

Т.А. МУХАМЕДИЕВ<sup>1</sup>, С.А. ЗЕНИН<sup>1,✉</sup>, К.Л. КУДЯКОВ<sup>1,2</sup>

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

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

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

## Аннотация

**Введение.** Возможность применения композитной арматуры в строительстве рассматривалась еще в 1960-х годах. Актуальность применения такой арматуры в конструкциях из бетона была связана с необходимостью повышения долговечности дорожных конструкций и морских сооружений. Широкому внедрению и изучению препятствовало отсутствие налаженного промышленного производства композитной арматуры вплоть до 1980-х годов. По состоянию на сегодняшний день отечественная нормативная база имеет СП 295.1325800.2017 для проектирования бетонных конструкций, армированных композитной арматурой. В связи с недостаточной изученностью вопроса для расчета прочности внецентренно сжатых элементов в своде правил используют приближенную методику, которая приводит к недооценке прочности внецентренно сжатых элементов. В связи с этим возникла необходимость экспериментального исследования работы внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой, и уточнения методики расчета прочности нормальных сечений таких элементов.

**Цель.** Проведение экспериментальных исследований прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования проведены путем испытания опытных бетонных образцов, армированных композитной арматурой, на действие внецентренно приложенной статической сжимающей нагрузки.

**Результаты.** Получены экспериментальные данные о прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

**Выводы.** По результатам экспериментальных исследований были определены разрушающие нагрузки, установлены схемы трещинообразования, определены прогибы опытных образцов. В процессе испытаний установлено, что опытные значения разрушающих нагрузок опытных образцов на 15–32 % выше их расчетных значений, вычисленных по указаниям действующего свода правил.

**Ключевые слова:** конструкции, прочность, композитная полимерная арматура, бетон, внецентренное сжатие, экспериментальные исследования

**Для цитирования:** Мухамедиев Т.А., Зенин С.А., Кудяков К.Л. Исследование прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой // *Бетон и железобетон*. 2024. № 2 (621). С. 13–19. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-13-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19)

## Вклад авторов

Мухамедиев Т.А., Зенин С.А. – анализ нормативно-технической базы, подготовка программы испытаний, анализ результатов исследований.

Кудяков К.Л. – подготовка и проведение экспериментальных исследований.

## Финансирование

Исследование выполнено за счет собственных средств АО «НИЦ «Строительство».

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.06.2024

Поступила после рецензирования 22.06.2024

Принята к публикации 27.06.2024

T.A. MUKHAMEDIEV<sup>1</sup>, S.A. ZENIN<sup>1,✉</sup>, K.L. KUDYAKOV<sup>1,2</sup>

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

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

# RESEARCH OF STRENGTH OF UNAXIAL COMPRESSED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH FRP

## Abstract

*Introduction.* The possibility of FRP using in construction was considered back in the 1960s. The relevance of FRP using in concrete structures was associated with the need to increase the durability of road and marine structures. The widespread introduction and study was hindered by the lack of well-established industrial production of composite reinforcement until the 1980s. As of today, the Russian regulatory framework has a set of rules SP 295.1325800.2017 for the design of concrete structures reinforced with FRP. However, due to the insufficient study of the issue, in this set of rules, an approximate method is used to calculate the strength of uniaxial compressed elements, which leads to an underestimation of the strength of uniaxial compressed elements. This circumstance leads to an increase in the consumption of materials in the design of such structures. In this regard, it seems necessary to investigate the operation of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP and develop proposals for a refined methodology for calculating the strength of normal sections of such elements.

*Aim.* Conduct experimental studies of the bearing capacity of normal sections of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP.

*Materials and methods.* Experimental studies were carried out by testing of experimental concrete samples reinforced with FRP, with uniaxial static compressive load. The research was carried out taking into account the requirements of the current regulations.

*Results.* Experimental data on the strength of normal cross sections of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP have been obtained.

