности в других точках. В результате экспериментатор (или технолог на производстве) получает возможность, используя небольшое число экспериментальных данных, приближенно восстановить функцию плотности распределения вероятности значений свойств для всех точек пространства составов. Без учета длины корреляции классические методы математического планирования экспериментов для решения подобной задачи потребовали бы несравнимо большее количество экспериментов. Таким образом, априорная информация позволяет эффективно ориентироваться в многомерном пространстве всех возможных составов.

Следующий аспект, который необходимо рассмотреть в данном подразделе, – решение проблемы неоднозначности выбора регрессионной модели [34]. Предположим, что мы имеем две модели, одинаково хорошо аппроксимирующие (например, методом наименьших квадратов) некоторые экспериментальные данные по прочности зависимостью от В/Ц, однако при этом дающие различные прогнозные значения в интересующих точках. Какую из моделей выбрать в качестве «правильной»? Рассмотрим, как можно получить взвешенную оценку прочности, используя обе модели с помощью теоремы Байеса. Для конкретики будем предполагать, что первая модель имеет вид  $R_1=50-35 \cdot (В/Ц)$  линейной зависимости для среднего значения прочности как функции В/Ц, а вторая модель имеет вид степенной функции  $R_2=22 \cdot (Ц/В)^{0,5}$  (рис. 4). Пусть обе модели дают прогнозные значения в каждой точке, распределенные по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением  $\sigma=0,5$  МПа. До проведения нового измерения не имеется никаких предпосылок для выбора конкретной модели – обе модели  $R_1$  и  $R_2$  имеют одинаковое право на существование, поэтому априорная вероятность быть «правильной» для каждой

из них равна 0,5. Т. е. каждый прогноз необходимо составлять путем сложения прогнозов от каждой из моделей с весом 0,5. Далее, предположим, что было проведено новое измерение прочности для точки  $V/C=0,4$  и получено экспериментальное значение  $R_{exp}=(35,3\pm 0,1)$  МПа. Модели  $R_1$  и  $R_2$  в точке  $V/C=0,4$  предсказывают, что прочность должна лежать в диапазонах  $(36\pm 0,5)$  и  $(34,8\pm 0,5)$  МПа соответственно. Реальные данные  $(35,3\pm 0,1)$  МПа указывают на предпосылки выбора второй модели ( $R_2$ ), поскольку между двумя значениями 36 и 34,8 она дает более близкую к новым экспериментальным данным величину. Следовательно, начальные веса, равные 0,5, необходимо переопределить в пользу второй модели. Новые переопределенные значения вероятности выбора модели называются постериорными вероятностями. Чтобы их получить, необходимо найти вероятности наблюдаемых в эксперименте значения по каждой из моделей, что выполняется с помощью формулы:

$$P = 2\Delta h \cdot \exp(-0,5 \cdot [(R - \langle R \rangle) / \sigma]^2) / \sqrt{2\pi\sigma^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma=0,5$  МПа;  $\Delta h=0,1$  МПа – погрешности экспериментальных измерений,  $\langle R \rangle$  – прогнозное значение для среднего значения;  $R$  – среднее экспериментальное значение. По первой модели ( $R_1$ ) вероятность получения значения из диапазона  $(35,3\pm 0,1)$  МПа равна 0,06, а по второй модели ( $R_2$ ) – 0,1. Для нахождения постериорных значений вероятности используется формула Байеса  $P(A|B)=P(B|A) \cdot P(A)/P(B)$ , где  $P(A)$  – постериорная вероятность реализации события  $A$ ;  $P(B)$  – полная вероятность реализации события  $B$  и  $P(B|A)$  – вероятность возникновения события  $B$  при условии появления события  $A$ . В нашем примере постериор-

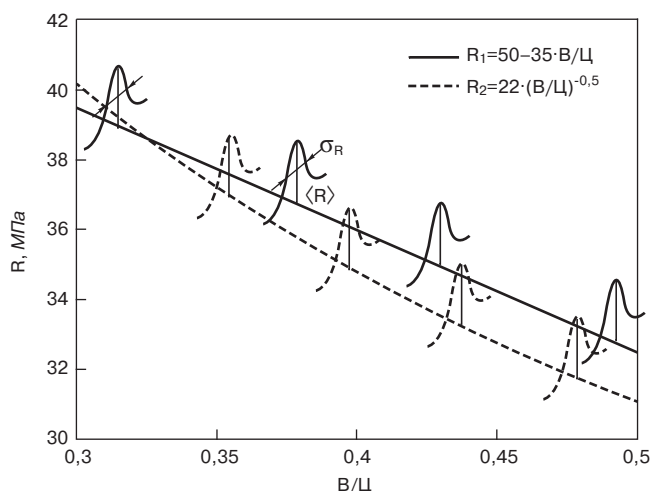


Рис. 4. Иллюстрация моделей, одинаково хорошо описывающих некоторые экспериментальные данные  
Fig. 4. Illustration of models that equally well describe some experimental data

ная вероятность с помощью модели  $R_1$  позволяет получить корректные данные  $P(\text{Model}=1 \text{ при условии } R_{exp}=(35,3\pm 0,1) \text{ МПа})=0,06 \cdot 0,5 / (0,06 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,5)=0,375$ . Соответственно вероятность для второй модели  $R_2$  быть «правильной» имеет значение  $1-0,375=0,625$ .

Полученные значения постериорных вероятностей могут быть использованы для построения новой взвешенной вероятностной модели, которая будет учитывать вклад от каждой из имеющихся, с учетом того, что в реальности мы никогда не можем быть уверены в том, что знаем «истинную» модель. Результирующая модель прочности  $R=0,375 \cdot R_1 + 0,625 \cdot R_2$ . Обратим внимание, что всего лишь один эксперимент смог существенным образом «сдвинуть» коэффициенты при моделях в нужную сторону, т. е. поступающие экспериментальные данные эффективным образом вовлекаются в рабочий процесс без необходимости накапливать большую статистику. Теория принятия статистических решений – раздел математической статистики – предлагает несколько практических рецептов для оптимизации параметров статистических моделей, например применение минимаксной модели управления, методы взвешенного рандомизированного моделирования [34] и т. д. Существуют теоремы, доказывающие, что точность прогнозов при использовании ансамблированных (подобно тому, что было продемонстрировано выше) подходов существенно может превышать точность получаемой при использовании какой-то одной регрессионной модели. При этом методы байесовской статистики являются наиболее общим подходом [25].

Представленная концепция не допускает возможности аналитического способа получения результатов. Для практической работы необходима ее реализация в программных кодах, поэтому следующий подраздел описывает схематически алгоритм применения представленной схемы на практике.

### Алгоритмическая схема построения прогнозных моделей

Построение прогнозной модели в общем случае состоит из нескольких этапов – сбор информации о свойствах исходных материалов, составление и реализация экспериментального плана, обработка данных, верификация модели, составление базы данных, графический или иной интерфейс для дальнейшей работы с моделью. Общая схема представлена на рис. 5: блок 1 описывает структуру байесовской статистики; блок 2 – применение этой статистики для бетонных смесей; блок 3 – конкретный алгоритм. Свойства исходных материалов используются как для составления экспериментального плана, для которого в том числе могут использо-



### ③ Реализация алгоритма для смесей



Рис. 5. Схема построения вероятностной модели и алгоритм ее реализации  
Fig. 5. Scheme for constructing a probabilistic model and an algorithm for its implementation

ваться и накопленные статистические данные, так и для создания векторов признаков, поступающих в алгоритмы машинного обучения. В зависимости от свойства, для которого строится модель, может потребоваться различное количество точек экспериментального плана. Например, минимальное количество экспериментальных точек для построения модели осадки конуса четырехкомпонентной бетонной смеси составляет семь замесов. Этого достаточно, чтобы приближенно оценить осадку конуса для всех остальных возможных составов при условии, что известна с хорошей точностью нормальная густота цементного теста НГТЦ, гранулометрический состав песка и щебня, содержание в последнем лещадных зерен и водопотребность песка. Однако если эти параметры неизвестны или нет возможности их измерить, можно учесть соответствующий вклад, с ними связанный, с помощью дополнительного количества экспериментальных точек. Таким образом, отклик от любого типа неопределенности оценивается через экспериментальные данные. В пространстве составов (Щ, П, Ц) легко можно выделить направление, вдоль которого нужно собрать информацию о факторах, связанных, например, с песком. Как правило, по трем экспериментальным точкам вдоль этого направления легко устанавливается характер факторной зависимости – возрастающая/убывающая, линейная/нелинейная, если нелинейная, то достаточно ли второго порядка полинома для описания этого вклада и т. д. Реализация экспериментального плана – ответственный этап и наиболее трудоемкий, требующий наличия опыта работы в строительной лаборатории. Замесы необходимо выполнять на сухих материалах в лабораторных условиях и следить за соблюдением протокола приготовления бетонной смеси. Задача экспериментального плана – охватить крайние и средние точки рабочей области составов, как правило, в крайних точках бетонные смеси либо склонны к расслоению, либо имеют жесткий класс подвижности.

Большую роль при обработке экспериментальных данных играет функция правдоподобия для этих данных. Эта функция возникает в том случае, когда нужно оценить количественное значение параметров, определяющих функцию распределения вероятности измеряемой величины [21]. В соответствии с методом максимального правдоподобия значения параметров, при которых эта функция принимает максимальное значение при фиксированной выборке, принимаются за «истинные». Функция правдоподобия строится исходя из выбора класса функций плотности распределения вероятности. Для нормального закона распределения эта функция имеет вид:

$$\mathcal{L}(\theta|y) = \prod p(y = Y_i|\theta = \{\mu, \sigma\}), \quad (8)$$

где  $Y_i$  – экспериментальные значения;  $i$  – нумерация этих значений;  $\mu, \sigma$  – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение (в общем случае являются функциями от состава  $m$ ).

Выполнив процедуру максимизации функции правдоподобия, параметры эмпирических зависимостей, связанные с величинами  $\mu, \sigma$ , используются далее для построения новой плотности распределения вероятности в соответствии с формулой Байеса (рис. 5). Для процедуры ансамблирования модели по взвешенным составляющим необходимо создать базовый стек ансамбля (набор), элементами которого могут быть либо эмпирические зависимости, либо алгоритмы машинного обучения. Последние в качестве вектора признаков могут использовать расчетные значения, полученные исходя из анализа свойств материалов: плотность упаковки, удельная поверхность, толщина обмазки зерен заполнителей и т. д. Кроме того, количественные характеристики свойств материалов также могут быть вовлечены в вектор признаков для машинного обучения (рис. 5, блок 3).

Существует большое количество эмпирических зависимостей для прочности  $R$  [35], часть из которых, представленная в таблице, может быть использована в качестве элементов ансамбля. Некоторые зависимости из этой таблицы используют максимальное значение эффективной толщины обмазки (MPT – *maximum paste thickness*), рассчитываемой по формуле:

$$MPT = D_{\max} \left( \sqrt[3]{\frac{\phi^*}{\phi} - 1} \right), \quad (9)$$

где  $D_{\max}$  – максимальный диаметр заполнителей;  $\phi^*, \phi$  – максимальная и реальная плотность упаковки; другие величины из таблицы имеют следующий смысл:  $V_c, V_w, V_a$  – объемные доли цемента, воды и воздуха;  $w, c$  – массовый расход воды и цемента на единицу объема смеси;  $\alpha, C_3S$  – степень гидратации цемента и процентное содержание в его составе алита;  $S_s$  – удельная поверхность цемента;  $A, B, S_0, m, m_1, m_2$  – калибровочные постоянные;  $t$  – срок набора прочности, выражаемый количеством суток с момента начала добавления воды в смесь.

Обсудим некоторые расчетные свойства, используемые в качестве вектора признаков для машинного обучения. Для расчета плотности упаковки нами была использована линейная модель плотности упаковки с возможностью учета процесса упаковки с помощью *индекса компактности* [3]:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\Phi - 1/\gamma_i}, \quad (10)$$

Эмпирические зависимости для ансамбля модели прочности  
Empirical dependencies for the strength model ensemble

$R = A \left( \frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^B$	$R = \frac{A}{B^{w/c}}$
$R = A \left[ \frac{100\alpha}{1,53 \frac{w + V_a}{c} + \frac{\alpha}{2,06}} - B \right]$	$R = A \frac{c}{w} + B \times 10^{-0,038V_a}$
$R = \frac{A}{B^{[mc+w/c]}} \times 10^{-0,038V_a}$	$R = KR_{28} \left[ A \log(t/28) + \left( \frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^B \right] \text{MPT}^m$
$R = A \left( \frac{0,66\alpha}{\frac{w + V_a}{c} + 0,32\alpha} \right)^B$	$R = \frac{A}{B^{w/c}} \sqrt{\frac{S_s}{S_0} \frac{100 - C_3 S e^{-m_1 t} - (100 - C_3 S) e^{-m_1 t}}{100 - C_3 S e^{-90m_1} - (100 - C_3 S) e^{-90m_1}}} \times 10^{-0,038V_a}$

где  $n$  – количество фракций в смеси;  $i$  – номер конкретной частной фракции;  $\beta_i$  – виртуальная (максимально достижимая теоретически) плотность упаковки монодисперсной смеси ( $i$ -й фракции);  $y_i$  – объемная доля  $i$ -й фракции;  $\gamma_i$  – виртуальная плотность упаковки смеси при доминировании  $i$ -й фракции;  $\Phi$  – фактическая (реальная) плотность упаковки;  $K$  – индекс компактности, эмпирический параметр, зависящий от способа приготовления смеси (уплотнения). Формула для расчета виртуальной плотности упаковки  $\gamma_i$  имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\gamma_i} = \sum_{j=1}^{i-1} \left[ 1 - b_{ij} \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \frac{a_{ij}}{\beta_j} y_j + \frac{y_i}{\beta_i}, \quad (11)$$

где  $b_{ij}$ ,  $a_{ij}$  – эмпирические коэффициенты, определяющие эффекты «разрыхления» и «упорядочения» [3, 36].

Удельная поверхность оценивается исходя из данных гранулометрического состава заполнителей по формуле А.С. Ладинского [6]. Вычислив плотность упаковки и удельную поверхность, можно рассчитать эффективную толщину обмазки [37]  $h$ :

$$h = \frac{V_{цт} - V_0}{S_{п+щ}}, \quad (12)$$

которая является релевантным признаком для осадки конуса [28];  $V_{цт}$ ,  $V_0$ ,  $S_{п+щ}$  – объем цементного теста, объем межзерновых пустот заполнителей (П+Щ), рассчитанный исходя из значения плотности упаковки, и площадь поверхности заполнителей.

Для эмпирической зависимости осадки конуса от толщины обмазки (12) была разработана модель на основе аппроксимации экспериментальных данных расплыва мини-конуса цементно-песчаного раствора на встряхивающем лабораторном столике с использованием гиперболического тангенса:

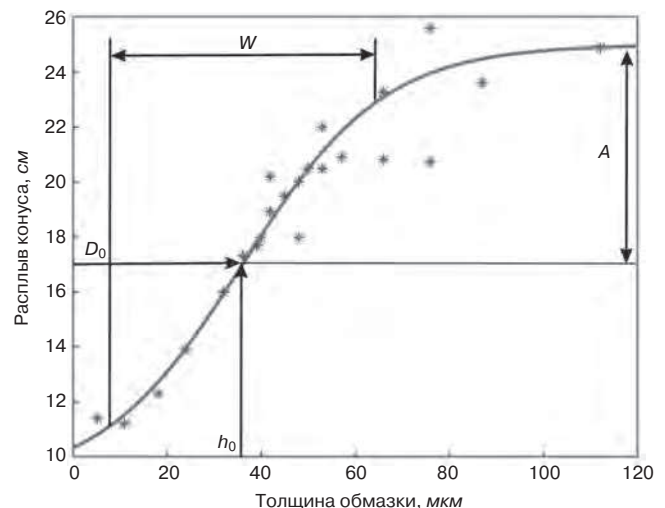


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра расплыва конуса от толщины обмазки зерен заполнителей; на рисунке значения параметров функциональной зависимости (13) следующие:  $h_0=36$  мкм;  $D_0=17$  см;  $A=8$  см;  $W=30$  мкм

Fig. 6. The dependence of the average diameter of the cone flow on the thickness of the coating of the aggregate grains, in the figure the values of the parameters of the functional dependence (13) are as follows:  $h_0=36$   $\mu\text{m}$ ;  $D_0=17$  cm;  $A=8$  cm;  $W=30$   $\mu\text{m}$

$$D(h) = D_0 + A \tanh \frac{h - h_0}{W}, \quad (13)$$

где  $D$  – диаметр расплыва конуса в см (если используется осадка конуса, как в бетонной смеси с щебнем/гравием, то вместо  $D$  нужно понимать осадку конуса – ОК в см); физический смысл других коэффициентов продемонстрирован на рис. 6, из которого также следует и возможный диапазон изменения значений этих коэффициентов. Полученная эмпирическая зависимость достаточно хорошо описывает практически все наблюдаемые авторами зависимости осадки конуса от расчетной толщины обмазки.

В заключение раздела на основе вышеприведенных понятий и величин сформулирована общая схема алгоритма построения моделей, представленная на рис. 5, блок 3. Эта схема реализована в программных кодах для вычислительных машин; для плотности упаковки с целью ускорения численных расчетов был использован язык C++, для моделей машинного обучения используются библиотеки языка Python, для составления экспериментального плана – Matlab, для работы с результатами данных – веб-интерфейс с возможностью интерактивной работы как с базой данных, так и с графическими данными.

Представленная схема апробирована на материалах как минимум пяти производственных площадок от Новосибирска до Москвы. Были построены модели для прочности на 1-е сут после фиксированного режима тепловлажностной обработки, 7-е и 28-е сут нормального твердения и соответствующих плотностей, а также осадки конуса бетонных смесей на базе четырех материалов без пластифицирующих добавок и с пластифицирующими на основе лигносульфоната и поликарбоксилата. Также разработаны и реализованы экспериментальные планы для определения оптимального содержания минерального наполнителя и построены соответствующие модели для мелкозернистых бетонных смесей. Частично данные результаты приведены во второй части статьи.

### Список литературы / References

1. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.
1. Nevill' A.M. Svoistva betona [Concrete properties]. Moscow: Stroyizdat. 1972. 344 p.
2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Akhverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Fundamentals of concrete physics]. Moscow: Stroyizdat. 1981. 464 p.
3. De Larrard F. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. London and New York, 1998. 448 p.
4. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
4. Sheikin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoistva tsementnykh betonov [Structure and properties of cement concretes]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 344 p.
5. Zongjin L. Advanced concrete technology. Wiley. 2011. 528 p.
6. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: ABC, 2003. 499 с.
6. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: AVS. 2003. 499 p.
7. Белов В.В., Курятников Ю.Ю., Новиченкова Т.Б. Технология и свойства современных цементов и бетонов. М.: ACB, 2014. 280 p.
7. Belov V.V., Kuriatnikov Iu.Iu., Novichenkova T.B. Tehnologiya i svoistva sovremennykh cementov i betonov [Technology and properties of modern cements and concretes]. Moscow: ASV. 2014. 280 p.
8. Добшиц Л.М., Физико-математическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. № 12. С. 30–36.
8. Dobshits L.M. Physical and mathematical model of destruction of concrete under alternate freezing and thawing. Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2017. No. 12, pp. 30–36. (In Russian).
9. Шейкин А.Е. Строительные материалы. М.: Стройиздат, 1989. 432 с.
9. Sheikin A.E. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 432 p.
10. Добшиц Л.М., Пути повышения долговечности бетона // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 4–9 с.
10. Dobshits L.M. Ways to improve the durability of concrete. Stroitel'nye Materialy [Construction materials]. 2017. No. 10, pp. 4–9. (In Russian).
11. Добшиц Л.М. Морозостойкость бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 385 с.
11. Dobshits L.M. Frost resistance of concrete transport structures and ways to improve it. Doctor Diss. (Engineering). Moscow. 2000. 385 p. (In Russian).
12. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика для инженерных и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.
12. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenernykh i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics for engineers and scientists]. Fizmatlit. 2012. 816 p.
13. Queipo N.V., Haftka R.T., Shyy W, Goel T., Vaidyanathan R., Tucker P.K., Surrogate-based analysis and optimization. Progress in Aerospace Sciences. 2005. Vol. 41, pp. 1–28.
14. Винарский М.С., Лурье М.В., Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техника, 1975. 168 с.
14. Vinarskiy M.S., Lur'e M.V., Planirovanie eksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyakh [Planning an experiment in technology research]. Kiev: Tekhnika. 1975. 168 p.
15. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. М.: Диалектика, 2017. 912 с.

15. Dreiper N., Smit G., Prikladnoi regressionnyi analiz. Mnozhestvennaya regressiya [Applied regression analysis. Multiple regression]. Moscow: Dialektika. 2017. 912 p.
16. Zain M.F.M., Abd S.M. Multiple regression model for compressive strength prediction of high performance concrete. *Journal of Applied Sciences*. 2009. No. 9, pp.155–160.
17. Tao C., Kutchko B.G., Rosenbaum E., Massoudi M., A review of rheological modeling of cement slurry in oil well applications. *Energies*. 2020. Vol. 13. 570 p.
18. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 385 с.
18. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Raschetnoe prognozirovaniye svoystv i proektirovaniye sostavov betona [Computational prediction of properties and design of concrete compositions]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2019. 385 p.
19. Seruet A. A novel stability analysis of linear systems under asynchronous samplings. *Automatica*. 2012. Vol. 48, pp. 177–182.
20. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Ч. I. СПб.: Лань, 2008. 448 с.
20. Fikhtengol'ts G.M. Osnovy matematicheskogo analiza. Chast' I [Fundamentals of mathematical analysis. Part I]. Saint Petersburg: Lan'. 2008. 448 p.
21. Olkin I., Gleser L.J., Derman C. Probability models and applications. MacMillan Publishing Company. 1999. 575 p.
22. Jordan M.I., Mitchell T.M., Machine learning: trends, perspectives, and prospects. *Science*. 2015. Vol. 349, pp. 255–260 p.
23. Weiwei J. Applications of deep learning in stock market prediction: recent progress. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 184. 115537.
24. Ausawalathong W., Thirach A., Marukatat S., and Wilaiprasitporn T. Automatic lung cancer prediction from chest X-ray images using the deep learning approach. *11<sup>th</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*. 2018, pp. 1–5.
25. Green P.J., Latuszynski K., Pereyra M., Robert C.P. Bayesian computation: a summary of the current state, and samples backwards and forwards. *Statistics and Computing*. 2015. Vol. 25, pp. 835–862.
26. Kanamarlapudi, L., Jonalagadda K.B., Jagarapu D.C.K. et al. Different mineral admixtures in concrete: a review. *SN Applied Sciences*. 2020. No. 2. 760.
27. Глекель Ф.Л. Физико-химические основы применения минеральных добавок. Ташкент: Изд-во «ФАН», 1975. 198 с.
27. Glekel' F.L. Fiziko-khimicheskie osnovy primeneniya mineral'nykh dobavok [Physical and chemical bases of application of mineral additives]. Tashkent: FAN. 1975. 198 p.
28. Mehta P.K. High performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. University of California, Berkeley, 2004.
29. Wang Y. and McDowell D.L. (ed.) Uncertainty quantification in multiscale materials modeling. Woodhead Publishing, 2020. 586 p.
30. Eggwertz S., Lind N.C. (ed), Probabilistic methods in the mechanics of solids and structures. Berlin: Springer-Verlag. 1985. 610 p.
31. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Палеолит, 2006. 244 с.
31. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. Khimicheskie dobavki dlya modifikatsii betona [Chemical additives for concrete modification]. Moscow: Paleolit. 2006. 244 p.
32. Биркофф Дж. Динамические системы. М.: ОГИЗ, 1999. 480 с.
32. Birkhoff Dzh. Dinamicheskie sistemy [Dynamic systems]. Moscow: OGIz. 1999. 480 p.
33. Baule A., Morone F., Hermann H.J., Makse H.A. Edwards statistical mechanics for jammed granular matter. *Reviews of modern physics*. 2018. Vol. 90. 015006.
34. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.
34. Repin V.G., Tartakovskii G.P. Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system [Statistical synthesis under a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sovetskoe radio. 1977. 432 p.
35. Chidiac S.E., Moutassem F., Mahmoodzadeh F., Compressive strength model for concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2013. Vol. 65, pp. 557–572.
36. Белов В.В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 5. С. 94–101.
36. Belov V.V. Teoreticheskoe obosnovaniye optimal'nykh zernovykh sostavov kompozitsionnykh materialov s mineral'nymi napolnitelyami. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 5, pp. 94–101. (In Russian).
37. Kwan A.K.H. Combined effect of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45, pp. 1359–1374.

