

УДК 691.328.4, 693.564

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4\(39\)-68-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-68-81)

EDN: PJLGFW

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ НА ЖЕСТКОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К.Л. КУДЯКОВ<sup>1,2,✉</sup>, канд. техн. наук

А.В. БУЧКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук

Е.Ю. ЮРИН<sup>1</sup>

С.К. ХЛЕБНИКОВ<sup>1,2</sup>

В.А. ПЕНТЮХОВА<sup>1</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

## Аннотация

*Введение.* Высокая прочность арматуры композитной полимерной (далее – АКП) при растяжении и относительно низкий модуль упругости по сравнению со стальной арматурой определяют рациональность ее предварительного напряжения. Однако вопросы технологии ее предварительного напряжения и проектирования конструкций с ее применением изучены недостаточно. Актуальная нормативная документация не содержит исчерпывающий объем положений и требований применительно к условиям и параметрам преднапряжения АКП и их учета при проектировании и расчетах конструкций. В связи с этим проведение комплекса уточняющих исследований по данной тематике является актуальным и имеет значительный практический интерес.

*Целью работы* является оценка влияния различных параметров предварительного напряжения арматуры композитной полимерной на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов.

*Материалы и методы.* В рамках работы была разработана и реализована программа экспериментальных исследований, которая включала изготовление и испытание на изгиб шести серий опытных бетонных образцов с различными параметрами предварительного напряжения АКП.

*Результаты.* Определены разрушающие нагрузки, установлены характеры деформирования, трещинообразования и разрушения изгибаемых бетонных элементов с различными параметрами предварительного напряжения растянутой АКП. Установлены предпосылки для совершенствования системы градостроительной деятельности в части уточнения и дополнения действующих нормативных документов по проектированию бетонных конструкций, армированных АКП.

*Выводы.* В лабораторных условиях апробирована технология натяжения АКП механическим способом. Для ее реализации в условиях современных производственных предприятий требуется адаптация

натяжных устройств и захватов. Сделан вывод, что предварительное напряжение АКП является эффективным способом повышения трещиностойкости и жесткости изгибаемых бетонных элементов: в рамках исследований зафиксировано увеличение момента образования трещин (относительно конструкций без преднапряжения) до 2,25 раза и уменьшение прогибов в середине пролета до 0,5 раза.

**Ключевые слова:** арматура композитная полимерная, предварительное напряжение, жесткость, трещиностойкость, армированные бетонные конструкции

**Для цитирования:** Кудяков К.Л., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю., Хлебников С.К., Пентюхова В.А. Влияние параметров предварительного напряжения арматуры композитной полимерной на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов. Подготовка и проведение экспериментальных исследований. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;39(4):68–81. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4\(39\)-68-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-68-81)

#### **Вклад авторов**

Кудяков К.Л., Бучкин А.В. – анализ литературных источников, подготовка программы испытаний, анализ результатов исследований.

Юрин Е.Ю., Хлебников С.К., Пентюхова В.А. – подготовка и проведение экспериментальных исследований.

#### **Финансирование**

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ФАУ «ФЦС».

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 24.10.2023*

*Поступила после рецензирования 20.11.2023*

*Принята к публикации 23.11.2023*

## **EFFECTS OF PRESTRESS PARAMETERS OF FIBER REINFORCED POLYMER REBAR ON THE STIFFNESS AND CRACK RESISTANCE OF BENDING CONCRETE ELEMENTS. EXPERIMENTAL STUDIES**

K.L. KUDYAKOV<sup>1,2</sup>✉, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. BUCHKIN<sup>1</sup>

E.Yu. YURIN<sup>1</sup>

S.K. KHLEBNIKOV<sup>1,2</sup>

V.A. PENTYKHOVA<sup>1</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*

#### **Abstract**

*Introduction.* In contrast to steel reinforcement, high tensile strength and relatively low elasticity modulus of fiber reinforced polymer rebar (FRP) determine the feasibility of its prestressing. However, the issues of its prestressing technology and the design of structures with its application are insufficiently studied. The current regulatory documentation contain no exhaustive scope of provisions and requirements in relation to the conditions and parameters of FRP prestressing and their account in the design and calculation of structures. In this regard, conducting a set of clarifying studies on this topic appears to be relevant and represents a considerable practical interest.

*Aim.* To assess the effect of various FRP prestressing parameters on the stiffness and crack resistance of bending concrete elements.

*Materials and methods.* As a part of the study, an experimental research program was developed and implemented, including the manufacture and bending testing of six concrete sample series with various FRP prestressing parameters.

*Results.* The destructive loads were determined; patterns of deformation, cracking and destruction of bending concrete elements for various FRP prestressing parameters were established. The prerequisites for improving the system of urban planning activities in terms of clarifying and supplementing the existing regulatory documents for the design of FRP-reinforced concrete structures were established.