*Conclusions.* According to the results of experimental studies, destructive loads were determined, crack formation patterns were established, and deflections of test samples were determined. During the tests, it was found that the experimental values of the destructive loads of the test samples are 15–32 % higher than their calculated values calculated according to the instructions of the current set of rules.

**Keywords:** structures, strength, FRP, concrete, uniaxial compression, experimental investigation

**For citation:** Mukhamediev T.A., Zenin S.A., Kudyakov K.L. Research of strength of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 2 (621), pp. 13–19. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-13-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19)

## Authors contribution statement

Mukhamediev T.A., Zenin S.A. – analysis of the regulatory and technical framework, preparation of a test program, analysis of research results.

Kudyakov K.L. – preparation and conduct of experimental studies.

## Funding

The study was carried out at the expense of own funds of JSC Research Center of Construction.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.06.2024

Revised 22.06.2024

Accepted 27.06.2024

**Введение**

Существующие отечественные и зарубежные нормы и рекомендации по расчету конструкций с арматурой композитной полимерной (АКП) в большинстве случаев являются модификацией норм по расчету железобетонных конструкций со стальной арматурой. Изменения связаны с нормированием физико-механических свойств арматуры и ряда эмпирических соотношений, основанных на экспериментальных данных.

Общим для всех норм является принцип расчета железобетонных конструкций по методу предельных состояний. Выделяют ULS (по прочности) и SLS (по пригодности к нормальной эксплуатации) предельные состояния. При этом существует два подхода:

*Европейский* – условие проектирования по предельным состояниям записывается в виде  $R \geq S$ , где  $R$  – расчетное сопротивление сечения как функция расчетных характеристик материалов (нормативных значений, деленных на коэффициент надежности по материалу),  $S$  – усилие в сечении от внешних расчетных воздействий и нагрузок.

*Североамериканский* – условие проектирования по предельным состояниям записывается в виде  $\varphi \times R_n \geq S$ , где  $R_n$  – номинальное сопротивление сечения как функция нормативных (с заданной обеспеченностью) характеристик материалов,  $\varphi$  – обобщенный коэффициент надежности в зависимости от вида разрушения,  $S$  – усилие в сечении от внешних расчетных воздействий и нагрузок.

Таким образом, основное отличие существующих нормативных документов в области расчета конструкций с АКП заключается в принципах обеспечения надежности. Для европейских норм и рекомендаций CNR-DT 203/2006 [1], IstructE [2], fib Bulletin 40 [3] надежность расчетов обеспечивается с помощью частных коэффициентов надежности по материалу и нагрузкам, а для американских и канадских норм ACI 440.1R-06 [4], CAN/CSA-S6-02 [5], CAN/CSA-S6-00 [6] – с помощью обобщенных коэффициентов надежности (запаса) по несущей способности и коэффициентов надежности по нагрузке. Для японских норм JSCE [7] характерно применение сразу двух принципов – надежность обеспечивается частными

коэффициентами надежности по материалу и дополнительными коэффициентами запаса по несущей способности.

Для существующих российских норм расчета строительных конструкций СП 295.1325800.2017 [8] более близкой является европейская система обеспечения надежности расчетов. При этом принятая в отечественных нормах [8] методика расчета не учитывает работу АКП на сжатие. Кроме того, в связи с малой изученностью работы сжатых элементов с АКП, зависимость для вычисления высоты сжатой зоны сечения для расчета по прочности сжатых элементов принята в виде, обеспечивающем запас их несущей способности.

**Целью** работы является проведение экспериментальных исследований несущей способности (прочности) нормальных сечений для серий бетонных внецентренно сжатых элементов, армированных композитной арматурой, и разработка предложений по уточнению методики расчета таких элементов.

**Материалы и методы**

В рамках внутренних научных исследований, проводившихся в АО «НИЦ «Строительство», в 2023–2024 годах сотрудниками НИИЖБ им. А.А. Гвоздева была выполнена работа по исследованию прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны две серии опытных образцов с одинаковым содержанием продольной арматуры и различным эксцентриситетом приложения нагрузки насыщением поперечной арматурой по высоте образцов.