В.Н. СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук (np.ots@mail.ru),  
В.И. САВИН, канд. техн. наук (vlsavin@inbox.ru),  
В.В. ПОЛЕТАЕВ, канд. техн. наук (poletaev.vladimir.47@mail.ru)

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

## Деформационные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике

Приведены результаты исследований основных деформационных свойств теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных легких бетонов на гранулированной пеностеклокерамике плотностью от 500 до 800 кг/м<sup>3</sup>, а также конструктивных легких бетонов плотностью до 1700 кг/м<sup>3</sup> оптимальных составов. Проанализированы различные зависимости по оценке полученных экспериментальных данных и даны рекомендации по внесению в нормативные документы, в частности в СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования».

**Ключевые слова:** легкий бетон, пеностеклокерамика гранулированная, начальный модуль упругости, прочность при сжатии, призмочная прочность, предельные деформации при сжатии, прочность при осевом растяжении, прочность при растяжении при изгибе, прочность при растяжении при раскалывании.

**Для цитирования:** Строчки В.Н., Савин В.И., Полетаев В.В. Деформационные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-38-45>

V.N. STROTSKIY, Candidate of Sciences (Engineering), (np.ots@mail.ru),

V.I. SAVIN, Candidate of Sciences (Engineering), (vlsavin@inbox.ru),

V.V. POLETAEV, Candidate of Sciences (Engineering), (poletaev.vladimir.47@mail.ru)

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (NIIZHB), JSC Research Center of Construction (6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### Deformation Characteristics of Lightweight Concrete Based on Granular Foam Glass Ceramics

The results of studies of the main deformation properties of heat-insulating and structural-heat-insulating lightweight concretes on granulated foam glass-ceramic with a density of 500 to 800 kg/m<sup>3</sup>, as well as structural lightweight concretes with a density of up to 1700 kg/m<sup>3</sup> of optimal compositions are presented. Various dependencies on the evaluation of the experimental data obtained are analyzed and recommendations are given for inclusion in regulatory documents, in particular, in SP 351.1325800.2017 “Concrete and reinforced concrete structures made of light concrete. Design rules”.

**Keywords:** lightweight concrete, granulated foam glass ceramics, initial modulus of elasticity, compressive strength, prismatic strength, ultimate compression deformations, axial tensile strength, bending tensile strength, splitting tensile strength.

**For citation:** Strotskiy V.N., Savin V.I., Poletaev V.V. Deformation characteristics of lightweight concrete based on granular foam glass ceramics. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 38–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-38-45>

В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований начального модуля упругости, предельных деформаций при сжатии легкого бетона [1, 2] на гранулированной пеностеклокерамике (ПСКГ), выполненные на основании договора № 217/2021 от 24.05.2021 г. по теме «Исследование физико-механических, деформативных и теплофизических свойств легких бетонов с низкой теплопроводностью и плотностью менее 800 кг/м<sup>3</sup> на гранулированной пеностеклокерамике для несущих и ограждающих конструкций нового типа».

### Начальный модуль упругости

Начальный модуль упругости ( $E_{\sigma}$ ) определяли на образцах-призмах 100×100×400 и 70×70×280 мм по ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» (рис. 1).

Опытные средние значения модуля упругости приведены в табл. 1.

Полученные опытные средние значения начального модуля упругости легкого бетона на ПСКГ поризованной структуры (образцы составов ПК-1 – ПК-19)



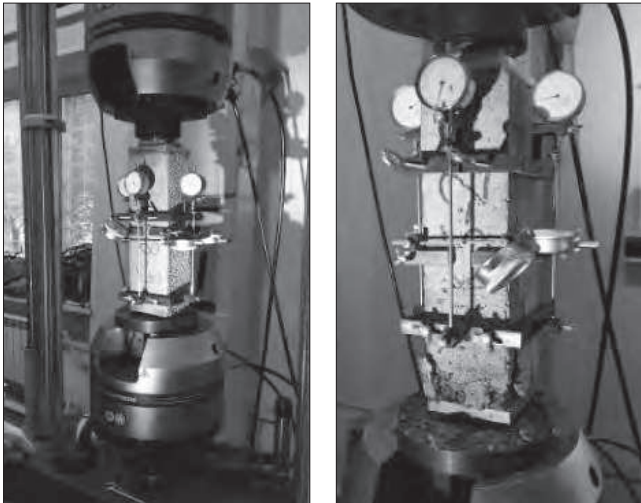


Рис. 1. Общий вид при испытании на сжатие образца-призмы для определения модуля упругости  
 Fig. 1. General view during the compression test of the sample prisms for determining the modulus of elasticity

и плотной структуры на кварцевом песке (образцы ПК-16-2 – ПК-16Х) сопоставляли с нормируемой величиной для легкого бетона по СП 351.1325800–2017.

В нормативных документах значение начального модуля упругости бетонов на пористых заполнителях на основе статистической обработки опытных данных определяется следующей зависимостью:

$$E_b = 3130 \cdot \rho \sqrt[3]{R}, \quad (1)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости;  $\rho$  – плотность бетона, т/м<sup>3</sup>;  $R_b$  – прочность при сжатии, МПа.

Сопоставление опытных и расчетных значений по формуле (1) приведено в табл. 2 и 3.

Как следует из табл. 2, расчетные (нормируемые) значения модуля упругости превышают опытные величины на 35,5–87% для бетона поризованной структуры и на 4–21% для бетона плотной структуры с кварцевым песком.

Опытные значения сопоставлялись также с расчетными значениями, вычисленными по формуле Т.И. Милых [4]:

$$E_b = 2750 \cdot \rho \sqrt[3]{R}. \quad (2)$$

Сопоставление опытных и расчетных значений по формуле (2) приведено также в табл. 2 и 3 и показано на рис. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и 3 и на рис. 2, показал, что расчетные значения  $E_b^{расч}$ , определенные по формуле (2), превышают опытные значения  $E_b^{опыт}$  для поризованного бетона (превышение составляет 19–64%) и практически совпадают с опытными значениями  $E_b^{опыт}$  для бетона плотной структуры с кварцевым песком (отклонения составили от -8% до +6,7%).

Таблица 1  
 Table 1

Опытные средние значения модуля упругости  
 Experimental average values of the modulus of elasticity

№ призмы	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, R, МПа	Модуль упругости, $E_b \cdot 10^{-3}$ , МПа
ПК-1	551	1,6	1,28
ПК-2	572	2,4	1,656
ПК-4	618	3,8	1,764
ПК-5	595	2,67	1,611
ПК-6	690	4,8	1,949
ПК-8	756	5,13	2,774
ПК-9	742	3,65	2,096
ПК-10	794	5,67	3,159
ПК-12	795	5,53	2,973
ПК-14-1	755	4,57	2,477
ПК-17	789	4,1	2,69
ПК-17-2	744	3,9	2,573
ПК-17-3	744	3,7	2,299
ПК-18-1	603	1,27	1,413
ПК-18-2	651	1,4	1,6
ПК-18-3	628	1,27	1,53
ПК-19-2	602	1,35	1,545
ПК-19-3*	606	1,11	1,263
ПК-19-3	587	1,35	1,675
ПК-16	1596	16,4	11,53
ПК-16*	1708	16,5	12,4

**Примечания:**

1. Данные прочности при сжатии принимались с учетом результатов испытаний кубов размерами 70×70×70 мм.
2. Призмы ПК-16 изготовлены из легкого бетона поризованной структуры и ПК-16\* изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

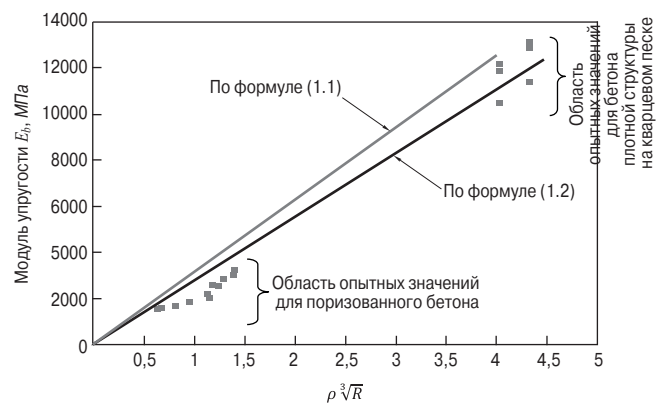


Рис. 2. График зависимости  $E_b - f(\rho \sqrt[3]{R})$ : ■ – опытные значения  
 Fig. 2. Graph of dependence  $E_b - f(\rho \sqrt[3]{R})$ : ■ – experimental values

Таблица 2  
Table 2

Сравнение расчетных и опытных значений модуля упругости легких бетонов поризованной структуры на ПСКГ различных составов  
Comparison of calculated and experimental values of the elastic modulus of light concrete of a porous structure on Foam Glass Ceramics Granulated of various compositions

Показатель	Маркировка составов													
	ПК-1	ПК-2	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-8	ПК-9	ПК-10	ПК-12-1	ПК-14-1	ПК-17	ПК-18	ПК-19	
$E_b^{расч}$ по формуле (1)	2,016 (158%)	2,397 (145%)	3,019 (171%)	2,585 (160%)	3,643 (187%)	4,082 (147%)	3,574 (171%)	4,432 (140%)	4,401 (148%)	3,920 (158%)	3,740 (148%)	2,150 (142%)	2,025 (135,5%)	
$E_b^{расч}$ по формуле (2)	1,771 (138%)	2,106 (127%)	2,652 (150%)	2,271 (141%)	3,201 (164%)	3,586 (129%)	3,141 (150%)	3,894 (123%)	3,867 (130%)	3,444 (139%)	3,286 (130%)	1,889 (125%)	1,779 (119%)	
$E_b^{опыт}$	<b>1,280</b>	<b>1,656</b>	<b>1,764</b>	<b>1,611</b>	<b>1,949</b>	<b>2,774</b>	<b>2,096</b>	<b>3,159</b>	<b>2,973</b>	<b>2,477</b>	<b>2,521</b>	<b>1,514</b>	<b>1,494</b>	

Таблица 3  
Table 3

Сравнение расчетных и опытных значений модуля упругости легких бетонов плотной структуры на ПСКГ (с кварцевым песком) составов ПК-16  
Comparison of calculated and experimental values of the elastic modulus of light concrete of dense structure on Foam Glass Ceramics Granulated (with quartz sand) compositions PK-16

Показатель	Маркировка составов					
	ПК-16-2	ПК-16-4	ПК-16-5	ПК-16-6	ПК-16-8	ПК-16-X
$E_b^{расч}$ по формуле (1)	12,692 (105,4%)	13,609 (120%)	12,692 (121%)	12,692 (105%)	13,609 (106%)	13,609 (104%)
$E_b^{расч}$ по формуле (2)	11,151 (92,6%)	11,957 (106%)	11,151 (106,7%)	11,151 (92%)	11,957 (93%)	11,957 (92%)
$E_b^{опыт}$	<b>12,041</b>	<b>11,31</b>	<b>10,45</b>	<b>12,099</b>	<b>12,824</b>	<b>13,067</b>

Таблица 4  
Table 4

Опытные и расчетные значения модуля упругости легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ  
Experimental and calculated values of the elastic modulus of lightweight concrete of a porous structure per Foam Glass Ceramics Granulated

Показатель	Маркировка составов													
	ПК-1	ПК-2	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-8	ПК-9	ПК-10	ПК-12	ПК-14-1	ПК-17	ПК-18	ПК-19	
$E_b^{расч}$ по формуле (1.3)	1,359 (106%)	1,6405 (99,06%)	1,974 (112%)	1,744 (108%)	2,34 (120%)	2,81 (101,3%)	2,527 (121%)	3,119 (98,7%)	3,177 (107%)	2,739 (110,6%)	2,309 (91,6%)	1,618 (107%)	1,492 (99,87%)	
$E_b^{расч}$ по формуле (1.4)	1,359 (106%)	1,728 (104%)	2,349 (133%)	1,896 (118%)	2,948 (151%)	3,339 (120%)	2,764 (132%)	3,687 (117%)	3,646 (123%)	3,147 (127%)	2,923 (116%)	1,401 (92,5%)	1,314 (88%)	
$E_b^{опыт}$	<b>1,280</b>	<b>1,656</b>	<b>1,764</b>	<b>1,611</b>	<b>1,949</b>	<b>2,774</b>	<b>2,096</b>	<b>3,159</b>	<b>2,973</b>	<b>2,477</b>	<b>2,521</b>	<b>1,514</b>	<b>1,494</b>	

Таблица 5  
Table 5

Сравнение расчетных и опытных значений модуля упругости легких бетонов плотной структуры на ПСКГ (с кварцевым песком) составов ПК-16  
Comparison of calculated and experimental values of the elastic modulus of light concrete of dense structure on Foam Glass Ceramics Granulated (with quartz sand) compositions PK-16

Показатель	Маркировка составов					
	ПК-16-2	ПК-16-4	ПК-16-5	ПК-16-6	ПК-16-8	ПК-16-X
	Модуль упругости ( $E_c \cdot 10^{-3}$ , МПа)					
$E_b^{расч}$ по формуле (3)	13,95 (116%)	15,29 (135%)	13,57 (130%)	14,065 (116%)	15,857 (124%)	15,95 (122%)
$E_b^{расч}$ по формуле (4)	12,603 (105%)	13,529 (120%)	12,603 (121%)	12,603 (104%)	13,529 (105,5%)	13,529 (103,5%)
$E_b^{расч}$ по формуле (5)	13,957 (116%)	14,863 (131%)	13,637 (130,5%)	14,054 (116%)	15,336 (120%)	15,416 (118%)
$E_b^{опыт}$	<b>12,041</b>	<b>11,310</b>	<b>10,450</b>	<b>12,099</b>	<b>12,824</b>	<b>13,067</b>

Таблица 6  
Table 6

Опытные средние значения предельных деформаций сжатия  
Experimental average values of ultimate compression deformations

№ п/п	№ призмы	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предельные продольные деформации при сжатии $\epsilon_{b0} \cdot 10^{-3}$	№ п/п	№ призмы	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предельные продольные деформации при сжатии $\epsilon_{b0} \cdot 10^{-3}$
1	ПК-4	618	1,64	11	ПК-17-3	744	1,34
2	ПК-5	595	1,61	12	ПК-18-1	603	1,20
3	ПК-6	690	1,77	13	ПК-18-2	651	1,29
4	ПК-8	756	1,63	14	ПК-18-3	628	1,01
5	ПК-9	742	1,73	15	ПК-19-2	602	1,16
6	ПК-10	794	1,62	16	ПК-19-3*	606	0,77
7	ПК-12	795	1,77	17	ПК-19-3	587	0,96
8	ПК-14	755	1,59	18	ПК-16	1596	1,52
9	ПК-17	789	0,675	19	ПК-16*	1708	1,44
10	ПК-17-2	744	1,095				

Примечание. Призмы ПК-16 и ПК-16\* изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

Таблица 7  
Table 7

Сравнительные данные по значениям предельной сжимаемости легкого бетона на ПСКГ и дацизитобетона  
Comparative data on the values of the ultimate compressibility of light concrete on Foam Glass Ceramics Granulated and dacisite concrete

Показатель	Легкий бетон на гранулированной пеностеклокерамике (ПСКГ)										Дацизитобетон				
	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-8	ПК-9	ПК-10	ПК-12	ПК-14	ПК-17	ПК-18	ПК-19	ПК-16	Д-12	ДГ-13	ДП-13
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	618	595	690	756	742	794	795	755	759	627	598	1596	900	1000	900
Предельная сжимаемость, $\epsilon_{b0} \cdot 10^{-3}$	1,64	1,61	1,77	1,63	1,73	1,62	1,77	1,59	1,22	1,245	1,06	1,52	1,44	1,77	1,31

Примечания:

1. В таблице приведены усредненные значения  $\epsilon_{b0}$ .
2. Призмы ПК-16 изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

Таким образом, проведенный анализ экспериментально полученных величин начального модуля упругости легкого бетона на ПСКГ показал более низкие значения по сравнению с нормируемыми для бетона поризованной структуры, а также с расчетными величинами, определенными по формуле (2), что обусловлено повышенной деформативностью пеностеклокерамического заполнителя. Сниженные значения модуля упругости требуют введения соответствующего понижающего коэффициента к формуле (2). При этом формула (2) хорошо коррелируется с опытными значениями для бетона плотной структуры с кварцевым песком.

Стоит также отметить, что более низкие значения начального модуля упругости положительно отражаются на трещиностойкости, связанной с проявлением деформаций несилового характера – температурных, влажностных, усадочных, что наиболее актуально для ограждающих конструкций.

В [3] приведена формула, полученная Г.В. Несветавым в [5], которая имеет следующий вид:

$$E_b = \frac{0,05 \cdot R_{пп} + 57}{1 + \frac{3,8}{R_{пп}}} \left( \frac{\rho}{2,4} \right)^{1,25} \quad (3)$$

По данной формуле были вычислены значения начального модуля упругости для всех испытанных составов легкого бетона на ПСКГ. В табл. 4 приведены результаты определения  $E_b$  по формуле (3) в сопоставлении с опытными значениями.

На основании результатов испытаний опытных образцов-кубиков 70×70×70 мм и призм 70×70×280 мм из мелкозернистого шлакобетона (МЗШБ) в [6] получены формулы для определения начального модуля упругости в зависимости от плотности  $\rho$ , соответственно в кг/м<sup>3</sup> и т/м<sup>3</sup>, и прочности бетона  $R_m$ , МПа, конструкционного МЗШБ:

$$E_b = 1,95\rho\sqrt{R_m}; \quad (4)$$

$$E_b = 1,845\rho\sqrt{R_m} + 2,29. \quad (5)$$

Результаты определения  $E_b$  по формулам (3), (4), (5) приведены в табл. 4 и 5.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что расчетные значения  $E_b^{расч}$  для легкого бетона

поризованной структуры, определенные по формуле (3), достаточно хорошо коррелируются с опытными значениями; расхождения составляют от -8,4 до +21%. Несколько хуже (по сравнению с опытными данными) значения, определенные по формуле (4).

Размах расхождений  $\Delta = \frac{E_b^{расч} - E_b^{опыт}}{E_b^{опыт}} \cdot 100\%$  составляет от -12 до +51%, в основном в сторону переоценки  $E_b^{опыт}$ .

Что касается легких бетонов плотной структуры на ПСКГ (с кварцевым песком), то здесь лучше коррелируются с опытными значениями величины  $E_b^{расч}$ , определенные по формулам (2) (при  $\Delta = -8 - +6,7\%$ ); (1) (при  $\Delta = +4 - +21\%$ ) и (4) (при  $\Delta = +3,5 - +21\%$ ). Значения, вычисленные по формуле (5), в основном дают завышенные результаты; расхождения составляют +16 – +31%.

Полученные опытные и расчетные по формуле (3) данные по модулю упругости для легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ могут быть использованы для внесения изменений в положения п. 6.1.14 (табл. 6.6) СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования», а также при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения»), рекомендованных для производства на ООО «Пре-фабрика».

### Предельные деформации при сжатии при кратковременном действии нагрузки

Предельные значения деформаций при сжатии  $\varepsilon_{b0}$  определяли по результатам испытаний образцов-призм размерами 100×100×400 и 70×70×280 мм.

В процессе испытаний на образцы устанавливались приспособления (рамки) для крепления измерительных приборов – индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Результаты испытаний приведены в табл. 6.

Диапазон значений предельной сжимаемости поризованного легкого бетона на ПСКГ в результате проведенных испытаний составил  $\varepsilon_{b0} = (0,675 - -1,77) \cdot 10^{-3}$  при среднем значении  $\varepsilon_{b0}^{cp} = 1,345$ . Предельная сжимаемость легкого бетона на ПСКГ плот-

Таблица 8  
Table 8

Экспериментальные и расчетные значения предельной сжимаемости легкого бетона на ПСКГ (по данным [1])  
Experimental and calculated values of the ultimate compressibility of lightweight concrete on Foam Glass Granulated (according to [1])

Призменная прочность при сжатии, $R_{пп}$ , МПа	Модуль упругости, $E_b \cdot 10^{-3}$ , МПа	Предельная сжимаемость, опыт $\varepsilon_{b0} \cdot 10^{-3}$	По формуле (6) $\varepsilon_{b0} = 0,047 \left( \frac{R_{пп}}{E_b} \right)^{0,5}$	По формуле (8) $\varepsilon_{bR} = 0,85 \cdot \sqrt[3]{R_m} \cdot 10^{-3}$
11	8,5	1,85	1,69 (91,35%)	1,89 (102%)

Таблица 9  
Table 9

Экспериментальные и расчетные значения предельной сжимаемости легкого бетона на ПСКГ  
Experimental and calculated values of the ultimate compressibility of lightweight concrete at the Foam Glass Ceramics Granulated

№ образцы-призмы	Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Применная прочность при сжатии $R_{пр}$ , МПа	Модуль упругости, $E_c \cdot 10^{-3}$ , МПа	Предельная сжимаемость эксперимент, $\varepsilon_{b0} \cdot 10^{-3}$	По формуле (6) $\varepsilon_{b0} = 0,047 \left( \frac{R_{пр}}{E_c} \right)^{0,5}$	По формуле (7) $\varepsilon_{b0} = \left( 0,0216 \cdot \frac{\rho}{2400} + 0,0364 \right) \left( \frac{R_{пр}}{E_c} \right)^{0,5}$	По формуле (8) $\varepsilon_{bR} = 0,85 \cdot \sqrt{R_m} \cdot 10^{-3}$
ПК-1	551	1,311	1,28	1,14	1,504 (132%)	1,165 (102,2%)	0,99 (86,8%)
ПК-2	572	2,245	1,656	1,411	1,73 (122,6%)	1,34 (95%)	1,14 (80,8%)
ПК-4	618	2,93	1,764	1,64	1,95 (118,9%)	1,71 (104,3%)	1,33 (81,1%)
ПК-5	595	2,33	1,611	1,61	1,787 (111%)	1,59 (98,8%)	1,18 (73,3%)
ПК-6	690	3,2	1,949	1,77	1,904(107,6%)	1,73 (97,7%)	1,43 (80,8%)
ПК-8	756	3,83	2,774	1,63	1,746(107,1%)	1,605 (98,5%)	1,39 (85,3%)
ПК-9	742	3,08	2,096	1,73	1,802(104,2%)	1,65 (95,4%)	1,31 (75,7%)
ПК-10	794	4,25	3,159	1,62	1,724(106,4%)	1,6 (98,8%)	1,52 (93,8%)
ПК-12	795	4,425	2,973	1,77	1,813(102,4%)	1,68 (94,9%)	1,5 (84,7%)
ПК-14	755	3,6	2,477	1,59	1,792(112,7%)	1,65 (103,8%)	1,41 (88,7%)
ПК-17-2	744	2,25	2,573	1,1	1,39 (126,4%)	1,27 (115,5%)	1,315 (119,5%)
ПК-17-3	744	2,43	2,299	1,34	1,53 (114,2%)	1,4 (104,5%)	1,315 (98%)
ПК-18-1	603	1,2	1,413	1,20	1,37 (114,2%)	1,22 (101,7%)	0,92 (76,7%)
ПК-18-2	651	1,71	1,6	1,29	1,54 (119,4%)	1,38 (107%)	0,95 (73,6%)
ПК-18-3	628	1,26	1,53	1,013	1,35 (133,3%)	1,207 (119,2%)	0,92 (90,8%)
ПК-19-2	602	1,4	1,545	1,16	1,415 (122%)	1,258 (108,4%)	0,95 (81,9%)
ПК-19-3	587	1,38	1,675	0,96	1,35 (140,6%)	1,196 (124,3%)	0,88 (91,7%)
ПК-16	1596	15,5	11,53	1,52	1,723(113,4%)	1,86 (122,4%)	2,16 (142%)
ПК-16*	1708	16,8	12,4	1,44	1,73 (120%)	1,906 (132,4%)	2,16 (150%)

Примечание. Призмы ПК-16 (ПК-16-2, ПК-16-5, ПК-16-6) и ПК-16\*(ПК-16-8, ПК-16-4, ПК-16-X) изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

ной структуры (ПК-16), по данным табл. 5, равна  $\varepsilon_{b0}=(1,38-1,73)\cdot 10^{-3}$ . Для сравнения, по данным Г.А. Бужевича [1], предельная сжимаемость легких бетонов колеблется в пределах  $(0,3-1,15)\cdot 10^{-3}$  (в среднем  $\varepsilon_{b0}=1\cdot 10^{-3}$ ).

В табл. 6 приведены также усредненные опытные значения  $\varepsilon_{b0}$  легкого бетона на ПСКГ и дацизитобетона (на заполнителе из вулканического стекла).

Анализ данных, приведенных в табл. 6, показал, что среднее значение предельной сжимаемости дацизитобетонов (вулканического стекла) поризованной структуры, по данным [2], находится в пределах  $(1,31-1,73)\cdot 10^{-3}$ . Предельная сжимаемость поризованного легкого бетона на ПСКГ класса по прочности В1,5–В5 составляет  $\varepsilon_{b0}=(1,06-1,77)\cdot 10^{-3}$ .

Предельная сжимаемость легкого бетона на ПСКГ плотной структуры (ПК-16) прочностью В15, по данным табл. 6, равна  $\varepsilon_{b0}=(1,44-1,52)\cdot 10^{-3}$ , у дацизитобетонов прочностью В2,5–В3,5 плотной структуры  $\varepsilon_{b0}$  составила  $1,77\cdot 10^{-3}$ .

Из опубликованных источников известны формулы, определяющие предельную сжимаемость бетонов. Формулы, приведенные в [3], имеют следующий вид:

$$\varepsilon_{b0} = 0,047 \left( \frac{R_{np}}{E_b} \right)^{0,5}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{b0} = \left( 0,0216 \cdot \frac{\rho}{2400} + 0,0364 \right) \left( \frac{R_{np}}{E_b} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{np}$  – предел призмочной прочности, МПа;  $E_b$  – начальный модуль упругости, МПа.

В [6] на основании результатов испытаний опытных образцов-кубиков 70×70×70 мм и призм 70×70×280 мм из мелкозернистого шлакобетона (МЗШБ) получены формулы для определения и предельных относительных деформаций  $\varepsilon_{b0} = \varepsilon_{bR}^*$ :

$$\varepsilon_{bR} = 0,85 \cdot \sqrt[3]{R_m} \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

В табл. 8 и 9 приведены опытные значения  $\varepsilon_{b0}$  для легкого бетона на ПСКГ и на пеностекле гранулированном (ПСГ), по данным [3], и соответствующие значения  $\varepsilon_{b0}^{расч}$ , вычисленные по формулам (6)–(8).

В данном случае лучшую сходимость с опытными данными дает формула (8).

Как следует из табл. 9, расчетные значения  $\varepsilon_{b0}$ , вычисленные по формуле (7), достаточно хорошо коррелируются с опытными значениями для поризованного легкого бетона на ПСКГ.

### Список литературы

1. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.

В то же время для легкого бетона на ПСКГ плотной структуры на кварцевом песке опытные значения предельной сжимаемости лучше коррелируются с расчетными значениями  $\varepsilon_{b0}^{расч}$  по формуле (6).

Можно также заметить, что значения предельных деформаций  $\varepsilon_{b0}$  согласно расчетным формулам возрастают с увеличением прочности и плотности бетона, однако опытные данные, полученные для легкого бетона на ПСКГ, не всегда подтверждают эту тенденцию.

Полученные опытные и расчетные по формулам (7) и (6) данные по предельной сжимаемости для легкого бетона поризованной и плотной структуры на ПСКГ могут быть использованы для внесения изменений в пп. 6.1.13, 6.1.18 СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования», а также при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения»), рекомендованных для производства на ООО «Префабрика».

### Выводы и предложения

Полученные опытные данные и расчетные зависимости (формула (1.3)) по модулю упругости для легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ могут быть использованы для корректировки положения п. 6.1.14 (табл. 6.6) СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования», а также при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения»), рекомендованных ООО «Префабрика» [7].

Полученные опытные и расчетные данные – формулы (2.2) и (2.1) – по предельной сжимаемости для легкого бетона поризованной и плотной структуры на ПСКГ могут быть использованы для внесения изменений в пп. 6.1.13, 6.1.18 СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования», а также при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения»), рекомендованных ООО «Префабрика».

### References

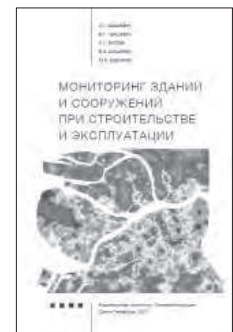
1. Buzhevich G.A. Legkie betony na poristyx zapolnityakh [Light concrete on porous aggregates]. Moscow: Stroizdat. 1970. 272 p.  
2. Gnatus N.A. Datsizitobeton [Datsizitobeton]. Moscow: Nedra. 1991. 124 p.

2. Гнатусь Н.А. Дацизитобетон. М.: Недра, 1991. 124 с.
3. Давидюк А.Н. Легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях. М.: Красная звезда, 2008. 208 с.
4. Милых Т.И. Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны средней плотностью 700–900 кг/м<sup>3</sup>: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1986.
5. Несветаев Г.В. Модуль упругости бетона. Ч. I. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси / Под ред. П.Г. Комохова. СПб.: Профессional, 2007. С. 282–298.
6. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
7. Горнов А.А. Индустриальное домостроение на основе легкого бетона // *Жилищное строительство*. 2021. № 5. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-45-35-40>
3. Davidyuk A.N. Legkie konstruksionno-teploizolyatsionnye betony na steklovidnykh poristykh zapolnitelyakh [Lightweight structural and thermal insulation concretes on vitreous porous aggregates]. Moscow: Krasnaya Zvezda. 2008. 208 p.
4. Milykh T.I. Structural and heat-insulating lightweight concretes with an average density of 700–900 kg/m<sup>3</sup>. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 1986.
5. Nesvetaev G.V. Modul' uprugosti betona. Ch. I. Tsementy, betony, stroitel'nye rastvory i sukhie smesi. Pod red. P.G. Komokhova [Modulus of elasticity of concrete. Part I. Cements, concretes, mortars and dry mixes. Edited by P.G. Komokhov]. Saint Petersburg: Professional. 2007, pp. 282–298.
6. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Liventseva A.A. Analytical dependences of the effect of material density on the strength and deformability of structural concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 5, pp. 58–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>
7. Gornov A.A. Industrial housing construction on the basis of light concrete. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 5, pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-45-35-40>

## МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Авторы: А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов, В.А. Шашкин, М.А. Шашкин  
(практическое руководство под редакцией д.г.-м.н. Шашкина А.Г.)  
Санкт-Петербург: Геореконструкция, 2021. 640 с.

В монографии раскрывается содержание мониторинга механической безопасности при новом строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений. Показывается значение мониторинга не только как средства контроля за сохранностью городской застройки, но и как профилактического средства, позволяющего своевременно обнаружить и диагностировать негативные тенденции и принять адекватные меры по нормализации технического состояния сооружения. Отмечается необходимость построения мониторинга как интерактивного процесса, базирующегося на компьютерной модели взаимодействия сооружения и основания. Это позволяет корректно интерпретировать результаты мониторинга, а также выполнять обратные расчеты для совершенствования исходных расчетных схем и физических моделей материалов и грунтов.



По вопросам приобретения обращайтесь:  
E-mail: [georeconstruction@gmail.com](mailto:georeconstruction@gmail.com) WWW: [geo-bookstore.ru](http://geo-bookstore.ru)

## Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г.,  
Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.  
Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов  
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.



По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»

Е.А. САДОВСКАЯ<sup>1</sup>, магистр (elena\_koleda@bk.ru);  
С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, профессор, иностранный академик РААСН  
(sleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by)

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

<sup>2</sup> Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

## Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний

Исследовано практическое использование методов определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве: внецентренное сжатие кубов с надрезами и четырехточечный изгиб балки с надрезом. При неравновесных испытаниях значение КИН рассчитывалось по величине разрушающей нагрузки. При равновесных испытаниях величина КИН определялась из полной равновесной диаграммы деформирования с учетом энергетических показателей разрушения. В испытании использовался нанофибробетон, в котором на уровне цементирующего вещества в качестве ингибиторов распространения трещин используются углеродные нанотрубки, а на уровне мелкозернистого бетона – различные фибровые волокна макроразмера. В результате испытаний установлено, что методы определения КИН по кубам с надрезом и по диаграммам деформирования показали хорошую степень сходимости. Фибровое армирование оказывает влияние на вязкость разрушения наноцементного композита, причем высокомодульная фибра оказывает большее влияние по показателю вязкости разрушения, чем низкомодульная. Коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем для сравнения разных типов фибрового армирования по их влиянию на вязкость разрушения.

**Ключевые слова:** нанофибробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, нанотрубки, дисперсное армирование, диаграмма деформирования, энергозатраты.

**Для цитирования:** Садовская Е.А., Леонович С.Н. Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-46-51>

Е.А. SADOVSKAYA<sup>1</sup>, Master (elena\_koleda@bk.ru);

S.N. LEONOVICH<sup>1,2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Foreign Academician of RAACS

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus)

<sup>2</sup> Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

### Comparative Analysis of Calculation of the Stress Intensity Factor Based on the Results of Equilibrium and Non-Equilibrium Tests

The practical use of methods for determining the stress intensity factor (SIF) at normal separation was studied: eccentric compression of notched cubes and four-point bending of a notched beam. During non-equilibrium tests, the SIF value was calculated from the value of the breaking load. During equilibrium tests, the SIF value was determined from the complete equilibrium deformation diagram, taking into account the energy indicators of destruction. The test used nanofiberconcrete, in which carbon nanotubes are used as crack propagation inhibitors at the level of the cementing agent, and various macro-sized fibers are used at the level of fine-grained concrete. As a result of the tests, it was found that the methods for determining the SIF from cubes with a notch and from deformation diagrams showed a good degree of convergence. Fiber reinforcement has an effect on the fracture toughness of a nano-cement composite, and a high-modulus fiber has a greater effect on the fracture toughness index than a low-modulus one. The stress intensity factor is a good indicator for comparing different types of fiber reinforcement in terms of their effect on fracture toughness.

**Keywords:** nanofiber-reinforced concrete, crack resistance, fracture toughness, stress intensity factor, nanotubes, dispersed reinforcement, deformation diagram, energy consumption.

**For citation:** Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Comparative analysis of calculation of the stress intensity factor based on the results of equilibrium and non-equilibrium tests. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 46–51. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-46-51>

Нанофибробетон, с точки зрения многоуровневой системы [1], представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементирующего вещества и мелкозернистого бетона. В качестве ингибиторов рассматриваются угле-

родные нанотрубки [2–4] и различные фибровые волокна макроразмера (рис.1) [5, 6].

Одной из отличительных особенностей дисперсно-армированных бетонов является повышенный показатель трещиностойкости [7]. Трещиностойкость



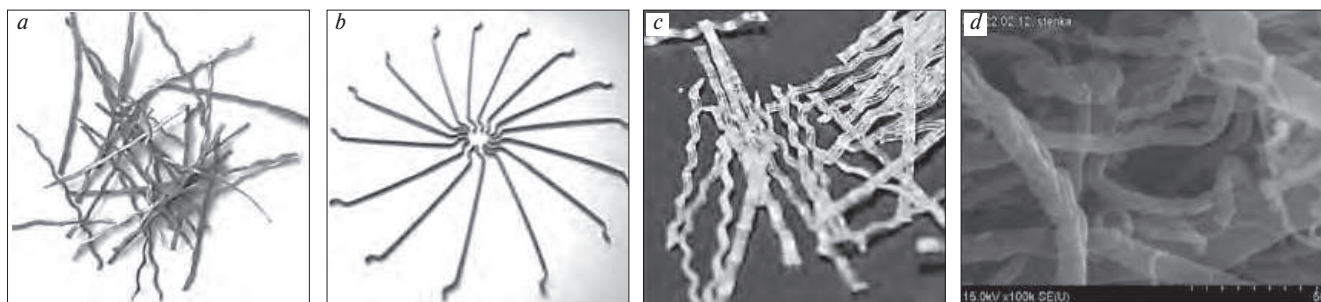


Рис. 1. Фибра: а – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ–0,9–50); б – из стальной проволоки с анкерами (ФПА–1,0); в – полимерная волнистая (ФПВ–0,6–40); д – углеродные нанотрубки [6]  
 Fig. 1. Fiber: а – from sheet steel of a wave profile (FLV–0.9–50); б – made of steel wire with anchors (FPA–1.0); в – polymeric wavy (FPV–0.6–40); д – carbon nanotubes [6]

(вязкость разрушения) характеризуется величиной коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Существование множества расчетных и практических способов определения КИН [8–11], а также регулярное появление новых, свидетельствует о трудностях в реализации и наличии неточностей при их использовании.

**Целью исследования** является разработка надежной методики расчета коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве конструкционного нанопластикобетона на основе результатов равновесных и неравновесных испытаний.

**Материалы и методы исследования**

Для проведения исследования использовались следующие виды материалов: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок строительный I кл.; щебень гранитный III гр.; сульфаталюминатная добавка РСАМ, микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ–85); химическая добавка Реламикс ПК; наномодифицированная химическая добавка АРТ-Конкрет Р (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20 мкм) и пластификатора).

Образцы изготавливались из составов нанобетонных смесей А, Б, В, Г (табл. 1) с добавлением различного типа и количества дисперсных волокон: Ф1 – фибра стальная волновая из листа (80 кг); Ф2 – фибра стальная проволочная анкерная (80 кг); Ф3 – фибра полимерная волнистая (4 кг).

**Нормальный отрыв по кубам с надрезом.** Для испытаний использовались образцы-кубы 100×100×100 мм с надрезами в виде симметричных надрезов глубиной  $h/4$  (где  $h$  – высота куба) выполненных с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Испытания проводятся при внецентренном сжатии (рис. 2). Нагружение осуществляется до момента разделения образца на две части или образования трещины и регистрируется значение разрушения  $F_{IC}$ .

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения на нормальный отрыв рассчитывается по формуле:

$$K_c^* = \frac{F_k}{b \cdot h^{1/2}} \left[ 18,3 \left( \frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \left( \frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \left( \frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \left( \frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \left( \frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (1)$$

где  $F_{IC}$  – нагрузка, при которой происходит разрушение, в МН;  $b$  – ширина образца, м;  $h$  – высота образца, м;  $a$  – глубина надреза, м,  $a = h/4$ .

**Нормальный отрыв при изгибе балок.** Образцы-призмы 100×100×400 с надрезом в средней трети испытывались на растяжение при изгибе ( $f_{ct,fl}$ ) по четырехточечной схеме нагружения с фиксированием полной равновесной диаграммы разрушения [12] (рис. 3).

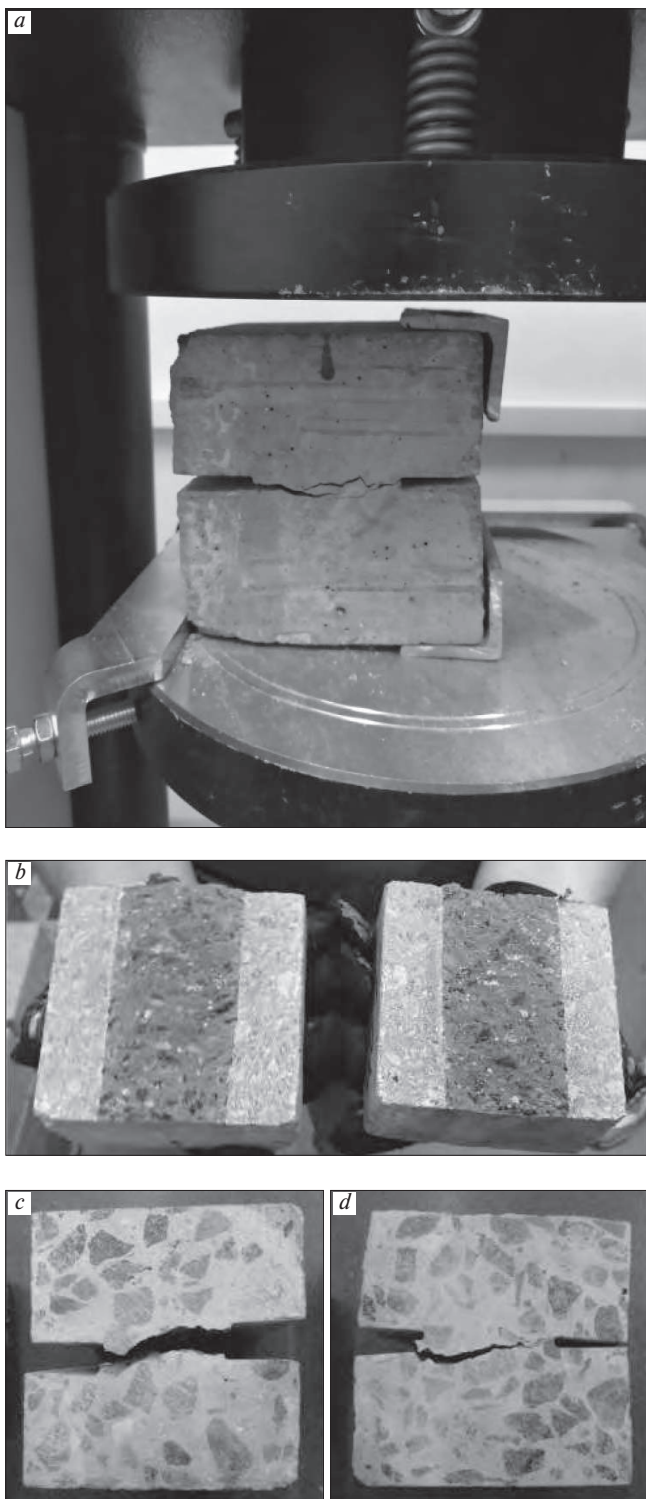
Статический критический коэффициент интенсивности напряжений (ГОСТ 29167–91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»):

$$K_i = \sqrt{G_i E_b} \quad (2)$$

Таблица 1  
Table 1

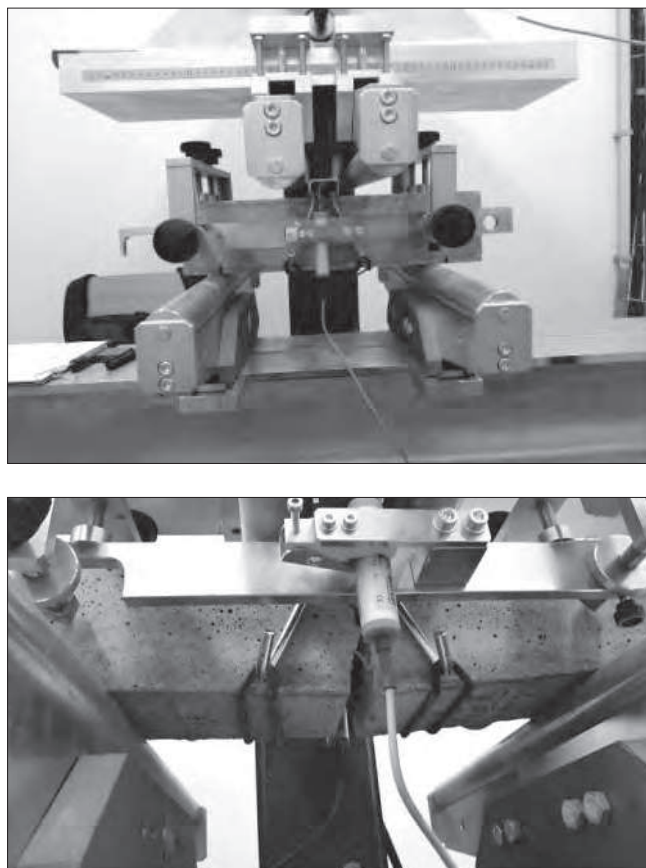
Рецептуры исследуемых составов  
The formulations of the studied compositions

Состав	Цемент	РСАМ / МКУ–85	Щебень фр. 5–20 мм	Щебень фр. 5–10 мм	Песок	Химическая добавка «АРТ-Конкрет Р» (% от массы вяжущего)
А	400	–	1020	–	820	3,2 (0,8)
Б	445	–	1035	–	820	2,22 (0,5)
В	460	–	–	880	950	3,22 (0,7)
Г	485	40/45	–	825	800	4,65 (0,7)



**Рис. 2.** Испытание на нормальный отрыв по кубам с надрезом: *a* – внешний вид испытания; *b* – половинки образца после испытаний; *c* – испытанный бетонный образец; *d* – испытанный нанофибробетонный образец  
**Fig. 2.** Test for normal separation on cubes with a notch: *a* – the appearance of the test; *b* – sample halves after testing; *c* – tested concrete sample; *d* – tested nanofiber concrete sample

где  $G_i$  – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины Дж/м<sup>2</sup>;  $E_{fb}$  – начальный модуль упругости



**Рис. 3.** Испытание образцов-балок на растяжение при изгибе  
**Fig. 3.** Tensile testing of beam specimens in bending

нанофибробетона (ГПа), определяется по формуле (СП 52–104–2006):

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_f) + \mu_f E_f \quad (4)$$

где  $E_b$  – модуль упругости бетона, здесь принят нормативный;  $E_f$  – модуль упругости фибры;  $\mu_f$  – коэффициент фибрового армирования по объему.