Опытные образцы приняты в виде колонн с размерами поперечного сечения 170 × 170 мм и высотой 1000 мм. Продольное армирование образцов было выполнено из стеклокомпозитной стержневой арматуры Ø 12, поперечное армирование выполнено из стальных хомутов Ø 10 А240. На торцах образцов предусмотрено дополнительное усиление в виде обоймы из композитных материалов. Конструктивные решения образцов приведены на рис. 1.

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Характеристики образцов для испытаний**  
**Characteristics of test samples**

№ п/п	Шифр серии	Геометрические размеры $b \times h \times L$ , мм	Класс бетона	Продольное армирование	Поперечное армирование	$\mu_f$ , %	$\mu_w$ , %	$e_0$ , мм	$n$
1	1.X.25	170 × 170 × 1000	B20	4 Ø 12 АСК	Ø 10/150 А240	0,96	1,6	25	3
2	2.X.25	170 × 170 × 1000	B20	4 Ø 12 АСК	Ø 10/100 А240	0,96	2,4	25	3
3	1.X.50	170 × 170 × 1000	B20	4 Ø 12 АСК	Ø 10/150 А240	0,99	1,6	50	3
4	2.X.50	170 × 170 × 1000	B20	4 Ø 12 АСК	Ø 10/100 А240	0,99	2,4	50	3

*Примечание:*

$X$  – номер образца в серии (1, 2, 3);

$\mu_f$  – процент содержания продольного армирования;

$\mu_w$  – процент содержания поперечной арматуры;

$e_0$  – эксцентриситет приложения продольной силы;

$n$  – количество образцов.

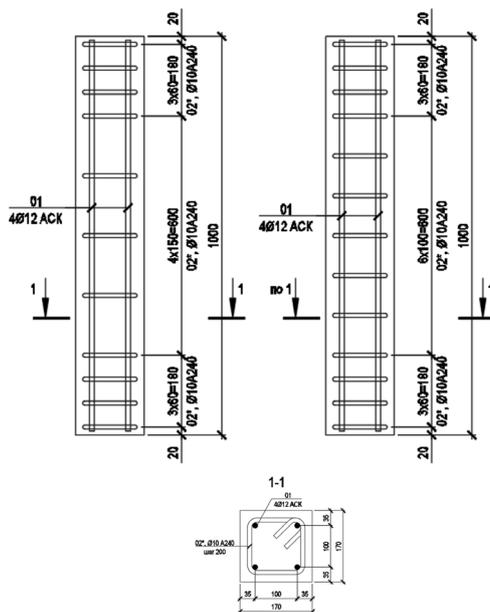


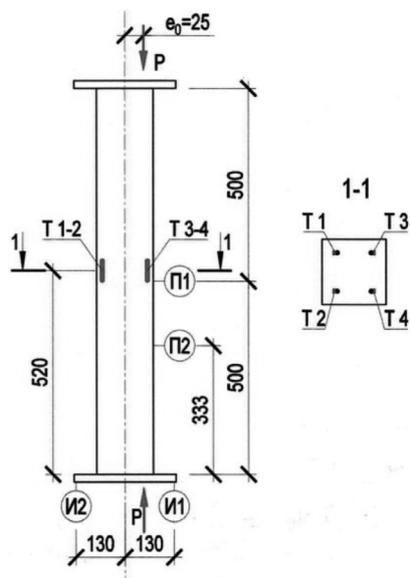
Рис. 1. Опытный образец: слева – серии 1; справа – серии 2  
 Fig. 1. Test sample: on the left – series 1; on the right – series 2

Каждый образец был изготовлен в трех экземплярах. Количество образцов и их характеристики представлены в табл. 1. Дополнительно были изготовлены и испытаны контрольные образцы бетона и арматуры.

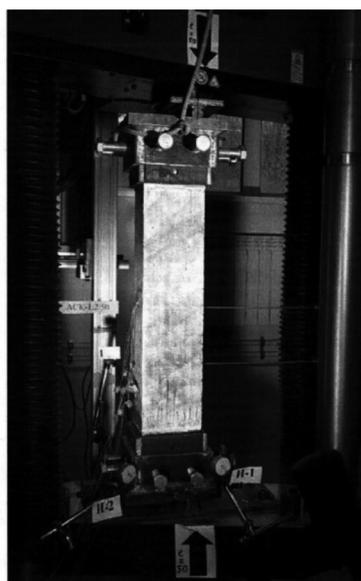
До проведения испытаний на опытные образцы также был установлен комплект тензодатчиков для измерения деформаций в продольной арматуре. Тензодатчики устанавливали по середине длины каждого арматурного стержня (рис. 2).

Испытания опытных образцов проводили на гидравлическом прессе Instron 1000 HDX. Опытный образец размещали в специально сконструированных оголовках и закрепляли в них. Затем опытные

образцы с оголовками устанавливали и центрировали на упорных пластинах, закрепленных на опорах прессы. Задание эксцентриситета приложения продольной сжимающей силы производилось при помощи установки стального стержня круглого поперечного сечения, установленного между упорными пластинами и оголовками в соответствующие задаваемому эксцентриситету желоба. Таким образом обеспечивалась возможность свободного поворота образца в плоскости изгиба (шарнирное закрепление) на каждом опорном участке при заданной постоянной величине эксцентриситета. Общий вид и схема испытаний образцов приведены на рис. 2.