В нанофибробетонном материале наблюдается выраженный пластический характер работы на растяжение после начала трещинообразования. При этом может быть достигнуто проявление так называемого деформационного квазиупрочнения, которое характерно тем, что после начала трещинообразования следует стадия пластической работы материала на растяжение. В этом случае воспринимаемые напряжения могут превышать напряжения, вызывающие образование трещин.

При наличии на диаграмме зоны квазиупрочнения после появления первой трещины деформации не концентрируются в одной этой трещине [12]. Материал сохраняет способность распределять трещины по длине растянутой зоны образца, при этом трещины сохраняют очень малое раскрытие. Это обеспечивается благодаря тому, что распределенная по всему объему фибра при достаточном модуле упругости ее материала, прочности и заделке в матрицу полно-

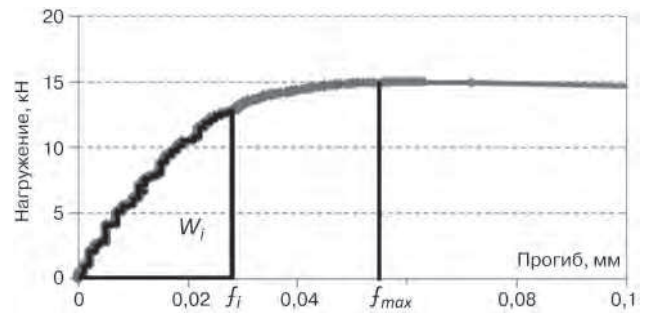
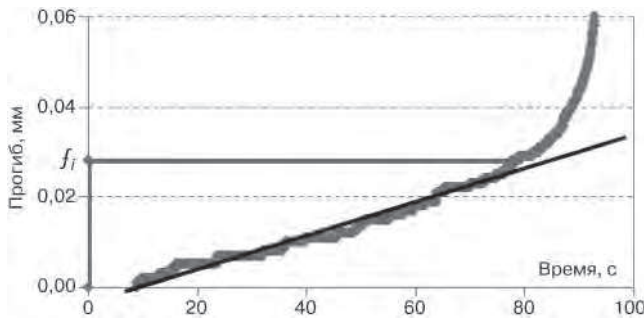


Рис. 4. Графики деформирования  
Fig. 4. Graphs of deformation

стью воспринимает растяжение с бетона-матрицы в полости зародившейся трещины, не позволяя ей резко увеличиться. Отсутствие проявлений хрупкости в работе на растяжение позволяет принимать в прочностных расчетах достаточно большие значения сопротивлений материала растяжению. При проектировании это делает баланс расчетных проверок прочности и трещиностойкости сходным с тем, который характерен для железобетона, т.е. при обычном стержневом армировании.

По полученным данным строится график Прогиб-Время и Нагрузка-Прогиб. Поскольку энергия на страгивание магистральной трещины (сумма упругой энергии и энергии микротрещинообразования), являясь площадью под кривой может возрастать в десятки раз в зависимости от точки перелома. Старт магистральной трещины при испытании неармированного бетона, как правило, совпадает с моментом разрушения образца. Для определения момента старта магистральной трещины при испытании наноприфибробетонных балок необходима экспертная оценка исследователя (рис. 4).

Анализируя полученные диаграммы деформирования можно получить некоторые важные пара-

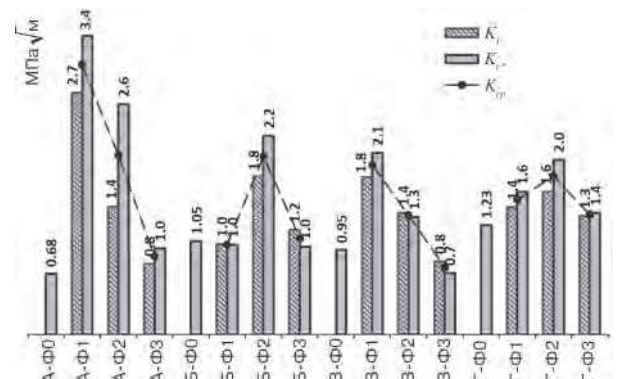


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений для наноприфибробетона  
Fig. 5. Stress intensity factor for nanofibre-reinforced concrete

метры, характеризующие качество исследуемого материала: прочность на растяжение при изгибе, прогиб при максимальной нагрузке ( $z_{max}$ ), удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины ( $G_i$ ) (табл. 2).

Полученные значения коэффициента интенсивности напряжений при испытании методом нормального отрыва по кубам с надрезом ( $K_c^*$ ), при испытании

Таблица 2  
Table 2

Параметры наноприфибробетона из равновесных диаграмм деформирования  
Parameters of nanofiber-reinforced concrete from equilibrium strain diagrams

Состав	Максимальное напряжение, кН $F$	Приведенная прочность, МПа $f^* = \frac{F \cdot l}{b(h-a)^2}$	Прогиб при максимальном нагружении, мм $f_{max}$	Удельные энергозатраты, Дж/м <sup>2</sup> $G_i = W_i/A_c$	Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа√м		Относительное отклонение от среднего значения, %
					$K_i$	$K_c^*$	
А-Ф1	14,404	6,82	0,501	144,34	2,7	3,37	11
Б-Ф1	14,97	6,91	0,2	26,56	1,0	1,01	0
В-Ф1	16,011	7,58	0,671	91,75	1,8	2,05	7
Г-Ф1	18,211	8,01	0,051	39,86	1,4	1,61	6
А-Ф2	23,627	11,19	0,731	53,76	1,4	2,6	29
Б-Ф2	16,207	7,67	0,671	82,28	1,8	2,24	11
В-Ф2	16,313	7,72	0,2	55,12	1,4	1,32	2
Г-Ф2	25,293	11,98	0,325	68,85	1,6	1,97	10
А-Ф3	15,613	7,39	0,671	17,19	0,8	0,97	10
Б-Ф3	15,111	7,15	0,055	37,59	1,17	0,99	8
В-Ф3	11,121	5,27	0,051	21,04	0,8	0,69	9
Г-Ф3	15,951	7,55	0,055	33,44	1,3	1,37	1

на четырехточечный изгиб балок с надрезом ( $K_i$ ) и усредненный показатель ( $K_{cp}$ ) отображены на рис. 5.

### Анализ результатов

Наблюдается хорошая сходимостъ результатов испытаний используемыми методами испытаний. Тенденция изменения показателя вязкости разрушения, полученная разными методами испытаний имеет одинаковый характер.

В составах А и В высокомодульная стальная фибра (Ф1 и Ф2) в большей степени влияет на показатель вязкости разрушения, чем низко модульная (Ф3).

В составах Б и Г стальная проволочная фибра (Ф2) оказала наибольший эффект на показатель вязкости разрушения.

Во всех составах влияние полимерной фибры на значение КИН меньше всего и в ряде случаев величина близка к неармированным составам. Фибро-

вое армирование стальной листовой фиброй (Ф1) дает менее устойчивые показатели по вязкости разрушения, чем при армировании стальной проволочной (Ф2).

### Выводы

1. Методы определения КИН по кубам с надрезом и по диаграммам деформирования показали хорошую степень сходимости.

2. Коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем для сравнения разных типов фибрового армирования по их влиянию на вязкость разрушения.

3. Высокомодульная фибра оказывает большее влияние по показателю вязкости разрушения, чем низко модульная.

4. Фибровое армирование оказывает влияние на вязкость разрушения наноцементного композита.

### Список литературы

1. Садовская Е.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов. *Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции*. Минск. 28 мая 2019 г. С. 285–297.
2. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Садовская Е.А., Леонович С.Н. Вязкость разрушения цементных материалов, модифицированных углеродными нанотрубками. *Вестник БрГТУ*. 2021. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
3. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталев Б.М., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 1. С. 14–20.
4. Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики нанобетона // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4 (37). С. 100–111.
5. Садовская Е.А., Леонович С.Н., Жданок С.А., Полонина Е.Н. Прочность нанофибробетона на растяжение // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 4. С. 1051–1055.
6. Жданок С.А. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2009. № 3. С. 5–22.
7. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий

### References

1. Sadovskaya E.A., Polonina E.N., Leonovich S.N. Multilevel structure of concrete: analysis and classification of levels of organization of the structure of conglomerate building composites. *Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk. May 28, 2019. pp. 285–297. (In Russian).
2. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Fracture toughness of cement materials modified with carbon nanotubes. *Vestnik of BrGTU*. 2021, pp. 48–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
3. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. Physico-mechanical characteristics of concrete modified with a plasticizing additive based on nanostructured carbon. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 14–20. (In Russian).
4. Polonina E.N., Leonovich S.N., Koleda E.A. Physical and mechanical characteristics of nanoconcrete. *Vestnik of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2018. No. 4 (37), pp. 100–111. (In Russian).
5. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile strength of nanofiber-reinforced concrete. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055. (In Russian).
6. Zhdanok S.A. Nanotechnologies in building materials science: reality and prospects. *Vestnik of the Belarusian National Technical University*. 2009. No. 3, pp. 5–22. (In Russian).
7. Koleda E.A., Leonovich S.N. Characteristics of crack resistance of fiber-reinforced concrete as a determin-

фактор качества // *Технология строительства и реконструкции: TCR–2015: сборник докладов Международной научно-технической конференции* Минск: БНТУ, 2017. С. 282–287.

8. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона // *Сборник научных трудов РААСН*. 2019. Т. 2. С. 448–457.
9. Садовская Е.А., Леонович С.Н., Полонина Е.Н., Будревич Н.А. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2021. Т. 17. № 2. С. 85–92.
10. Садовская Е.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Жданок С.А., Потапов В.В. Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве для нанофибробетона // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Zhang P., Yang Y., Wang J., Jiao M., Ling Y. Fracture models and effect of fibers on fracture properties of cementitious composites—a review // *Materials*. 2020. 13:5495. DOI: 10.3390/ma13235495
12. Hamadd A.J., Sldozian R.J.A. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete-american standard specifications review. *GRDJE*. Vol. 4. Iss. 3. 002

ing factor of quality. *Technology of Construction and Reconstruction: TCR–2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU. 2017, pp. 282–287. (In Russian).

8. Puharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Methods for determining the characteristics of crack resistance of fiber-reinforced concrete. *Collection of scientific papers of the RAACS*. 2019. Vol. 2, pp. 448–457. (In Russian).
9. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Polonina E.N., Budrevich N.A. A method for quality control of steel fiber reinforced concrete by the stress intensity factor at normal separation. *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2021. Vol. 17. No. 2, pp. 85–92. (In Russian).
10. Sadovskaya E.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Potapov V.V. Critical stress intensity coefficient at transverse shear for nanofibrobeton. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Zhang P., Yang Y., Wang J., Jiao M., Ling Y. Fracture models and effect of fibers on fracture properties of cementitious composites—a review. *Materials*. 2020. 13:5495. DOI: 10.3390/ma13235495
12. Hamadd A.J., Sldozian R.J.A. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete-american standard specifications review. *GRDJE*. Vol. 4. Iss. 3. 002

## 5-7 апреля 2023 г.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

# СПТОКРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

## ЦВК ЭКСПОЦЕНТР павильон № 8



**СПТОКРАНЫ**  
СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ



ЭКСПО ДИЗАЙН  
ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ

**WWW.CRANE-EXPO.RU**

Д.Ю. СНЕЖКОВ<sup>1</sup>, инженер;  
С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);  
Н.А. БУДРЕВИЧ<sup>1</sup>, инженер; MIAO JIJUN<sup>2</sup>, инженер

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

<sup>2</sup> Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

## Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами

Целью работы являлось исследование однородности структуры буронабивных свай, определение фактической их длины, выявление дефектов свай методами: межскважинный ультразвуковой (УЗ) мониторинг (CHUM – Crosshole Ultrasonic Method), эхоимпульсный метод (PEM – Puls Echo Method). Объект исследования – буронабивные железобетонные сваи диаметром ~800 мм. На основе полученных в ходе экспериментальных исследований данных сделаны выводы о длине свай, дефектах сплошности буронабивных свай.

**Ключевые слова:** сваи буронабивные, неразрушающий контроль, эхоимпульсный метод, межскважинный ультразвуковой мониторинг.

**Для цитирования:** Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А., Miao Jijun. Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59>

D.Yu. SNEZHKOVA<sup>1</sup>, Engineer;  
S.N. LEONOVICH<sup>1,2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering, Foreign Member of RAACS (sleonovich@mail.ru);  
N.A. BUDREVICH<sup>1</sup>, Engineer; MIAO JIJUN<sup>2</sup>, Engineer  
<sup>1</sup> Belorussian National Technical University (65 Prospect Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus)  
<sup>2</sup> Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

### Evaluation of the Quality of Bored Piles by Seismoacoustic and Interwell Ultrasonic Methods

The aim of the work was to study the uniformity of the structure of bored piles, to determine their actual length, to identify pile defects by methods: inter-well ultrasonic (US) monitoring (CHUM – Crosshole Ultrasonic Method), echo-pulse method (PEM – Puls Echo Method). The object of study is bored reinforced concrete piles with a diameter of ~800 mm. Based on the data obtained in the course of experimental studies, conclusions were made about the length of the pile, defects in the continuity of bored piles.

**Keywords:** bored piles, non-destructive control, echo-pulse method, interwell ultrasonic monitoring.

**For citation:** Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N., Budrevich N.A., MIAO JIJUN. Evaluation of the quality of bored piles by seismoacoustic and interwell ultrasonic methods. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 52–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59>

Устройство свайных фундаментов является одним из основных и важных видов работ в строительстве [1–3 и др.]. Как правило, некоторая часть буронабивных свай после их устройства имеют дефекты. Чтобы избежать серьезных проблем при строительных работах, связанных с нарушением сплошности ствола свай, необходимо производить ее оценку неразрушающим методом сразу после их устройства с целью выявления дефектов на ранней стадии строительства. Основные преимущества неразрушающего метода: быстрое получение данных и возможность проверки большого количества данных; определение длины сваи в пределах 80 м; выявление дефектов разного характера в стволе сваи; возможность

диагностики любой сваи одним человеком самостоятельно [4–7].

### Методика испытаний и приборы контроля

Основу метода CHUM составляет продольное профилирование тела сваи путем регистрации скорости/времени распространения ультразвукового импульса в направлении, поперечном по отношению к оси буронабивной сваи [8, 9]. Генерацию и прием УЗ импульса производят отдельными преобразователями, которые размещают в трубах доступа (ТД), предварительно заполняемых водой. Оба преобразователя устанавливаются на одном горизонтальном уровне, после чего производится измерение

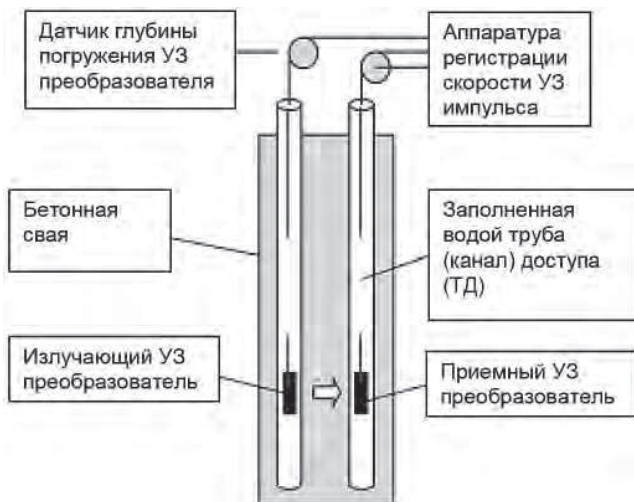


Рис. 1. Схема проведения испытаний межскважинным ультразвуковым методом CHUM (ASTM D6760-16 «Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing»)

Fig. 1. Scheme of testing by ultrasonic crosshole testing method CHUM (ASTM D6760-16 «Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing»)



Рис. 2. Ультразвуковые сенсоры и датчики погружения в рабочих позициях на каналобразующих трубах испытываемой сваи

Fig. 2. Ultrasonic sensors and immersion sensors in working positions on the channel-forming pipes of the tested pile

скорости/времени распространения УЗ импульса. После регистрации УЗ импульса преобразователи смещаются на один шаг профилирования и процедура измерения повторяется. Принципиальная схема представлена на рис. 1. Ультразвуковые сенсоры и датчики погружения в рабочих позициях представлены на рис. 2.

Испытания целостности конструкции методом PEM (рис. 3) осуществляется путем формирова-

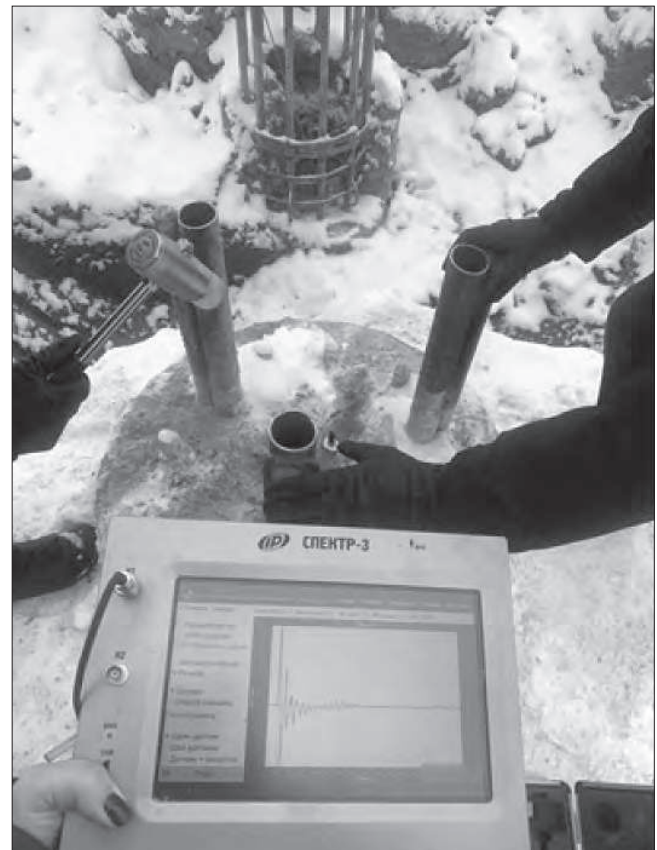


Рис. 3. Испытания методом PEM

Fig. 3. PEM testing

ния импульса акустической волны и регистрации импульсов, возникающих при отражении зондирующего импульса от неоднородностей в теле сваи (Standard ASTM D5882-16: «Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations»). Информационными параметрами являются измеренные колебательные скорости и ускорения зон контроля при прохождении акустической волны в теле сваи и характеристические временные интервалы, соответствующие глубине расположения участков отражения акустического импульса. Ориентировочное значение скорости распространения акустической волны в бетоне сваи определялось по ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» ультразвуковым прибором «Пульсар-2.2 ДБС».

Отражение волны от границы раздела сред происходит из-за изменения полного акустического импеданса сваи.

Акустический импеданс  $Z$  определяется как:

$$Z = S \cdot \sqrt{E \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь сечения сваи;  $E$  – модуль упругости;  $\rho$  – плотность материала сваи.

Любое изменение  $S$ ,  $E$  или  $\rho$  приведет к изменению импеданса и, как следствие, к отражению аку-

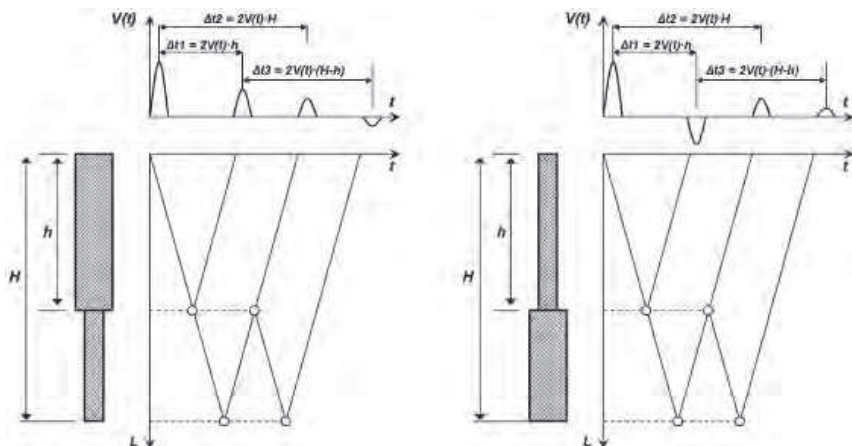


Рис. 4. Влияние формы сваи на форму акустического отклика  
Fig. 4. Influence of the pile shape on the shape of the acoustic response

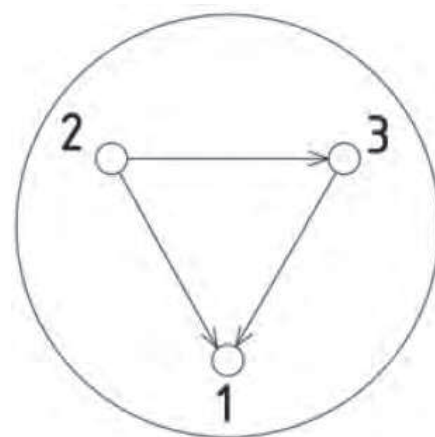


Рис. 6. Схемы расположения труб доступа (ТД) и трасс (сечений) по методу СЧУМ: 1-2 → — направление трасс испытаний бетона опытных свай

Fig. 6. Layouts of access pipes (AP) and routes (sections) according to the CHUM method: 1-2 → — direction of concrete testing routes for experimental piles

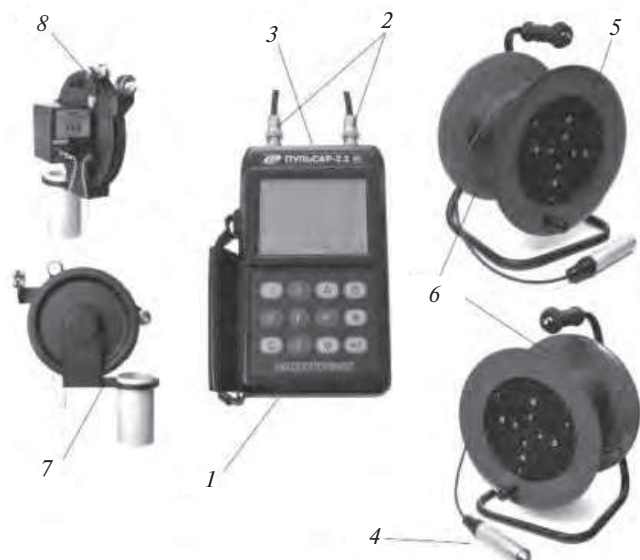


Рис. 5. Состав измерительного комплекта «Пульсар-2.2 ДБС»: 1 – электронный блок; 2 – разъемы для подключения УЗ датчиков; 3 – разъем для подключения датчиков длины кабеля; 4 – УЗ датчик; 5 – смотчки кабеля; 6 – кабель для подключения УЗ датчиков (10 м); 7 – датчик положения (энкодер) Н1; 8 – датчик положения (энкодер) Н2

Fig. 5. The composition of the measuring set «Pulsar-2.2 DBS»: 1 – electronic unit; 2 – connectors for connecting ultrasonic sensors; 3 – connector for connecting cable length sensors; 4 – ultrasonic sensor; 5 – cable winders; 6 – cable for connecting ultrasonic sensors (10 m); 7 – position sensor (encoder) H1; 8 – position sensor (encoder) H2

стической волны. Отражения могут быть вызваны следующими причинами: достижением акустической волны конца сваи; уменьшением/увеличением поперечного сечения; потерей сплошности (попаданием грунта, воды, воздуха в тело сваи, образованием поперечных трещин); изменением физико-механических свойств бетона по длине сваи; контрастной сменой слоев грунта по глубине расположения сваи.

Не вызывают отражения следующие дефекты: постепенное (на протяжении нескольких диаметров)



Рис. 7. Общий вид прибора «Спектр-3.0»: 1 – сейсмоприемник; 2 – устройство для записи, обработки и отображения данных  
Fig. 7. The «Spektr-3.0» device: 1 – geophone; 2 – device for recording, processing and displaying data

изменение диаметра сваи; изогнутая форма сваи; мелкие дефекты.

От знака изменения импеданса на границе раздела сред зависит знак отражения (рис. 4).

### Приборы и оборудование

Ультразвуковые измерения по методу СЧУМ выполняются с использованием приборного комплекта «Пульсар-2.2 ДБС». Состав комплекта приведен на рис. 5.

Для проведения испытаний в стволы изготавливаемых опытной и анкерных свай в арматурные кар-



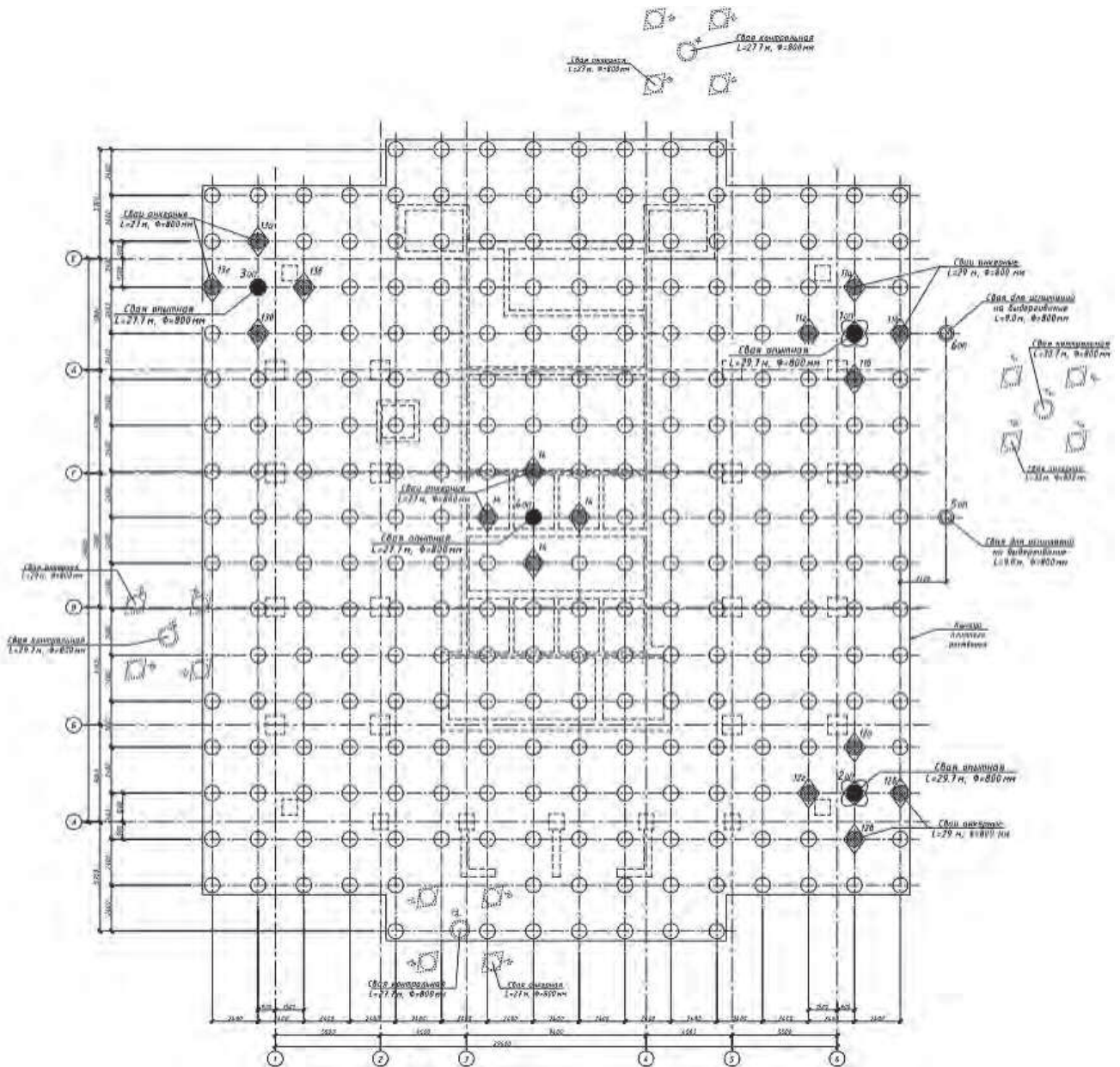


Рис. 8. План расположения буронабивных свай  
 Fig. 8. Plan of the location of bored piles

касы устанавливаются вертикальные металлические трубы (каналы) доступа (ТД) с внутренним диаметром  $\geq 50$  мм, заполняемые водой.

Изготовление опытных свай предусматривает установку трех (четырёх) труб доступа. На рис. 6 показана схема прозвучивания тела сваи в плане ее поперечного сечения. Это позволяет произвести измерения по трем направлениям (рис. 6), захватывающим периферию сечения сваи, где наиболее вероятно образование дефектов сплошности.

Крепление труб к каркасу должно обеспечивать их вертикальность и неизменяемость положения во время бетонирования. Отклонение труб доступа от вертикали не должно превышать 1–1,5% по длине

ствола. Нижний торец труб должен находиться на уровне нижнего торца сваи. На нижних торцах труб были установлены заглушки для обеспечения герметичности канала доступа. Для верхних торцов труб были предусмотрены съемные (срезаемые) заглушки в целях предохранения трубы от попадания в них бетона и посторонних предметов.

Испытания целостности конструкции методом РЕМ выполняются с использованием приборного комплекса «Спектр-3.0». Состав комплекса приведен на рис. 7.

Сейсмоприемник 1 воспринимает механические колебания исследуемого объекта, преобразует их в электрический сигнал и передает его в электронный

Таблица 1  
Table 1

**Результаты ультразвуковых измерений  
Results of ultrasonic tests**

№ сваи	Среднее время распространения УЗ импульса, мкс	Средняя скорость распространения УЗ импульса (база 0,12 м), м·с <sup>-1</sup>
1оп	30,4	3947
2оп	30,35	3954
3оп	30,31	3960
4оп	30,85	3890
5оп	Не было доступно	
6оп	Не было доступно	

Таблица 2  
Table 2

**Результаты контроля свай сейсмоакустическим методом (PEM)  
Results of Pile Inspection by Puls Echo Metod (PEM)**

№ сваи	Глубина эхоотклика УЗК, м						Предполагаемая длина	Примечание
	Echo 1	Echo 2	Echo 3	Echo 3	Echo 5	Echo 6		
1оп	3	5-6	11-13	17	20	23	28-29	
2оп								
3оп		7	11-12		19	25-27	27	
4оп	2,5	8-9	11	15-16	20		29-31	
5оп								
6оп								

Таблица 3  
Table 3

**Результаты межскважинного УЗ мониторинга свай  
Results of cross-well ultrasonic monitoring of piles**

№ сваи	Трасса измерений	Отметка дефектности						Нижняя отметка, м
		3	5-7	12	20,5	23-24	27	
1оп	1-2	3	5-7	12	20,5	23-24	27	29,5
	2-3	2-6	-	-	-	-	28	29,5
	1-3	2-6	-	13	-	-	-	29,5
2оп	1-2	2-11*	12-15				29,5	
	2-3	2-11*	12-17				29,5	
	1-3			12-15				29,5
3оп	1-2			7!	12,5-20*			27,5
	2-3			9				27,5
	1-3	1-2!	2,4-4,5	7!				27,5
4оп	1-2	(1-2)	2,5-4!	7,5-9,5				29,5
	2-3	(1-2)	2,5-4!	8-9	16-17,5			29,5
	1-3		2,5-4!		17,5-22			29,5
5оп	1-2	(2)	(5)					9
	2-3							9
	1-3	(1,5-2)						9
6оп	1-2	(2,5)	(8,5)	-	-	-	-	9
	2-3	(2,5)	(7)	-	-	-	-	9
	1-3	-	-	-	-	-	-	9

**Примечания:** В скобках – одиночные отсчеты со снижением скорости УЗК на 1-2 %; \* – снижение скорости УЗ импульса на 2,5-3,5 % на значительном интервале отметок; ! – значительное (>5%) снижение скорости УЗК; остальные значения соответствуют одиночным отсчетам со снижением скорости УЗК на 2-3%.

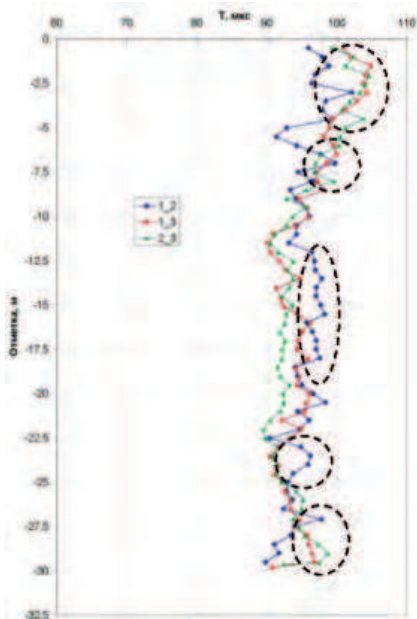


Рис. 9. Ультразвуковой профиль сваи 1оп  
Fig. 9. Ultrasonic pile profile 1оп

блок 2. Электронный блок оцифровывает сигнал, производит запись и последующую обработку полученного сигнала. Электронный блок выполнен на основе планшетного компьютера под управлением ОС Android.

**Результаты испытаний**

Испытаниям подвергались опытные сваи: 1оп, 2оп, 3оп, 4оп; две сваи, подготовленные для испытаний на выдергивание: 5оп и 6оп (рис. 8)

Для определения скорости распространения акустической волны  $V$  были выполнены ультразвуковые измерения на выступающих из грунта оголовках свай. Результаты измерений приведены в табл. 1–3.

**Свая 1оп**

Для сваи 1оп наблюдается значительная неоднородность структуры сваи в интервале отметок от -1 до -6 м, проявляющаяся разницей (более 10%) во времени распространения УЗ импульса по трем измерительным траекториям с выраженными пиками отклонений времени на отметках -3, -7, -12, -23 м (рис. 9). Указанные оценки хорошо коррелируют с данными сейсмоакустического метода (рис. 10). Длина сваи, по данным сейсмоаку-

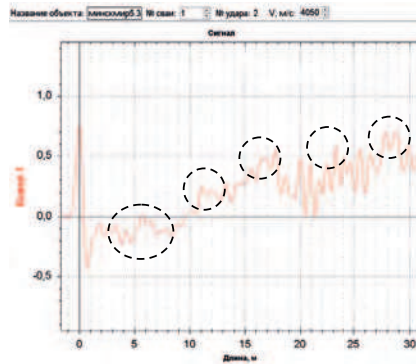


Рис. 10. Рефлектограммы сваи 1оп  
Fig. 10. Reflectograms of pile 1оп

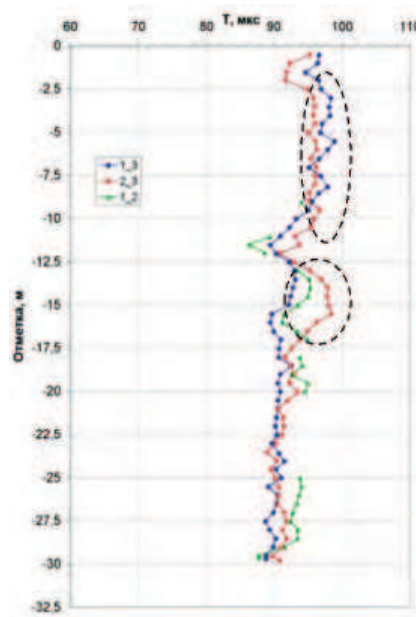
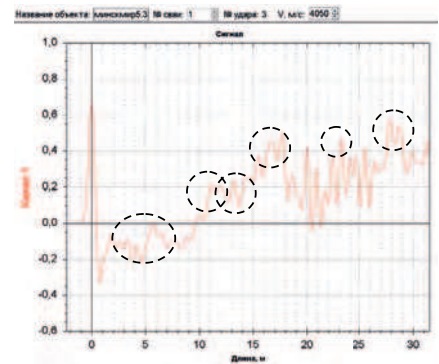


Рис. 11. Ультразвуковой профиль сваи 2оп  
Fig. 11. Ultrasonic pile profile 2оп

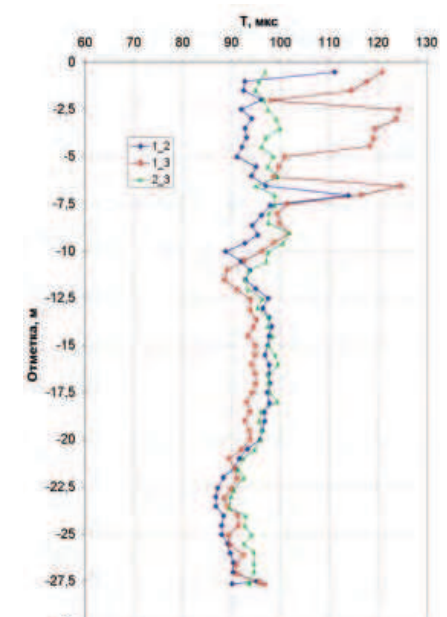


Рис. 12. Ультразвуковой профиль сваи 3оп  
Fig. 12. Ultrasonic pile profile 3оп

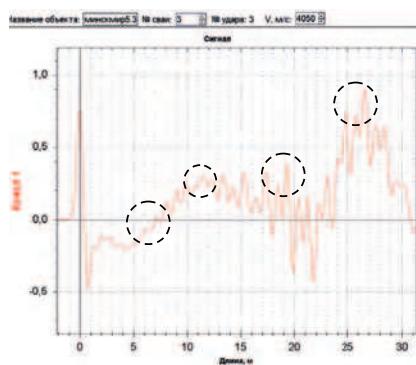
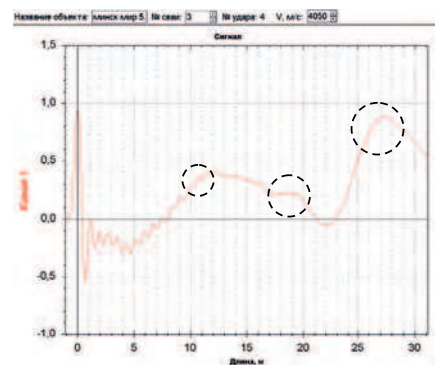


Рис. 13. Рефлектограммы сваи 3оп  
Fig. 13. Reflectograms of pile 3оп



стического метода, составляет 28–29 м; по данным УЗ испытаний – 29,5 м.

**Свая 2оп**

Для сваи 2оп выполнялся только УЗ мониторинг (рис. 11). Сейсмоакустический метод не ис-

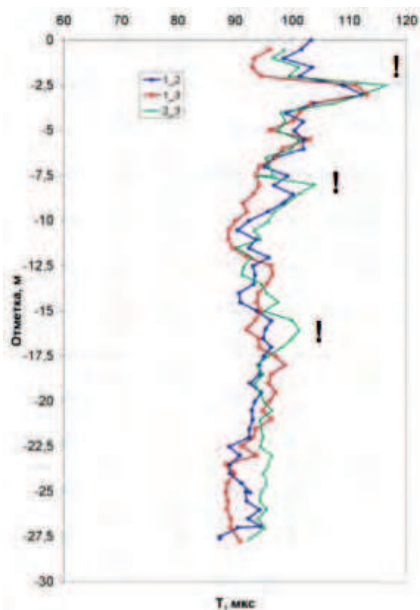


Рис. 14. Ультразвуковой профиль сваи 4оп  
Fig. 14. Ultrasonic pile profile 4оп

пользовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи. Выявлена выраженная зона неоднородности бетона в интервале отметок -12,5–15 м. В интервале отметок 2–11 м по всем траекториям наблюдалось равномерно «размытое» пониженное значение скорости УЗ на уровне 3% от среднего по всей свае.

**Свая 3оп**

По данным УЗ мониторинга зарегистрированы пиковые неоднородности структуры сваи в интервале отметок от -1–2 м, -2,5 – -4,5 м и на отметке -7 м, проявляющие себя разницей (~30%) во времени распространения УЗ импульса по двум измерительным траекториям. В интервале отметок -12,5 – -20 м наблюдалось равномерно «размытое» пониженное значение скорости УЗ на уровне 3–5% от среднего по всей свае (рис. 12). Наличие дефектов на отметках -7 и -12 м было подтверждено. Дефекты на отметках -2,5 и -4,5 м не обнаружены, что может свидетельствовать об их появлении после испытаний нагружением (рис. 13). Длина сваи составляет 27–27,5 м.

**Свая 4оп**

По данным УЗ мониторинга (рис. 14) зарегистрирована пиковая неоднородность структуры сваи в интервале отметок от -2,5 до -4 м, проявляющаяся разницей (~25–30%) во времени распространения УЗ импульса по всем трем измерительным траектори-

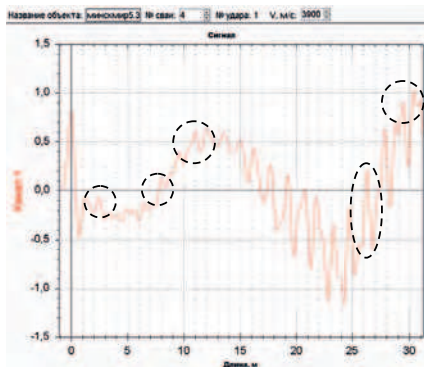


Рис. 15. Рефлектограммы сваи 4оп  
Fig. 15. Reflectograms of pile 4оп

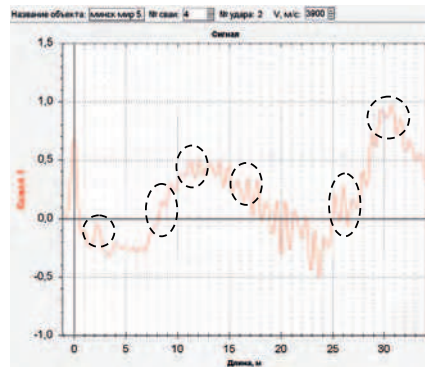


Рис. 16. Ультразвуковой профиль сваи 5оп  
Fig. 16. Ultrasonic pile profile 5оп

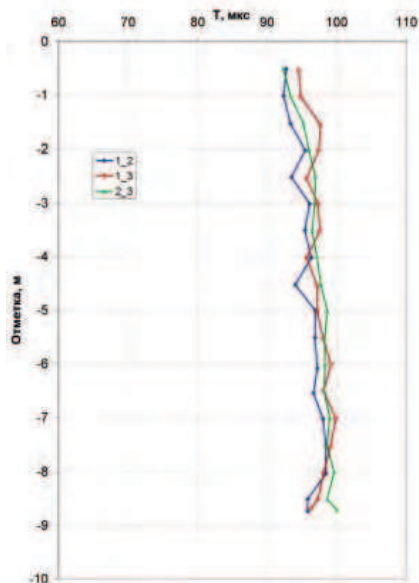
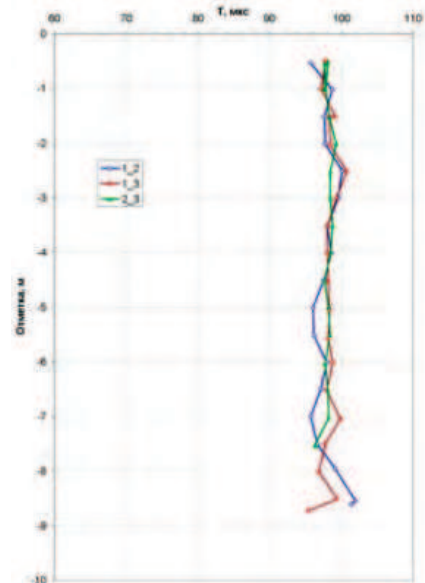


Рис. 17. Ультразвуковой профиль сваи 6оп  
Fig. 17. Ultrasonic pile profile 6оп



ям. Данные двух измерительных траекторий указывают на присутствие дефекта сплошности на отметках -7,5 – -9,5 м. Перечисленные дефекты регистрируются и сейсмоакустическим методом (рис. 15). По одной измерительной траектории регистрируется дефект сплошности на отметках в диапазоне 16–17,5 м, который подтверждается и данными сейсмоакустического метода. Длина сваи по данным сейсмоакустического метода 29–31 м.

**Свая 5оп**

Присутствуют относительно небольшие (в пределах 2%) снижения скорости УЗ (рис. 16) на отметках -1,5 и -7 м. Длина сваи соответствует проекту – 9 м. Сейсмоакустический метод контроля не использовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи. Наблюдается некоторое монотонное снижение на 2,5% как средней скорости УЗК, так и скорости УЗК по каждой измерительной траектории на протяжении всего ствола сваи, что может быть

обусловлено неточностью установки каналобразующих труб или изменением свойств бетонной смеси в процессе ее укладки.

### Свая боп

Сваю боп можно рассматривать как бездефектную. Присутствуют относительно небольшие (в пределах 2%) снижения скорости УЗ (рис. 17) на отметках -2,5 и -7 – 8 м. Длина сваи соответствует проекту – 9 м. Сейсмоакустический метод контроля

не использовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи.

### Вывод

Произведена оценка качества буронабивных свай двумя методами неразрушающего контроля: сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым. Выявлены различные дефекты, отклонения, изменения. Обсуждается достоверность и надежность полученных результатов.

### Список литературы

1. Пономарев А.Б. Свайные фундаменты как элементы устойчивого строительства // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2015. № 1. С. 103–119.
2. Опалихина А.А. Свайные фундаменты на винтовых сваях в условиях Крайнего Севера // *Инновационная наука*. 2018. № 6. С. 31–34.
3. Крутов В.И., Когай В.К., Глухов В.С. Свайные фундаменты из набивных свай в пробитых скважинах // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. № 2. С. 10–14.
4. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Будревич Н.А. Исследование качества буронабивных свай Impact-Echo методом (неразрушающий контроль). *Проблемы современного строительства: Материалы Международной научно-технической конференции*. Минск, 28 мая 2021. С. 258–269.
5. Liang M.T., Su P.J. Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using Impact-Echo method // *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. No. 10, pp. 1427–1436.
6. Liu P.-L., Yeh P.-L. Vertical spectral tomography of concrete structures based on Impact-Echo depth spectra // *NDT & E International*. 2010. Vol. 43. No. 1, pp. 45–53.
7. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Avramenko S.L. Problems of acoustic testing of large-size concrete building structures // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2008. Vol. 44. No. 12, pp. 812–819.
8. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // *Геотехника*. 2018. Т. 10. № 5–6. С. 62–71.
9. Arkhipov A. Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction // *Procedia Engineering*. 2016, pp. 11–18.