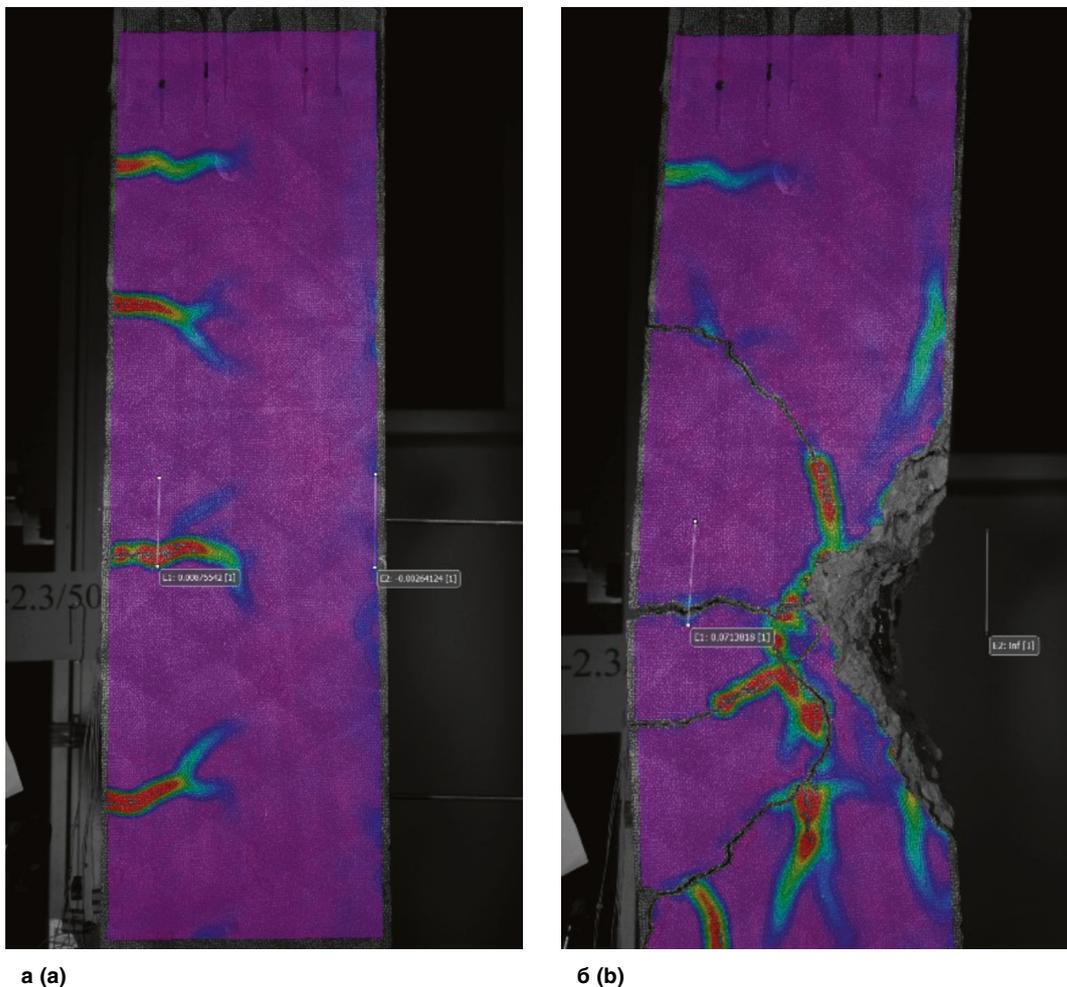


а (a)



б (b)

Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) испытаний опытных образцов  
 Fig. 2. Scheme (a) and general view (b) of testing of samples



**Рис. 3.** Результаты испытаний опытного образца АСК-2.3/50 с применением измерительной системы Vic-3D: а – характерная схема развития трещин; б – характерная схема разрушения

**Fig. 3.** Test results of the ASK-2.3/50 sample using the Vic-3D measuring system: a – a characteristic pattern of crack development; b – a characteristic fracture pattern

Перед проведением испытания для каждого образца были замерены фактические размеры его поперечного сечения, длина образца и величина эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки, а после испытания была уточнена рабочая высота сечения и толщина защитного слоя бетона.

Нагрузку прикладывали ступенями 1/10 от теоретической разрушающей нагрузки с выдержкой под нагрузкой порядка 5 мин. За время выдержки выполняли визуальный осмотр и фиксировали образование и развитие трещин. После этого замеряли все деформации опытного образца. Нагрузку при испытаниях доводили до исчерпания несущей способности (до разрушения) опытного образца.

Прогибы опытных образцов в характерных точках образца замеряли с помощью индикаторов часового типа (П1 в середине пролета; П2 на расстоянии 1/3 пролета от торца; схема установки приведена на рис. 2). Дополнительно к указанным выше приборам использовали бесконтактную оптическую систему измерения деформаций Vic-3D (рис. 3).

### Результаты

По результатам экспериментальных исследований определены разрушающие нагрузки, установлены схемы трещинообразования, а также определены прогибы опытных образцов.

Результаты испытаний показали, что разрушение образцов произошло по нормальному сечению в средней зоне, что соответствовало предполагаемой схеме разрушения.

При анализе результатов испытаний установлено, что значения фактических разрушающих нагрузок для всех опытных образцов превышают расчетные значения, определенные по действующим нормам – СП 295.1325800.2017 [8] (рис. 4). Как показал сравнительный анализ (табл. 2), отклонения теоретических значений разрушающих нагрузок от фактических составляют 15–32 % в меньшую сторону. Таким образом, приведенная в действующих нормах методика расчета прочности нормальных сечений приводит к недооценке прочности испытанных образцов в среднем на 21 %.

Таблица 2  
Table 2

Сравнение результатов испытаний образцов  
Comparison of sample tests results

№ п/п	Шифр образца	Размеры поперечного сечения, мм		$e_0$ , мм	$N_{оп}$ , кН	$N_{расч}$ , кН	$\frac{N_{оп}}{N_{расч}}$
		$b$	$h$				
1	1.1.25	171	170	25	592,4	490	1,21
2	1.2.25	170	172	25	584,4	492	1,19
3	1.3.25	170	170	25	581,0	485	1,20
4	1.1.50	171	170	50	370,4	317	1,17
5	1.2.50	168	172	50	381,1	309	1,23
6	1.3.50	168	171	50	401,1	305	1,32
7	2.1.25	171	169	25	581,1	488	1,19
8	2.2.25	171	169	25	581,1	488	1,19
9	2.3.25	170	170	25	561,1	487	1,15
10	2.1.50	172	170	50	381,1	320	1,19
11	2.2.50	168	171	50	381,1	307	1,24
12	2.3.50	170	170	50	373,1	313	1,19

Примечание:

$N_{оп}$  – опытная разрушающая нагрузка;

$N_{расч}$  – теоретическая разрушающая нагрузка по СП 295.1325800.2017 [8].