### References

1. Ponomarev A.B. Pile foundations as elements of sustainable construction. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2015. No. 1, pp. 103–119. (In Russian).
2. Opalikhina A.A. Pile foundations on screw piles in the conditions of the Far North. *Innovatsionnaya nauka*. 2018. No. 6, pp. 31–34. (In Russian).
3. Krutov V.I., Kogai V.K., Glukhov V.S. Pile foundations from stuffed piles in punched wells. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov*. 2010. No. 2, pp. 10–14. (In Russian).
4. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Budrevich N.A. Investigation of the quality of bored piles by the Impact-Echo method (non-destructive testing). *Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk, May 28, 2021, pp. 258–269. (In Russian).
5. Liang M.T., Su P.J. Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using Impact-Echo method. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. No. 10, pp. 1427–1436.
6. Liu P.-L., Yeh P.-L. Vertical spectral tomography of concrete structures based on Impact-Echo depth spectra. *NDT & E International*. 2010. Vol. 43. No. 1, pp. 45–53.
7. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Avramenko S.L. Problems of acoustic testing of large-size concrete building structures. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2008. Vol. 44. No. 12, pp. 812–819.
8. Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Kuvadin A.V. Possibilities of seismoacoustic and ultrasonic methods in quality control of pile foundations. *Geotekhnika*. 2018. Vol. 10. No. 5–6, pp. 62–71. (In Russian).
9. Arkhipov A. Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction. *Procedia Engineering*. 2016, pp. 11–18.

Е.А. ЧЕРНЫГОВ, научный сотрудник (yac.123@yandex.ru)

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

## Исследование работы с бетоном трехпроволочных канатов

Для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций широко применяется проволока и канаты, которые обладают высокими механическими свойствами. В настоящее время в мире разработана большая номенклатура высокопрочной проволоки и арматурных канатов, которые имеют широкую градацию как по геометрическим свойствам, так и по прочности. Однако их применение в железобетонных конструкциях сдерживается из-за отсутствия исследований их работы с бетоном. В статье приведены результаты экспериментальных исследований сцепления трехпроволочного арматурного каната и проволоки с двухсторонним периодическим профилем, а также приведены предложения по расчету базовой длины анкеровки, необходимой для передачи усилия на бетон.

**Ключевые слова:** анкеровка, проволока, канат, сцепление, бетон.

**Для цитирования:** Черныгов Е.А. Исследование работы с бетоном трехпроволочных канатов // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-60-65>

Е.А. CHERNYGOV, Researcher (yac.123@yandex.ru)

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev  
(6, bldg. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### Investigation of the Work of Three Wire Strands with Concrete

For the reinforcement of prestressed reinforced concrete structures, wire and strands, which have high mechanical properties, are widely used. Currently, a large range of high-strength wire and reinforcing strands has been developed in the world, which have a large gradation, both in geometric properties and strength. However, their use in reinforced concrete structures is hindered due to the lack of research on their work in concrete. The article presents the results of experimental studies of the coupling of a three-wire reinforcing strand and a wire with a two-sided periodic profile, as well as suggestions for calculating the base length of the anchorage required to transfer the force to concrete.

**Keywords:** anchorage, wire, strand, clutch, concrete.

**For citation:** Chernygov E.A. Investigation of the work of three wire strands with concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 60–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-60-65>

Для преднапряженных конструкций разработана широкая номенклатура напрягаемой проволочной арматуры, представленная как высокопрочной проволокой, так и арматурными канатами различных конструкций. Объем применения такой арматуры находится на достаточно высоком уровне за счет применения технологий безопалубочного формования, а также технологий натяжения на бетон в построечных условиях.

В настоящее время для армирования железобетонных конструкций наиболее востребованы арматурные канаты, так как они обладают высокими прочностными и эксплуатационными свойствами, при этом обладая большим поперечным сечением; по сравнению с высокопрочной проволокой они более технологичны на производстве и позволяют проектировать конструкции, рассчитанные на большие нагрузки.

Трехпроволочные канаты являются одной из первых конструкций витой проволочной арматуры, которую начали применять начиная с 1930-х гг. для армирования преднапряженных плит, причем первые канаты изготавливались непосредственно на заво-

дах ЖБИ. Позднее, с развитием технологий метизного производства, были проведены исследования по изучению влияния конструкции и геометрических характеристик трехпроволочных канатов на эксплуатационные свойства и их работу с бетоном [1–6]. В исследованиях отмечено хорошее сцепление с бетоном трехпроволочных канатов, которое при определенных условиях оказалось даже выше, чем у семипроволочных канатов [1], а полученные данные однозначно показывали возможность применения их в качестве рабочей арматуры преднапряженных железобетонных конструкций. Несмотря на это, в нашей стране такие канаты не получили широкого развития по ряду причин производственного и экономического характера, за исключением отдельных опытно-промышленных партий, поэтому в РФ в отличие от зарубежных стран номенклатура канатов ограничена только семипроволочными канатами. В зарубежных странах требования к трехпроволочным канатам прописаны в зарубежных стандартах и нормах по проектированию (prEN 10138 Part 1, 2, 3 Prestressing steel; EN 1992-1-1 Eurocode 2.

Design of concrete structures. Part 1-1 General rules and rules for buildings; ASTM A910/A910M Standard Specification for uncoated, weldless, 2-wire and 3-wire steel strand for prestressed concrete).

Принимая во внимание современный уровень производства арматурных канатов в мире, а также уровень развития технологий строительства, целесообразно рассмотреть более подробно свойства и работу с бетоном современных трехпроволочных канатов с целью расширения номенклатуры напрягаемой арматуры в России и определения оптимальных областей их применения. В данной работе приведено исследование работы с бетоном трехпроволочного каната, свитого из проволоки периодического профиля с условным обозначением Y1860S3-4.9I (prEN 10138 Part 1, 2, 3 Prestressing steel).

Трехпроволочный канат представляет собой изделие, состоящее из свитых между собой вокруг центральной оси трех проволок одинакового поперечного сечения (рис. 1). Канат имеет следующие геометрические характеристики: канат свит из трех проволок диаметром 2,1–2,25 мм, каждая из которых имеет трехсторонний периодический профиль. Шаг свивки каната 75–78 мм, что составляет 15,6–16 номинальных диаметров каната. Масса погонного метра составляет 93–95 г. Механические свойства трехпроволочного каната приведены в табл. 1.

Для железобетонных конструкций необходимо обеспечить надежное сцепление арматуры с бетоном, так как от этого существенно зависит прочность, жесткость

и деформативность конструкции. Если для стержневой арматуры сцепление с бетоном обеспечивается за счет ярко выраженного профиля, то для высокопрочной проволочной арматуры создание ярко выраженного профиля затруднительно из-за повышенной твердости поверхности и большого влияния на эксплуатационные свойства. Для высокопрочной проволочной арматуры для обеспечения ее надежного сцепления с бетоном необходимо учитывать различные факторы, такие как прочность бетона, влияние вида поверхности и более «слабого» периодического профиля, а также ее конструктивные особенности [7–8].

Несмотря на ряд проведенных в СССР работ по разработке теоретических моделей сцепления и экспериментальных исследований, в настоящее время в российских нормах отсутствуют нормативные требования к процедуре проведения оценки сцепления напрягаемой арматуры. При этом важно разработать относительно простые методы оценки, которые позволят получить количественную оценку сцепления и провести сравнительный анализ между различными видами напрягаемой арматуры. Принимая во внимание предыдущий отечественный и зарубежный опыт [6–8] для оценки сцепления трехпроволочного каната, приняли два метода: вытягивание образцов канатов из бетонных призм, а также определение зоны передачи напряжений по деформациям бетона на длинных призмах.

Испытание на вытягивание образцов арматуры из бетонных призм является одним из основных сравнительных тестов для исследования сцепления арматуры с бетоном, который хорошо себя зарекомендовал при исследовании как обычной, так и арматуры предварительно напряженных конструкций.

При проведении испытаний на вытягивание определяются следующие характеристики (рис. 2):

- величина смещения каната на незагруженном конце ( $g_L$ );
- величина смещения каната на загруженном конце ( $g_0$ );
- напряжение, при котором появляются взаимные смещения между бетоном и арматурой на незагруженном конце ( $\sigma_L$ ), определяет жесткость сцепления;
- максимальное напряжение, при котором произошел обрыв арматуры, разрушение призмы или проскальзывание арматуры ( $\sigma_{max}$ ), определяет прочность сцепления;

Таблица 1  
Table 1

Механические свойства трехпроволочного каната  
Mechanical properties of 3-wire strand

Механические свойства						
$P_{0,1}$ , Н	$\sigma_{0,1}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P_{0,2}$ , Н	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P_B$ , Н	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Agt, %
22820	1865	23230	1899	24250	2020	5,8

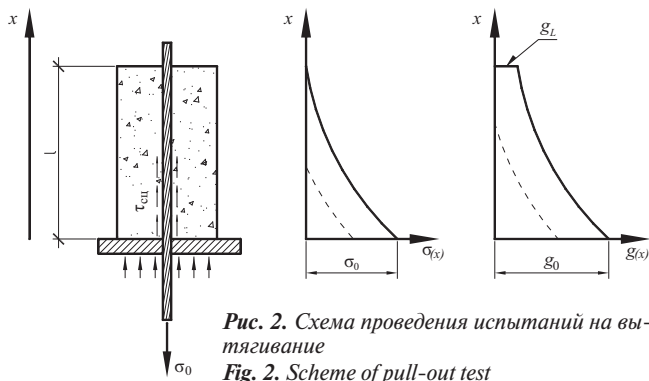


Рис. 2. Схема проведения испытаний на вытягивание  
Fig. 2. Scheme of pull-out test

Растягивающее усилие вызывает в арматурном элементе переменные по длине растягивающие напряжения  $\sigma(x)$ , имеющие на нагруженном торце наибольшие значения  $\sigma_0$ . Прикладываемая нагрузка перераспределяется между бетоном и арматурой за счет сцепления, которое характеризуется условными напряжениями сцепления  $\tau_{сц}$ , действующими по поверхности контакта арматуры с бетоном. Эти напряжения связаны с наличием взаимных смещений арматуры и бетона  $g(x)$ , имеющих на нагруженном торце максимальные значения  $g_0$ . Участок, в пределах которого происходят смещения и действуют напряжения сцепления, определим как зону перераспределения усилий или зону анкеровки –  $l_a$ . Каждому значению напряжения  $\sigma_0$  будет соответствовать своя зона анкеровки.

По мере увеличения нагрузки напряжения, а также смещения  $g(x)$ ,  $\tau_{сц}(x)$  все дальше будут распространяться вдоль арматуры и при  $\sigma_0 = \sigma_L$  достигнут ненагруженного торца каната. С этого момента начинаются смещения  $g_L$  свободного конца образца. В дальнейшем смещения  $g_0$  и  $g_L$  нарастают и при критических напряжениях  $\sigma_0 = \sigma_{max}$  происходит одно из трех действий: выдергивание арматуры, раскалывание бетонной призмы или разрыв арматуры вне призмы.

При исследовании сцепления трехпроволочных канатов на вытягивание применяли бетонные призмы переменной длины с сечением основания  $100 \times 100$  мм с размерами, приведенными на рис. 3. В нижней части призмы, в месте опирания на опорную плиту испытательной установки, канат не имеет сцепления с бетоном на длине 40 мм. Бетонирование призм проводили бетоном на тяжелых заполнителях класса В40. Испытания на вытягивание проводили после набора бетоном необходимой прочности, контролируемой по бетонным кубам, которые бетонировались и хранились с призмами в одинаковых условиях.

При проведении испытаний на вытягивание смещение загруженного конца каната фиксировали деформометром конструкции НИИЖБ с двумя индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, с упором в торец металлической рамы, на которую

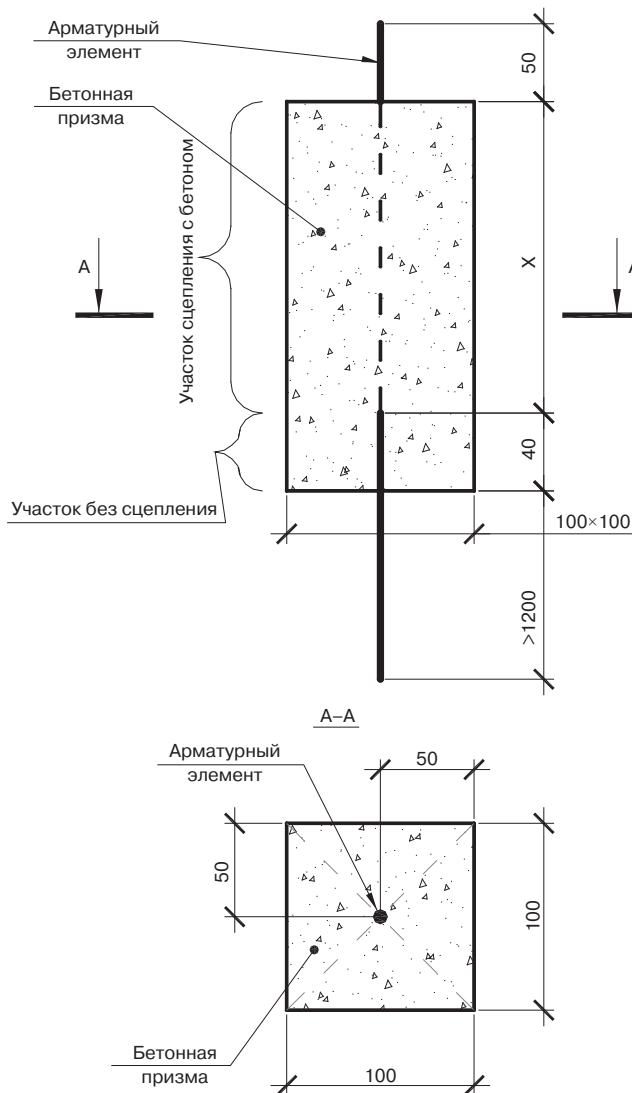


Рис. 3. Размеры призмы для проведения испытаний на вытягивание  
Fig. 3. Dimensions of the prism for pull-out test

упиралась призма. Смещение ненагруженного конца каната осуществляли цифровым индикатором с ценой деления 0,01 мм, закрепленным при помощи специального устройства на призме. Наконечник индикатора упирается в торец одной из проволок, составляющих канат. Касательные напряжения рассчитывали по формуле (1). Результаты испытаний на вытягивание приведены в табл. 2. Графики сдвига ненагруженного конца каната в зависимости от прочности бетона и длины заделки приведены на рис. 4:

$$\tau = \frac{N}{u_s \cdot l_{ан}} \quad (1)$$

Принимая во внимание формулу расчета касательных напряжений при испытании на вытягивание, а также формулу по расчету базовой длины анкеровки, необходимой для передачи усилия (см. п. 10.3.24 СП 63.1330.2018 [13]), можно получить следующую зависимость:



$$R_{\text{bond}} = \tau = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{br} \quad (2)$$

Далее, принимая для исследованного трехпроволочного каната значение коэффициента, учитывающего влияние вида поверхности арматуры  $\eta_1=2,4$  как для семипроволочных канатов из проволоки периодического профиля по СП 63.13330 и  $R_{br}=0,8$  МПа для бетона 18,6 МПа, мы получим значение  $R_{\text{bond}}=\tau=1,92$  МПа. Данное значение очень близко к значению напряжения сцепления при начале смещения незагруженного конца  $\tau_L^{\text{CP}}=2,08$  МПа, полученного опытным путем при испытании на вытягивание (табл. 2).

Для оценки зоны передачи напряжений применяли длинные бетонные призмы с размерами  $100 \times 100 \times 2300$  мм ( $l$ ) без армирования только с расположенной по центру поперечного сечения нагружаемой арматурой. Переменными параметрами в призмах являлась прочность бетона. Длину зоны передачи напряжений определяли по фактическим деформациям бетона по наклеенным на бетон тен-

зорезисторам, а втягивание арматуры в бетон – при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. Передачу усилия с арматуры на бетон проводили путем одномоментной быстрой передачи нагрузки на бетонную призму. Расчеты теоретической длины зоны анкеровки для трехпроволочного каната приведены в табл. 3 и 4.

При расчете напряжения сцепления и длины зоны передачи напряжений периметр каната можно определить. Далее приводится вывод формулы для расчета периметра арматурного каната (рис. 5):

$$u_k = l \cdot n, \quad (3)$$

где  $l = \pi d - l_{\text{сект}}, \quad (4)$

где  $l_{\text{сект}} = \pi d \beta / 180^\circ$  (5) – длина дуги сектора внутренней части окружности проволоки наружного слоя (дуга ВКС).

Из треугольника АОВ:  $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha; \alpha = \pi/n$ , откуда:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} = \pi \left( 0,5 - \frac{1}{n} \right) \rightarrow l_{\text{сект}} = \pi d \left( 0,5 - \frac{1}{n} \right).$$

Таблица 2  
Table 2

Результаты испытаний на вытягивание образцов трехпроволочного каната  
Results of the pull-out tests for 3-wire strand

Средняя прочность бетона $R_b$ , МПа	Длина заделки каната в призме $l_3$ , мм	Начало смещения незагруженного конца каната, $\sigma_L$		Максимальное напряжение, при котором произошло выдергивание каната или его разрыв, $\sigma_{\text{max}}$		Напряжения сцепления		
		Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_b$	Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_b$	$\tau_H$	$\tau_{\text{max}}$	$\tau_H^{\text{CP}}$
18,6	260	818	40	1315	65	2,14	3,43	2,08
	360	1063	53	1861	92	2,01	3,51	
	460	–	–	1984 <sup>1)</sup>	100%	–	2,93	
26,3	260	817	40	1950	97	2,13	5,09	2,69
	360	1717	85	1984	100%	3,24	3,74	
39,7	260	1635	81	1980 <sup>1)</sup>	100%	4,27	5,17	4,27

Примечание. <sup>1)</sup> разрыв каната на рабочей базе образца вне призмы.

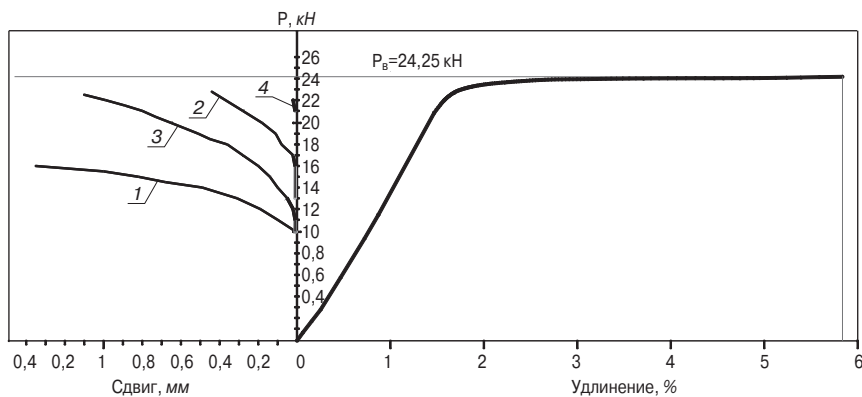


Рис. 4. Графики растяжения и смещения конца трехпроволочного каната при испытании на вытягивание: 1 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=260$  мм; 2 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=360$  мм; 3 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=260$  мм; 4 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=360$  мм

Fig. 4. Graphs of load-elongation and displacement of the unloaded end of the 3-wire strand in pull-out test: 1 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=260$  мм; 2 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=360$  мм; 3 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=260$  мм; 4 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=360$  мм

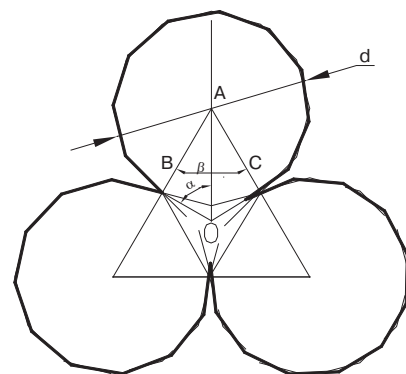


Рис. 5. Схема расчета периметра каната

Fig. 5. Scheme for calculating the perimeter of the strand

Таблица 3  
Table 3

Расчет базовой длины анкеровки  
Calculation of the base anchorage length

Прочность бетона, МПа <sup>1)</sup>	$R_{bb}$ , МПа	$\eta_1$	$\eta_2$	$R_{bond}$ , МПа	Периметр $u_s$ , мм	$R_s A_s$ , кН	$l_{ан} = \frac{R_s A_s}{R_{bond} \cdot u_s}$ , мм
28,6	1,17	2,4	1	0,28	17,67	177,2	357
20	0,92	2,4	1	0,23		174,2	427

Таблица 4  
Table 4

Результаты исследования зоны передачи напряжений трехпроволочного каната  
The results of the study of the stress transfer zone of a three-wire strand

Прочность бетона призм <sup>1)</sup> , МПа	Параметры нагрузки, переданной на бетон			Величина втягивания арматуры в бетон $g_0$ , мм <sup>4)</sup>	Длина зоны анкеровки	
	$N$ , кН	$\sigma_0$ , Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$		Экспериментальные данные $l_{ан}$ , см	Расчетная по СП 63.13330 <sup>3)</sup> , $l_{ан}^{СП}$ , см
28,6	177,2	1449	71,7	– 2)	25 30	35,7
20	174,2	1424	70,5	2,41; 2,27	35 30	42,7

Примечания:

- 1) Средняя прочность бетона по результатам испытания двух кубиков.
- 2) Величину втягивания не определяли.
- 3) Расчет длины анкеровки приведен в табл. 3.
- 4) Приведена абсолютная величина, включая упругую составляющую от укорочения проволоки/каната.

Таблица 5  
Table 5

Результаты испытаний на вытягивание образцов проволоки диаметром 5 мм с двухсторонним периодическим профилем  
Results of the pull-out tests for samples of wire with a diameter of 5 mm with a two-sided periodic profile

$R_b$ , МПа	Длина заделки каната в призме $l_3$ , мм	Начало смещения незагруженного конца каната, $\sigma_L$		Максимальное напряжение, при котором произошло выдергивание проволоки из призмы, $\sigma_{max}$		Напряжения сцепления	
		Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$	Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$	$\tau_H$	$\tau_{max}$
18,6	260	306	16,3	764	40,6	1,47	3,67
	360	408	21,7	1274	67,7	1,42	4,42

Таблица 6  
Table 6

Результаты исследования зоны передачи напряжений проволоки с двухсторонним периодическим профилем диаметром 5 мм  
Results of research anchorage length for wire with a diameter of 5 mm with a two-sided periodic profile

Прочность бетона призм <sup>1)</sup>	Параметры нагрузки, переданной на бетон			Величина втягивания арматуры в бетон $g_0$ , мм <sup>3)</sup>	Длина зоны анкеровки	
	$N$ , Н	$\sigma_0$ , Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$		Экспериментальные данные $l_{ан}$ , см	Расчетная по СП 63.13330 <sup>2)</sup> , $l_{ан}^{СП}$ , см
20	2724	1361	72,2	2,78; 2,88	50 68	104,8
28,6	2553	1276	67,6	2,07; 2,41	45 45	77,2

Примечания:

- 1) Средняя прочность бетона по результатам испытания двух кубиков.
- 2) Расчет длины анкеровки приведен в табл. 3.
- 3) Приведена абсолютная величина, включая упругую составляющую от укорочения проволоки/каната.

Подставляя значение ( $l_{сект}$ ) в формулу (4), получим:

$$l = \pi d - \pi d \left(0,5 - \frac{1}{n}\right) = l = \pi d \left(0,5 + \frac{1}{n}\right). \quad (6)$$

Периметр каната в общем виде будет иметь вид:

$$u_k = n \cdot \pi d \left(0,5 + \frac{1}{n}\right) = \pi d \left(1 + \frac{n}{2}\right). \quad (7)$$

Для сравнения данных, полученных при исследовании сцепления трехпроволочного каната, приведем данные высокопрочной проволоки с двухсторонним периодическим профилем по ГОСТ 7348–81 «Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия». Испытания на вытя-

гивание и исследование зоны передачи напряжений проволоки проводили при аналогичных параметрах призм, что и для трехпроводочного каната, при одинаковой прочности бетона. Данные испытаний приведены в табл. 5 и 6.

Проведенные исследования показали более высокие характеристики сцепления трехпроводочного каната в бетоне низкой прочности по сравнению с проволокой с двухсторонним периодическим профилем. При испытаниях на вытягивание начало смещения незагруженного конца у канатов проходило при более высоких напряжениях по отношению к временному сопротивлению, а при исследовании зоны передачи напряжений длина анкеровки для канатов оказалась в два раза короче длины анкеровки проволоки. Это преимущество канатов может быть реализовано в конструкциях, изготавливаемых методом безопалубочного формования, что позволит увеличить обрабатываемость стенов за счет более раннего отпуска натяжения канатов при более низкой прочности бетона, а также более раннего снятия железобетонных конструкций со стенда. Применение канатов может быть оправданно в железобетонных конструкциях, изготавливаемых методом безопалубочного формования, в которых применяется проволока с двухсторонним периодическим профилем по ГОСТ 7348–81, таких как плиты перекрытия, стойки ЛЭП, ригели и балки перекрытия; при армировании напорных железобетонных труб и других конструкциях.

В заключение необходимо отметить, что поперечное сечение исследованного каната в два раза ниже поперечного сечения проволоки, при этом он дороже в изготовлении и его применение в конструкциях возможно при соответствующем технико-экономическом обосновании, поэтому при дальнейших исследованиях целесообразно провести испытания трехпроводочного каната с поперечным сечением, близким к значению проволоки с двухсторонним профилем по ГОСТ 7348–81.

**Список литературы**

1. Гринева В.Д. Исследование физико-механических свойств двух- и трехпроводочных прядей, свитых из проволоки больших диаметров (5–8 мм) и сцепление ее с бетоном: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1970.
2. Михайлов К.В. Проволочная арматура для предварительно напряженного железобетона. М.: Стройиздат, 1964.
3. Lundgren K., Bolmsvik B. Modelling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2006. 58 (3):123-133. DOI: 10.1680/mac.2006.58.3.123

4. Рекомендации по испытаниям на сцепление арматуры с бетоном Р-36-67. М.: ВНИИЖелезобетон, 1968.
5. Тихонов И.Н., Копылов И.В. Эффективность производства и применения арматурного проката с новыми видами периодического профиля // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 35–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>
6. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
7. Мулин Н.М., Коневский В.П., Судаков Г.Н. Новые типы профиля для стержней арматуры. *Эффективные виды арматуры для железобетонных конструкций: Сб. науч. тр.* М.: НИИЖБ, 1970. С. 16–45.
8. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 233 с.

**References**

1. Grinev V.D. Investigation of the physical and mechanical properties of two- and three-wire strands twisted from wire of large diameters (5–8 mm) and its adhesion to concrete. Cand. Diss. (Engineering). Rostov-on-Don. 1970.
2. Mikhailov K.V. Wire reinforcement for prestressed reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat. 1964.
3. Lundgren K., Bolmsvik B. Modelling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2006. 58 (3):123-133. DOI: 10.1680/mac.2006.58.3.123
4. Recommendations for testing the bond of reinforcement with concrete. R-36-67. Moscow: VNIIZhelezobeton, 1968. (In Russian).
5. Tikhonov I.N., Kopylov I.V. Efficiency of production and application of rebar rolled products with new types of periodic profile. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 35–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>
6. Madatyana S.A. Armatura zhelezobetonnykh konstrukcij [Reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Voentechlit. 2000. 256 p.
7. Mulin N.M., Konevskii V.P., Sudakov G.N. New types of profiles for reinforcement bars. *Effective types of reinforcement for reinforced concrete structures: Collection of scientific papers*. Moscow: NIIZhB. 1970, pp. 16–45. (In Russian).
8. Mulin N.M. Sterzhnevaya armatura zhelezobetonnykh konstrukcij [Core reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 233 p.

Т.А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник (takhir50@rambler.ru),  
С.А. МАЙОРОВ, ведущий инженер (maiorov.st@gmail.com)

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

## Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели

Изложена методика расчета прочности сжатых элементов по деформационной модели с учетом работы сжатой композитной полимерной арматуры. Предложены критерии прочности нормального сечения сжатого элемента при расчете по деформационной модели с использованием кусочно-линейных и криволинейных диаграмм осевого сжатия бетона. Приведено сопоставление результатов расчета прочности опытных образцов по деформационной модели с опытными данными и с результатами расчетов по методу предельных усилий. Показано, что предложенная методика расчета внецентренно сжатых элементов с учетом работы композитной арматуры при сжатии приводит к удовлетворительной сходимости с опытными данными при использовании как кусочно-линейной, так и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона. Сопоставлением результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных внецентренно сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и методом предельных усилий, установлено их удовлетворительное совпадение.

**Ключевые слова:** строительные конструкции, сжатые элементы, композитная полимерная арматура, прочность, методы расчета.

**Для цитирования:** Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>

T.A. MUKHAMEDIEV, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, (takhir50@rambler.ru),  
S.A. MAIOROV, Lead Engineer, (maiorov.st@gmail.com)

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

### Taking into Account the Operation of Compressed Composite Polymer Reinforcement when Calculating the Strength of Compressed Elements According to the Deformation Model

The method of calculating the strength of compressed elements according to the deformation model, taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement, is described. The criteria for the strength of the normal section of the compressed element are proposed when calculating according to the deformation model using piecewise-linear and curved diagrams of axial compression of concrete. The comparison of the results of calculating the strength of prototypes according to the deformation model with experimental data and with the results of calculations using the method of limiting forces is given. It is shown that the proposed method for calculating eccentrically compressed elements, taking into account the work of composite reinforcement in compression, leads to satisfactory convergence with experimental data when using both piecewise linear and a curvilinear diagrams of the axial compression of concrete. By comparing the strength calculation results of the considered sample of experimental non-centrally compressed samples made according to the deformation model using a curved diagram and the method of limiting forces, their satisfactory coincidence was established.

**Keywords:** building structures, compressed elements, composite polymer reinforcement, strength, calculation methods.

**For citation:** Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement when calculating the strength of compressed elements according to the deformation model. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 66–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>

В [1] предложена методика расчета сжатых бетонных элементов с учетом работы композитной полимерной арматуры (АКП) на сжатие методом предельных усилий. Согласно СП 295.1325800.2017 [2] основным методом расчета прочности нормальных сечений является расчет по деформационной модели. Однако

физические соотношения, установленные в [2] для расчета бетонных элементов с АКП, не учитывают работу арматуры, расположенной в сжатой зоне сечения. В статье излагается способ учета работы сжатой арматуры при расчете прочности нормальных сечений таких элементов на основе деформационной модели.

Для расчета элементов с учетом работы сжатой арматуры необходимо принять ее расчетную диаграмму деформирования при осевом сжатии. Параметры такой диаграммы предлагается принять следующими.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований связь между относительными деформациями и напряжениями в композитной арматуре при осевом сжатии принимается линейной. Расчетное сопротивление сжатой арматуры принимается равным сопротивлению арматуры осевому сжатию  $R_{fc,ult}$ , установленному испытаниями контрольных образцов арматуры. В процессе расчета максимальное напряжение в сжатом стержне арматуры в момент достижения элементом предельного состояния по прочности ограничивается значениями, отвечающими предельным относительным деформациям укорочения бетона. Такое ограничение напряжений в арматуре выполняется в расчете автоматически в силу принятой для расчета по деформационной модели гипотезы плоских сечений. Гипотетически при определенной степени армирования, а также прочностных и деформационных характеристиках сжатого стержня арматуры его деформации могут достигнуть своих предельных значений до достижения предельной для элемента нагрузки. В таком случае данный стержень при выполнении расчета исключается из работы.

Система уравнений равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении при расчете прочности внецентренно сжатых элементов в плоскости симметрии принимается в известном виде:

$$M = D_{11} \cdot \frac{1}{r} + D_{13} \cdot \varepsilon_0; \quad (1)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r} + D_{33} \cdot \varepsilon_0, \quad (2)$$

где жесткостные характеристики  $D_{ij}$  ( $i, j = 1; 3$ ) предлагается определять по формулам:

$$D_{11} = \sum A_{bi} \cdot z_{bi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot z_{fj}^2 \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot z_{fk}^2 \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}; \quad (3)$$

$$D_{13} = \sum A_{bi} \cdot z_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot z_{fj} \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot z_{fk} \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}; \quad (4)$$

$$D_{33} = \sum A_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}, \quad (5)$$

где  $M$  и  $N$  – изгибающий момент и продольная сила от внешней нагрузки;  $A_{bi}$ ,  $z_{bi}$ ,  $E_b$  – площадь, координата центра тяжести и начальный модуль упругости  $i$ -го участка бетона;  $A_{fj}$ ,  $z_{fj}$ ,  $E_{fj}$  – площадь, координа-

та центра тяжести и начальный модуль упругости  $j$ -го растянутого стержня АКП;  $A_{fk}$ ,  $z_{fk}$ ,  $E_{fk}$  – площадь, координата центра тяжести и начальный модуль упругости  $k$ -го сжатого стержня АКП;  $\varepsilon_0$  – относительная деформация продольной оси;  $\frac{1}{r}$  – кривизна продольной оси;  $\nu_{fck}$  – условный коэффициент упругости  $j$ -го сжатого стержня арматуры, введенный для контроля его прочности при сжатии и принимаемый равным 1 при  $|\varepsilon_{fk}| < \varepsilon_{fc,ult} = R_{fc}/E_{fc}$  и равным 0 при  $|\varepsilon_{fk}| \geq \varepsilon_{fc,ult}$ ;  $\nu_{bi}$  – коэффициент упругости  $i$ -го участка бетона, определяемый по указаниям СП 63.13330.2018 [3], принимая в расчетных зависимостях вместо значений относительных деформаций  $\varepsilon_{b0}$  и  $\varepsilon_{b2}$  в базовых точках диаграммы осевого сжатия бетона их значения  $k \cdot \varepsilon_{b0}$  и  $k \cdot \varepsilon_{b2}$ , принятые с поправочным коэффициентом  $k$ , учитывающим влияние армирования элемента поперечными хомутами на деформации бетона при сжатии, и принимаемый согласно [1] равным:

$$k = 1 + \mu_{fw} \cdot \frac{R_{fw}}{R_b} \cdot \frac{S_0}{S}; \quad (6)$$

$$S_0 = 500 \text{ мм}, \quad (7)$$

где  $\mu_{fw}$  – коэффициент поперечного армирования:

$$\mu_{fw} = \frac{2 \cdot A_{fw} \cdot (l_x + l_y)}{l_x \cdot l_y \cdot S}, \quad (8)$$

где  $R_{fw}$  – расчетное сопротивление растяжению поперечной арматуры;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона сжатию;  $A_{fw}$ ,  $l_x$ ,  $l_y$  – площадь поперечного сечения и длина хомутов в одном и другом направлении сечения;  $S$  – шаг хомутов.

При расчете прочности сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения с использованием принятых в [3] кусочно-линейных диаграмм деформирования бетона при осевом сжатии условия прочности принимаются в виде:

$$|\varepsilon_{b,max}| \leq \varepsilon_{b,ult}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{f,max} \leq \varepsilon_{f,ult}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{b,max}$  – относительная деформация наиболее сжатого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;  $\varepsilon_{f,max}$  – относительная деформация наиболее растянутого стержня композитной полимерной арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;  $\varepsilon_{f,ult}$  – предельное значение относительной деформации удлинения композитной полимерной арматуры, принимаемое согласно указаниям [2];  $\varepsilon_{b,ult}$  – предельное значение относительной деформации бетона при сжатии, принимаемое равным:

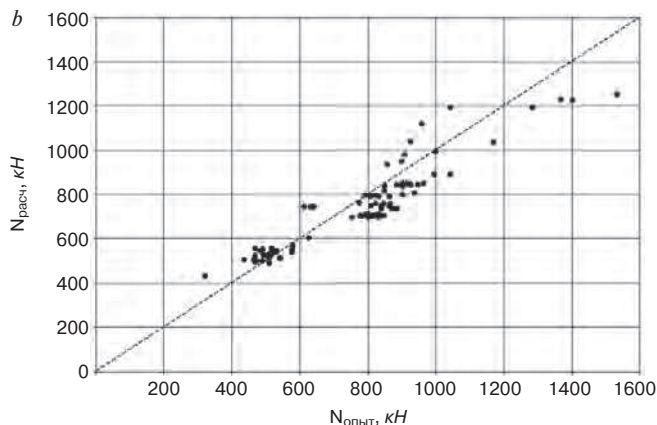
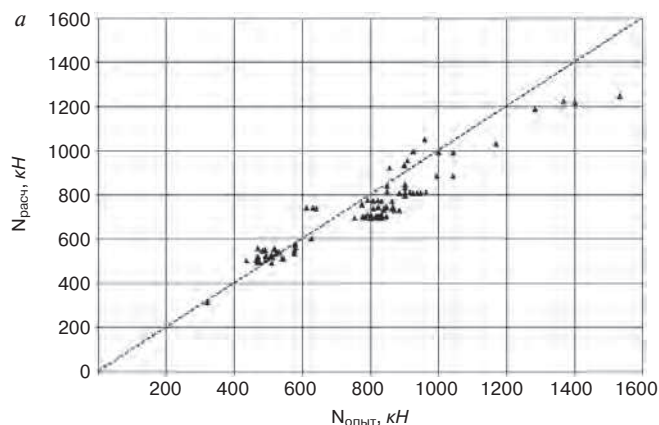


Рис. 1. Сравнение опытной несущей способности центрально-сжатых образцов и расчетной, вычисленной по деформационной модели с использованием трехлинейной (а) и криволинейной (б) диаграмм осевого сжатия

Fig. 1. Comparison of the experimental bearing capacity of centrally compressed specimens and the calculated by the deformation model using trilinear (a) and curvilinear (b) axial compression diagrams

– при двузначной эпюре деформаций в нормальном сечении элемента:

$$\varepsilon_{b,ult} = k \cdot \varepsilon_{b2}; \quad (11)$$

– при полностью сжатом сечении элемента:

$$\varepsilon_{b,ult} = k \cdot [\varepsilon_{b2} - (\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0})] \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{b0}$  и  $\varepsilon_{b2}$  – значения относительных деформаций в базовых точках диаграммы осевого сжатия бетона при его одноосном напряженном состоянии, принимаемые по указаниям [3];  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные деформации на противоположных гранях сечения ( $|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon_2|$ );  $k$  – коэффициент интенсивности армирования элемента поперечными хомутами, определяемый по формуле (6).

За предельную нагрузку принимается максимальное значение усилий, при котором соблюдаются условия равновесия (8) и (9).

При расчете центрально-сжатых элементов с использованием кусочно-линейных диаграмм осевого сжатия бетона предельные относительные деформации бетона согласно формуле (12) составят  $k \cdot \varepsilon_{b0}$ , т. е. напряжения в сжатой арматуре будут совпадать с принятыми в [1] для расчета прочности методом предельных усилий. С изменением распределения относительных деформаций по сечению элемента относительные деформации сжатой арматуры будут возрастать и приближаться к значению предельных относительных деформаций бетона, определяемых по формуле (11). В этом случае напряжение в сжатой арматуре в момент достижения предельного по прочности состояния элемента будет существенно выше принятого в [1] для расчета прочности методом предельных усилий.

Для более точной оценки значений напряжений в сжатой арматуре в предельном по прочности со-

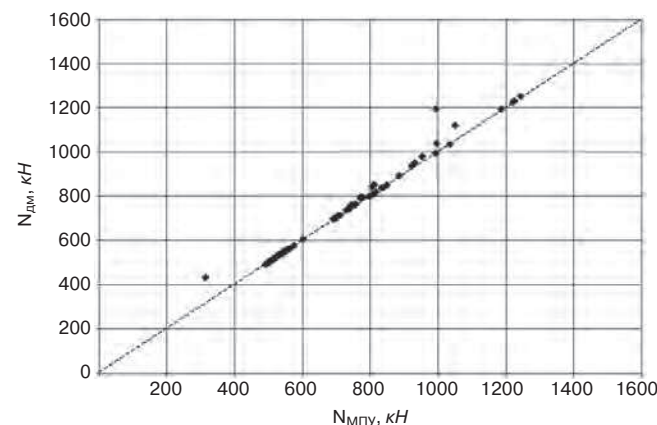
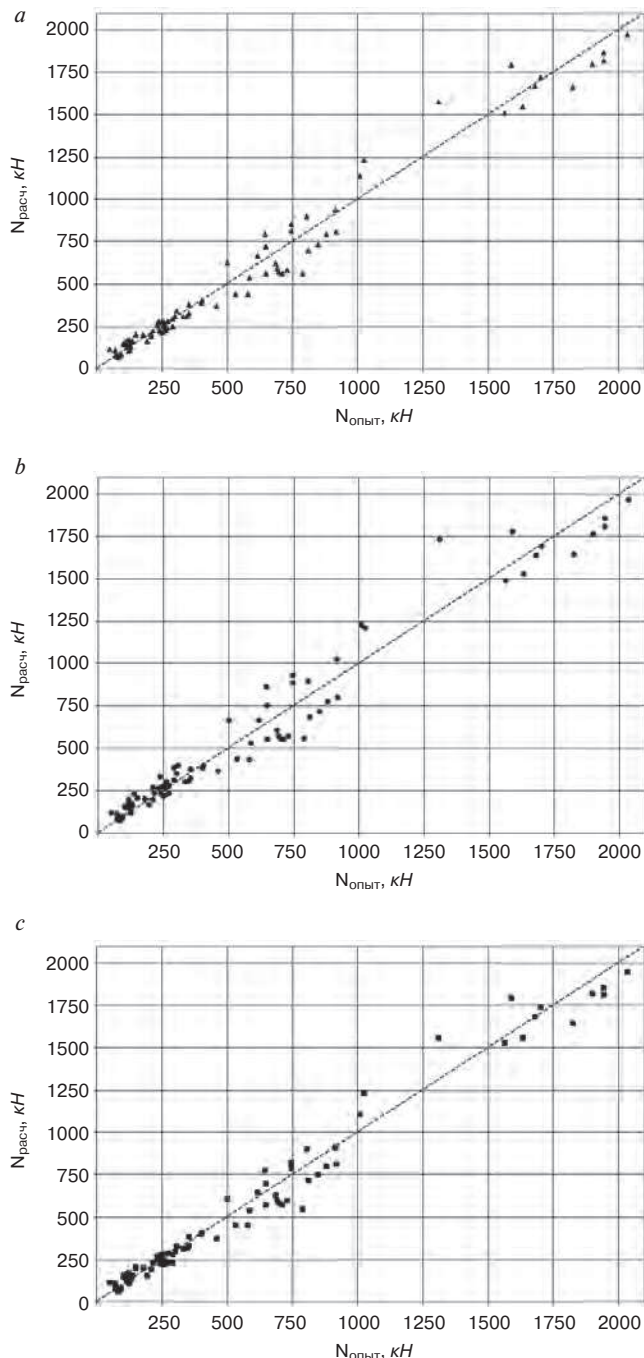


Рис. 2. Сравнение расчетной несущей способности центрально-сжатых образцов, вычисленной методом предельных усилий и по деформационной модели

Fig. 2. Comparison of calculated bearing capacity of centrally compressed specimens calculated by the limit force method and by deformation model

стоянии были выполнены расчеты прочности сжатых опытных образцов с использованием криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона с ниспадающей ветвью. Аналитическую зависимость для описания криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона принимали по [3], принимая значение относительных деформаций в вершине диаграммы равным  $k \cdot \varepsilon_b$ . За условие прочности при заданном значении внешней нагрузки принимали удовлетворение условий равновесия (1) и (2). За предельную нагрузку принималось максимальное значение внешней нагрузки, при котором система уравнений (1) и (2) имеет решение.

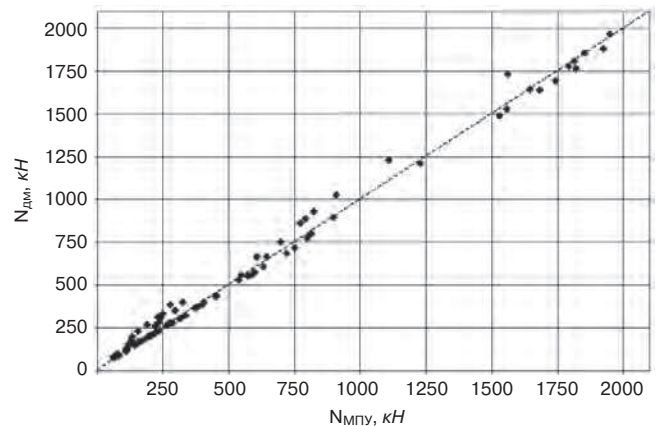
Расчеты прочности центрально-сжатых образцов по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона показали, что с увеличением армирования образцов деформации бетона в предельном по прочности состоянии отвечают ниспадающей ветви диаграммы. При этом уровень напряжений в бетоне с увеличе-



**Рис. 3.** Сравнение опытной несущей способности внецентренно сжатых образцов и расчетной, вычисленной с использованием трехлинейной (а) и криволинейной (б) диаграмм осевого сжатия бетона и методом предельных усилий (с)

**Fig. 3.** Comparison of the experimental bearing capacity of eccentrically compressed specimens and the calculated one, calculated using three-linear (a) and curvilinear (b) diagrams of axial compression of concrete, and the limit force method (c)

нием армирования сечения продольной арматурой изменяется от 1 до 0,95; значение предельного напряжения в сжатой арматуре повышается до 44%, а расчетное значение предельной нагрузки несколько увеличивается – менее чем на 7% в сравнении с ее значением, установленным расчетом с использова-



**Рис. 4.** Сравнение расчетной несущей способности внецентренно сжатых образцов, вычисленной методом предельных усилий и по деформационной модели

**Fig. 4.** Comparison of the calculated bearing capacity of eccentrically compressed specimens, calculated by the method of limit forces and by deformation model

нием кусочно-линейной диаграммы осевого сжатия бетона или методом предельных усилий.

На рис. 1 приведено сравнение результатов испытаний 103 центрально-сжатых образцов с результатами расчетов их прочности, выполненными с использованием трехлинейной (полностью совпадают с результатами расчетов методом предельных усилий) и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона.

Образцы отличались между собой видом продольной композитной арматуры, коэффициентами продольного и поперечного армирования, шагом поперечной арматуры и прочностными характеристиками материалов [4–20]. Описание опытных образцов и их результаты испытаний представлены в [4–6; 8–12; 16–18, 20].

Как видно из рис. 1, использование при расчете прочности центрально-сжатых образцов вместо криволинейной диаграммы деформирования бетона упрощенной трехлинейной с соответствующим критерием прочности, при котором напряжения в сжатой арматуре ограничиваются значением ее предельных относительных деформаций, равных  $k \cdot \varepsilon_{b0}$ , практически не влияет на точность расчета.