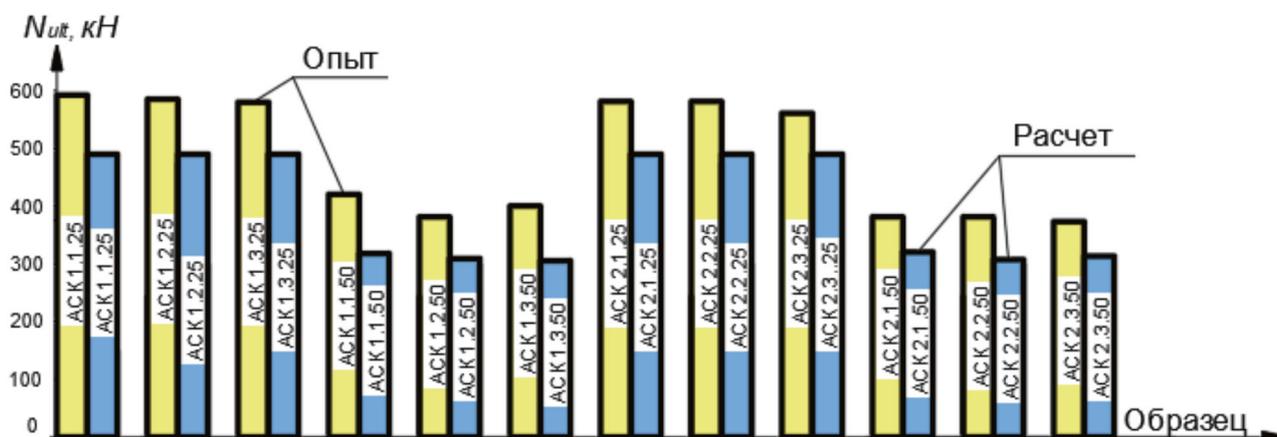


Рис. 4. Сравнение опытной и расчетной несущей способности образцов по СП 295.1325800.2017 [8]

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated bearing capacity of samples according to SP 295.1325800.2017 [8]

**Выводы**

Проведенные испытания опытных образцов показали, что во всех случаях их разрушение произошло по нормальному сечению в средней по длине части.

В процессе испытаний установлено, что опытные значения разрушающих нагрузок опытных образцов на 15–30 % выше их расчетных значений, вычисленных по указаниям действующего СП 295.1325800.2017 [8].

Полученные результаты исследований целесообразно использовать для уточнения принятой в нормах методики расчета прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

**Список литературы/References**

1. CNR-DT 203/2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. Rome, Italy, 2006.
2. IstrucTE. Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement. London, UK, 1999.
3. fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. Technical report TG9.3. Lausanne, Switzerland: fib, 2007.
4. ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute, 2006.

5. CAN/CSA-S6-02. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, 2002.

6. CAN/CSA-S6-00. Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, 2000.

7. JSCE, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 1997.

8. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования.

8. SP 295.1325800.2017. Concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. Design rules. (In Russian).

#### Информация об авторах /

#### Information about the authors

**Тахир Абдурахманович Мухамедиев**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории теории железобетона и конструктивных систем, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: takhir50@rambler.ru

**Takhir A. Mukhamediev**, Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Theory of Reinforced Concrete and Structural Systems, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: takhir50@rambler.ru

**Сергей Алексеевич Зенин** ✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: lab01@mail.ru

**Sergey A. Zenin** ✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of Reinforced Concrete and Constructive Systems, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: lab01@mail.ru

**Константин Львович Кудяков**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

**Konstantin L. Kudyakov**, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher at the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author