Сопоставление результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных центрально-сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и рекомендованного в [1] упрощенного метода расчета, показывает их приемлемое совпадение. Полученные результаты расчетов опытных образцов, испытанных на центральное сжатие (рис. 2), подтверждают приемлемость принятого в [1] способа учета влияния армирования элемента поперечными хомутами на деформации бетона при осевом сжатии.

Надежность предложенной методики расчета сжатых элементов по деформационной модели

с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения была проверена результатами экспериментальных исследований опытных образцов, испытанных на внецентренное сжатие отечественными и зарубежными исследователями. Выборка включала в себя 114 опытных образцов, симметрично армированных угле-, стекло- и базальтопластиковой стержневой арматурой, отличающихся между собой размерами поперечного сечения, коэффициентами содержания продольного и поперечного армирования, шагом поперечной арматуры. Описание опытных образцов и результаты их испытаний представлены в [6–9; 11; 13–16; 18–20].

Сопоставление опытных значений несущей способности образцов с расчетными, вычисленными с использованием трехлинейной (*a*) и криволинейной (*b*) диаграмм осевого сжатия бетона, а также методом предельных усилий (*c*), приведено на рис. 3.

### Выводы

Результаты расчета показали, что предложенная методика расчета внецентренно сжатых элементов с учетом работы композитной арматуры при сжатии приводит к удовлетворительной сходимости с опытными данными при использовании как кусочно-линейных, так и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона.

Сопоставление результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных внецентренно сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и рекомендованным в [1] методом предельных усилий, показывает их удовлетворительное совпадение (рис. 4).

### Список литературы / References

1. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых элементов с учетом работы сжатой композитной полимерной арматуры // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 4. С. 29–35.
1. Mukhamediev T.A., Mayorov S.A. Calculation of strength of non-centrally compressed elements taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2022. No. 4, pp. 29–35. (In Russian).
2. СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». М.: Стандартинформ, 2017.
2. SP 295.1325800.2017 «Concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement.

- Design rules». Moscow: Standartinform, 2017. (In Russian).
3. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М.: Стандартинформ, 2019.
3. SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions». Moscow: Standartinform, 2019. (In Russian).
4. Степанова В.Ф., Мухамедиев Т.А., Кудряков К.Л., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю. Экспериментальные исследования прочности сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. № 22 (3). С. 173–182.
4. Stepanova V.F., Mukhamediev T.A., Kudyakov K.L., Buchkin A.V., Yurin E.Yu. Experimental studies of the strength of compressed concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*. 2022. No. 22 (3), pp. 173–182. (In Russian).
5. Лапшинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4. С. 20–29.
5. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. On the effect of transverse reinforcement on the strength and deformability of compressed concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 4, pp. 20–29. (In Russian).
6. Фридман Л.С. Прочность и трещиностойкость внецентренно сжатых бетонных элементов, предварительно напряженных стеклопластиковой арматурой: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1983.
6. Friedman L.S. Strength and crack resistance of non-centrally compressed concrete elements prestressed with fiberglass reinforcement. Cand. Diss. (Engineering). Minsk. 1983. (In Russian).
7. Уманский А.М. Совершенствование методов расчета конструкций морских гидротехнических сооружений из композитобетона с использованием базальтопластиковой арматуры: Дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2017.
7. Umansky A.M. Improvement of methods for calculating structures of marine hydraulic structures made of composite concrete using basalt-plastic reinforcement. Cand. Diss. (Engineering).. Vladivostok. 2017. (In Russian).
8. Невский А.В. Прочность сжатых углекомпозиционных элементов с углекомпозиционным стержневым и внешним армированием при кратковременном динамическом нагружении: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018.



8. Nevsky A.V. Strength of compressed carbon fiber concrete elements with carbon composite core and external reinforcement under short-term dynamic loading. Cand. Diss. (Engineering). Tomsk. 2018. (In Russian).
9. Alwash N.A., Jasim A.H. Behavior of short concrete columns reinforced by CFRP bars and subjected to eccentric load. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015. № 6 (10), pp. 15–24.
10. Duy N.P., Anh V.N., Minh N., Anh T., Polikutin A.E. Load-carrying capacity of short concrete columns reinforced polymer bars under concentric axial load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018. № 9 (2), pp. 1712–1719.
11. Elchalakani M., Ma G. Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*. 2017. № 151, pp. 93–104.
12. Elhamaymy A., Hamdy M., Manalo A., Benmokrane B. Uniaxial compression behavior of short square and circular RC piles constructed with GFRP bars and spirals preconditioned in simulated marine environments. *Journal of Composites for Construction*. 2022. № 26 (3).
13. Fan X., Zhang M. Behavior of inorganic polymer concrete columns reinforced with basalt FRP bars under eccentric compression: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2016. No. 104, pp. 44–56.
14. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Nanni A., Shield C.K. Eccentric behavior of full-scale reinforced concrete columns with glass fiber-reinforced polymer bars and ties. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (2), pp. 489–499.
15. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Shield C.K., Nanni A. Effect of glass fiber-reinforced polymer reinforcement ratio on axial-flexural strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (4), pp. 1049–1061.
16. Hadi M.N., Youssef J. Experimental investigation of GFRP-reinforced and GFRP-encased square concrete specimens under axial and eccentric load, and four-point bending test. *Journal of Composites for Construction*. 2016. No. 20 (5).
17. Khorrarnian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2017. No. 151, pp. 761–773.
18. Othman Z.S., Mohammad A.H. Behavior of eccentric concrete columns reinforced with carbon fibre-reinforced polymer bars. *Advances in Civil Engineering*. 2019. No. 2, pp. 1–13.
19. Salah-Eldin A., Mohamed H.M., Benmokrane B. Axial-Flexural performance of high-strength-concrete bridge compression members reinforced with basalt-FRP bars and ties: experimental and theoretical investigation. *Journal of Bridge Engineering*. 2019. No. 24 (7).
20. Xue W., Peng F., Fang Z. Behavior and design of slender rectangular concrete columns longitudinally reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (2), pp. 311–322.

## ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

### Учебное и практическое пособие

**Авторы:** Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полуниин В.М.

Опыт применения конечно-элементной программы «ПЛАКСИС» (учебное и практическое пособие) / Под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, профессора Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2022. 316 с.

В учебном и практическом пособии рассмотрены основные положения, программы и модели грунтов, используемые в конечно-элементном программном комплексе «ПЛАКСИС» (PLAXIS) как в плоской – двухмерной, так и трехмерной постановке. Представлен обширный набор численных примеров, относящихся к расчетам различного типа оснований и фундаментов и даны рекомендации по использованию программ «ПЛАКСИС» (PLAXIS) для решения задач по оценке устойчивости грунтовых оснований, откосов и ограждений котлованов, фильтрационных и консолидационных задач механики грунтов, а также при моделировании задач динамики в грунтовых основаниях.

*Предназначено для студентов и аспирантов строительных вузов и факультетов, слушателей курсов и институтов повышения квалификации инженеров-строителей и практикующих инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.*



А.Н. БОЛГОВ, канд. техн. наук (200651@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 разработке нового свода правил СП 513.1325800 «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования»

Анкерные крепления являются одними из ключевых элементов строительных конструкций, непосредственно отвечающими за техническую безопасность и конструктивную целостность зданий и сооружений. Описывается состояние нормативной базы в области проектирования анкерных креплений, обосновывается актуальность разработки нового свода правил. Раскрыты содержание, основные положения и ключевые требования, внесенные в нормативный документ. Представлены ожидаемые результаты от внедрения нового свода правил и пути его дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** анкерные крепления, железобетонные конструкции, надежность, несущая способность, стандартизация.

**Для цитирования:** Болгов А.Н., Сокуров А.З., Невский А.В. О разработке нового свода правил СП 513.1325800 «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования» // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 72–75. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-72-75>

A.N. BOLGOV, Candidate of Sciences (Engineering) (200651@mail.ru),  
A.Z. SOKUROV, Candidate of Sciences (Engineering) (6618188@gmail.com),  
A.V. NEVSKIY, Candidate of Sciences (Engineering) (lokop888@gmail.com)

Research institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Laboratory No. 2 (6, bldg. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### On the Development of a New Set of Rules SP 513.1325800 "Anchor Fastenings to Concrete. Design Rules"

Anchor fastenings are one of the key elements of building structures that are directly responsible for the technical safety and structural integrity of buildings and structures. The state of the regulatory framework in the field of anchorage design is described, the relevance of the development of a new set of rules is substantiated. The content, main provisions and key requirements introduced into the regulatory document are disclosed. The expected results from the introduction of the new set of rules and ways of its further development are presented.

**Keywords:** anchor fastenings, reinforced concrete structures, reliability, load bearing capacity, standardization.

**For citation:** Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Nevskiy A.V. On the development of a new Set of Rules SP 513.1325800 "Anchor fastenings to concrete. Design Rules". *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 72–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-72-75>

Анкерные крепления к бетону, устанавливаемые в готовое строительное основание, включая бетонные и железобетонные конструкции, с каждым годом находят все большее применение в строительстве, в том числе в таких областях, как установка промышленного стационарного оборудования и машин и соединение несущих конструкций и их элементов [1–7].

В связи с этим весьма важной задачей представляется создание нормативно-технического документа, определяющего правила проектирования такого рода соединений, включая требования к определению возникающих усилий в анкерах, к проверке прочности соединения при всевозможных механизмах его

разрушения с учетом групповой работы анкеров и в необходимых случаях к расчету их податливости.

### Современное состояние вопроса

До настоящего времени в России проектирование анкерных креплений, устанавливаемых в бетон, выполнялось согласно СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий», который распространялся на болты прямые и конические, устанавливаемые в скважины на клеевом или цементно-песчаном растворе, а также конические распорные. При этом к конструкции анкеров, а также их материалу предъявляются требования ГОСТ 24379.0 «Болты фундаментные. Общие технические условия» и ГОСТ 24379.1

«Болты фундаментные. Конструкция и размеры»; расчетное сопротивление для данных анкеров принимают в соответствии с СП 16.13330.2016 от 180 до 265 МПа в зависимости от марки стали. Диаметры применяемых по СП 43.13330.2012 анкеров ограничены  $\varnothing 12-48$  мм.

Современные фасадные системы, а также другие облицовочные конструкции вместе с инженерными системами, коммуникациями и подвесным оборудованием, требующие прикрепления к строительному основанию, в большинстве своем крепятся с применением анкеров, устанавливаемых в готовое строительное основание из бетона.

Анкерные крепления для данного назначения различаются по материалу анкера (химические, стальные, пластиковые), механизму заанкеривания (распорные, клеевые, анкеры с уширением и др.), способам монтажа и другим параметрам. Кроме того, анкерные крепления разных производителей имеют различную конструкцию и не являются стандартным (унифицированным) продуктом. Применение продукции, не имеющей нормируемых параметров на территории РФ, осуществляется по техническим свидетельствам (ТС), выдаваемым Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (ФАУ «ФЦС»). В ТС приводится область применения, назначение крепежа, а также прочностные характеристики. Государственный стандарт, который бы устанавливал общие правила проектирования анкерных креплений к бетону с применением анкеров данного типа, до настоящего времени отсутствовал, и они выполнялись согласно СТО 36554501-048–2020\*\* «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования».

В то же время известны международные и региональные стандарты по тематике проектирования анкерных креплений к бетону. В частности, стандарт Американского института бетона ACI 318 «Building Code Requirements for Structural Concrete» и Европейские нормы EN 1992-4 «Design of concrete structures. Design of fastenings for use in concrete» содержат требования к определению усилий, расположению анкеров в группе по отношению к краю и между собой, расчету прочности анкеров с учетом их совместной работы в группе в зависимости от возможных схем разрушения, а также комбинаций действующих осевых и сдвигающих сил и других факторов.

На основе системы Европейских документов в последние годы в России были разработаны национальные стандарты ГОСТ Р 57787–2017 «Крепления анкерные для строительства. Термины и определения. Классификация», ГОСТ Р 56731–2015 «Анкеры механические для крепления в бетоне. Методы испытаний» и ГОСТ Р 58387–2019 «Анкеры клеевые

для крепления в бетон. Методы испытаний», которые устанавливают требования к классификации анкерных креплений, методам их испытаний и установлению расчетных характеристик. При этом при разработке комплекса указанных стандартов изначально ставилась задача максимально гармонизировать эту базу с Европейскими региональными стандартами. Однако единого национального документа по стандартизации, который бы содержал общие требования к проектированию анкерных креплений к бетону, для обеспечения соблюдения требований технических регламентов до сих пор не было разработано. В этой связи Минстроем России в программу разработки нормативных документов 2021 г. был включен новый свод правил «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования».

### **Область применения и содержание нового свода правил**

Свод правил СП 513.1325800 «Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования» разработан авторским коллективом НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство». При его разработке учтены отечественные, международные и зарубежные региональные нормативные документы, регламентирующие требования к проектированию анкерных креплений к бетону. При этом была решена достаточно сложная задача сближения отечественной и европейской систем нормирования по данной тематике.

Свод правил распространяется на проектирование анкерных креплений строительных конструкций и оборудования к бетонным и железобетонным конструкциям из тяжелого или мелкозернистого бетона классов по прочности при сжатии В15–В60 с применением механических, клеевых и комбинированных одиночных стальных анкеров и их групп для применения в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых на площадке строительства с сейсмичностью не более 6 баллов.

Свод правил состоит из восьми разделов. Первые три раздела определяют область применения стандарта, нормативные ссылки, термины и определения.

Раздел 4 содержит классификацию анкерных креплений, устанавливаемых в готовое строительное основание из бетона. Раздел 5 свода правил содержит общие требования к проектированию анкерных креплений: правила назначения прочностных характеристик анкеров; необходимость учета при расчете напряженного состояния бетона основания, расположения анкеров по отношению к краю, а также расстоянию между анкерами в группе, включая расстояния, при которых допускается не учитывать краевые эффекты. При этом в разделе также приведены схемы расположения анкеров в группе, на которые рас-

пространяется данный свод правил; другие отличные от указанных схем варианты их расположения до настоящего времени недостаточно изучены и не могут быть учтены согласно данному документу. Особое внимание уделено специфике расчета анкеров на сдвиг и необходимости ограничения отверстий в анкерной пластине, а также пластичности стали для обеспечения совместной работы при сдвиге. Для клеевых анкеров приведены указания о необходимости учета температурного режима эксплуатации, учитывая значительную зависимость данного типа анкеров от повышенной и высокой температуры.

Важным отличием данного документа от СП 43.13330.2012 является необходимость учета возможного наличия трещин в зоне анкера, характерного для растянутой зоны конструкции.

Учитывая многообразие конструктивных параметров анкеров, прочностные характеристики, включая минимальные межосевые и краевые расстояния, для каждого типа анкера принимают в соответствии с техническим паспортом производителя, введение которого также является новшеством для разработанной системы документов.

Раздел 6 содержит требования к определению усилий в анкерах. Здесь приведены правила определения усилия отдельно для действия растягивающих и сдвигающих сил.

В разделе 7 свода правил приведены требования к расчету анкеров по прочности. Расчет, как и в зарубежных аналогах, предполагает проверку прочности при различных возможных механизмах разрушения, которые отличаются в зависимости от типа анкера и особенностей расположения (одиночный анкер, анкер в группе или анкерная группа).

Отличительной особенностью нового документа от СП 43.13330.2012 является необходимость прямой проверки прочности бетона основания при действии растяжения и сдвига при возможных механизмах разрушений основания: выкалывания, раскалывания, откалывания края, а также выкалывания основания за анкером (или группой анкеров). При этом с целью упрощения учета взаимного влияния площади условных поверхностей разрушения, так же как и в зарубежных стандартах, приняты упрощенными с основанием в виде квадратов и прямоугольников.

В разделе 8 приведены положения по расчету деформативности анкерных креплений, которые

могут быть полезны в случае необходимости учета (или ограничения) перемещений анкерного крепления, в том числе с целью учета его податливости при определении приходящихся на анкеры усилий, а также для более корректного учета податливости прикрепляемой конструкции или оборудования при расчете.

### Заключение

Ожидается, что разработанный свод правил СП 513.1325800 позволит специалистам обоснованно принимать те или иные конструктивные решения по креплению ответственного оборудования или несущих конструкций к бетонным и железобетонным конструкциям, определяя тип анкеров, их количество и расположение.

Применение установленных в своде правил основных требований к проектированию анкерных креплений к бетонным и железобетонным конструкциям позволит повысить надежность конструкций, а также в целом обеспечит экономическую эффективность для существующих и вновь возводимых зданий и сооружений.

Разработанный документ имеет высокую степень гармонизации с международными стандартами, содержит основные принципиальные требования к определению усилий в анкерных креплениях, проверке их прочности и деформативности. Свод правил определяет расчетные положения для проектирования анкерных креплений, устанавливаемых в готовое строительное основание из тяжелого и мелкозернистого бетона с применением клеевых, распорных механических и комбинированных (распорно-клеевых) анкеров.

Данный свод правил разработан впервые и вводит новые требования и подходы к проектированию анкерных креплений. В дальнейшем, получая новые данные при доработке стандарта, предполагается разработка на его основе общего документа, содержащего требования и к другим типам анкеров, включая закладные детали.

Все это будет способствовать совершенствованию системы стандартизации, связанной с проектированием несущих строительных конструкций в нашей стране, и внедрению новых высокоэффективных, экономически целесообразных и надежных соединений с применением анкерных креплений.

### Список литературы

1. Семенов В.С., Губский А.Ю. Технология анкерного крепления к бетону и каменной кладке // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 9. С. 48–53.

### References

1. Semenov V.S., Gubsky A.Yu. Technology of anchor fastening to concrete and masonry. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2020. No. 9, pp. 48–53. (In Russian).

2. Иванов С.И., Кузеванов Д.В., Болгов А.Н. К расчету анкерных креплений, устанавливаемых в готовое основание // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 6. С. 45–49.
3. Иванов С.И., Смотров В.А. Опыт лабораторных испытаний анкерного крепления в бетоне // *Технологии бетонов*. 2019. № 9–10 (158–159). С. 36–38.
4. Абрамов И.В., Турыгин Ю.В., Лекомцев П.В., Романов А.В., Бучкин А.В., Саидова З.С. Некоторые результаты испытаний приспособлений анкерного типа для натяжения композитной арматуры // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-64-69>
5. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012. № 12. С. 38–45.
6. Смирнов В.А. Уточнение методики расчета анкерных болтов в бетонном основании // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 1. С. 153–160.
7. Маций С.И., Деревенец Ф.Н., Ещенко О.Ю. Нормативная база в строительстве – проблемы актуализации требований в области инженерных изысканий и проектирования // *Инженерные изыскания*. 2017. № 11. С. 24–31.
2. Ivanov S.I., Kuzevanov D.V., Bolgov A.N. To the calculation of anchor fastenings installed in the finished base. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 6, pp. 45–49. (In Russian).
3. Ivanov S.I., Smotrov V.A. Experience of laboratory tests of anchor fastening in concrete. *Tekhnologii betonov*. 2019. No. 9–10 (158–159), pp. 36–38. (In Russian).
4. Abramov I.V., Turygin Yu.V., Lekomtsev P.V., Romanov A.V., Buchkin A.V., Saidova Z.S. Some results of testing anchoring devices used in composite reinforcement tensioning. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-64-69> (In Russian).
5. Eremenko V.A., Razumov E.A., Zayatdinov D.F. Modern technologies of anchor fastening. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (scientific and technical journal)*. 2012. No. 12, pp. 38–45. (In Russian).
6. Smirnov V.A. Refinement of the method for calculating anchor bolts in a concrete base. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2021. No. 1, pp. 153–160. (In Russian).
7. Matsiy S.I., Derevenets F.N., Yeshchenko O.Yu. Normative base in construction – problems of actualization of requirements in the field of engineering surveys and design. *Inzhenernyye izyskaniya*. 2017. No. 11, pp. 24–31. (In Russian).

**Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»**

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.



**Книга «Технология гипсовых отделочных материалов и изделий»**

Автор – Федулов А.А.

В книге описано производство гипсовых отделочных материалов и изделий от добычи сырья до упаковки готовой продукции. Особое внимание автор уделяет подробному описанию технологических линий и отдельных единиц оборудования, установленных на передовых предприятиях гипсовой промышленности. В книге представлено большое количество иллюстраций всех технологических переделов, которые помогут глубже представить и понять технологические процессы производства того или иного изделия. Описание технологии каждого вида гипсовых изделий основывается на существующих производственных регламентах предприятий России, Германии и Дании, включая шахты, карьеры, которые автор посещал лично.

Книга предназначена студентам, изучающим производство строительных материалов и конструкций в качестве дополнительного материала по технологии современных гипсовых изделий, а также для инженеров-технологов заводов, производящих гипсовую продукцию в качестве справочного материала.



**Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru), по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; или оформить заказ на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)**



INTERNATIONAL  
ASSOCIATION OF  
FOUNDATION  
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
АССОЦИАЦИЯ  
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

# КАЛЕНДАРЬ МЕРОПРИЯТИЙ 2023 года\*

## КОНФЕРЕНЦИИ, ФОРУМЫ И СЕМИНАРЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

### ЯНВАРЬ

СЕМИНАР «Сейсмостойкое строительство и сейсмическое районирование»  
(курс лекций в АО «НИЦ «Строительство») Москва **25-26 ЯНВАРЯ**

### МАРТ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений» Сочи **22-23 МАРТА**

### АПРЕЛЬ

СЕМИНАР «Инженерные изыскания и проектирование фундаментов  
на многолетнемерзлых грунтах» (курс лекций в НИИОСП  
им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство») Москва **12-14 АПРЕЛЯ**

### МАЙ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Основания и фундаменты: современные технологии,  
специальная техника, оборудование и материалы» (в рамках выставки СТТ Экспо) Москва **24-25 МАЯ**

### ИЮЛЬ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Опоры и фундаменты для ВЛ: технологии  
проектирования и строительства» Санкт-Петербург **5-6 ИЮЛЯ**

### СЕНТЯБРЬ

КОНФЕРЕНЦИЯ «Российские и зарубежные технологии проектирования,  
строительства и реконструкции мостовых сооружений» Москва **20-22 СЕНТЯБРЯ**

### НОЯБРЬ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ «АРКТИКА» Тюмень **14-16 НОЯБРЯ**

## УЧАСТИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ В ОТРАСЛЕВЫХ ВЫСТАВКАХ:

**14-17 ФЕВРАЛЯ**

**SIBERIAN BUILDING WEEK**  
Новосибирск

**1-4 МАРТА**

**YUGBUILD**  
Краснодар

**28-31 МАРТА**

**MOSBUILD**  
Москва

**11-13 АПРЕЛЯ**

**INTERSTROYEXPO**  
Санкт-Петербург

**18-20 АПРЕЛЯ**

**BUILD URAL**  
Екатеринбург

**25-27 АПРЕЛЯ**

**MININGWORLD RUSSIA**  
Москва

**25-27 АПРЕЛЯ**

**ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ**  
Санкт-Петербург

**23-26 МАЯ**

**СТТ EXPO**  
Москва

**6-8 ИЮНЯ**

**МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ**  
Москва

\*В календарь 2023 года могут быть внесены изменения, касающиеся  
корректировки тематики, сроков и места проведения мероприятий.

За дополнительной информацией Вы можете обратиться по телефонам: +7 (495) 66-55-014, +7 (925) 575-78-10  
e-mail: [info@fc-union.com](mailto:info@fc-union.com), [www.fc-union.com](http://www.fc-union.com)

# 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»<sup>®</sup> был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала [www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf](http://www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf)