*Conclusion.* The technology of FRP mechanical tensioning was laboratory successfully tested. Nevertheless, an adaptation of tensioning devices and grippers is required for its implementation at contemporary production enterprises. FRP prestressing was concluded to be an effective way of increasing the crack resistance and stiffness of bending concrete elements. Within the framework of the study, increase in the time of crack formation (relative to structures without prestressing) and a decrease in deflections in the middle of the span of up to 2.25 and 0.5 times, respectively, was recorded.

**Keywords:** polymer composite reinforcement, prestressing, stiffness, crack resistance, reinforced concrete structures

**For citation:** Kudyakov K.L., Buchkin A.V., Yurin E.Yu., Khlebnikov S.K., Pentykhova V.A. Effects of prestress parameters of fiber reinforced polymer rebar on the stiffness and crack resistance of bending concrete elements. Experimental studies. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;39(4):68–81. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4\(39\)-68-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-68-81)

#### **Author contribution statements**

Kudyakov K.L., Buchkin A.V. – analysis of literary sources, test program preparation, analysis of research results. Yurin E.Yu., Khlebnikov S.K., Pentykhova V.A. – preparation and conduct of experimental studies.

#### **Funding**

The study was carried out within the framework of contractual works of JSC Research Center of Construction and Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 24.10.2023*

*Revised 20.11.2023*

*Accepted 23.11.2023*

## **Введение**

Эффективность предварительного напряжения арматуры композитной полимерной (АКП) подтверждается множеством результатов отечественных и зарубежных исследований. В зависимости от типа АКП и усилий обжатия бетона наблюдается значительное увеличение жесткости и величины изгибающего момента при образовании трещин, снижение ширины раскрытия трещин. В ряде исследований отмечается положительный эффект от применения предварительно напряженной АКП в комбинации со стальной арматурой или фибровым армированием бетона. Указанные мероприятия позволяют «компенсировать» низкие жесткостные характеристики АКП и приблизить эксплуатационные характеристики армированных ею конструкций к железобетонным аналогам [1–19].

В силу технических особенностей АКП единственный возможный метод ее предварительного напряжения – механический. Наиболее технологичная реализация данного метода может быть достигнута с применением гидравлических и винтовых домкратов, при этом требуется адаптация и апробация технологии, устройств и захватов в условиях современных производственных предприятий. Данные факторы являются барьером для широкого применения сборных армированных бетонных конструкций с предварительно напряженной АКП [1, 19–21].

В отечественных и зарубежных нормах требования к предварительно напряженной АКП рассмотрены частично. Например, в американских и канадских нормах [22–28] практически не рассматривается предварительно напряженная АКП на основе стеклянных (АСК) и базальтовых волокон (АБК). В российском СП 295.1325800.2017 [29] не рассмотрена предварительно напряженная АБК. Нормируемые подходы к расчетной оценке параметров предварительного напряжения АКП принципиально схожи с методами, установленными для стальной арматуры. При этом существенные отличия в реологических и физико-механических свойствах стали и АКП учитываются частично. Вопросы влияния температурного перепада при тепловой обработке бетона на потери предварительного напряжения изучены недостаточно. Стандартные методы испытаний по определению релаксации напряжений для АКП в отечественных документах не рассмотрены.

В связи с этим проведение комплекса уточняющих исследований по данной тематике является актуальным и имеет значительный практический интерес.

**Целью** является проведение экспериментальных исследований с оценкой влияния различных параметров предварительного напряжения АКП на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов и выявление предпосылок для совершенствования системы градостроительной деятельности в части уточнения и дополнения действующих нормативных документов по проектированию армированных бетонных конструкций.

## Материалы и методы

В 2023 году сотрудниками НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена работа по исследованию влияния предварительно напряженной АСК на жесткость и трещиностойкость нормальных сечений изгибаемых бетонных элементов.

Для экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны 6 серий опытных конструкций (по 2 шт. в каждой серии), которые были условно разделены на две группы в зависимости от анкероочного слоя АСК (индекс «П» – периодический профиль, «ПЭ» – песчаное покрытие). Для всех опытных конструкций продольное армирование в растянутой зоне выполнено из АСК с величинами начального натяжения ( $\sigma_{fp,0}$ ) 30 и 45 % от предела прочности при растяжении  $\sigma_{f,b}$  для каждого типа арматуры. Также изготовлены контрольные серии опытных конструкций без предварительного напряжения арматуры.

Основные параметры опытных конструкций приведены на рис. 1 и в таблице.

Для изготовления образцов с преднапряженной арматурой была изготовлена деревянная опалубка с геометрическими размерами, обеспечивающими одновременное натяжение арматуры для двух образцов одной серии при их продольном расположении. По торцам опалубки были предусмотрены отверстия таким образом, чтобы исключалось соприкосновение преднапрягаемой арматуры и опалубки. В деревянную опалубку в проектном

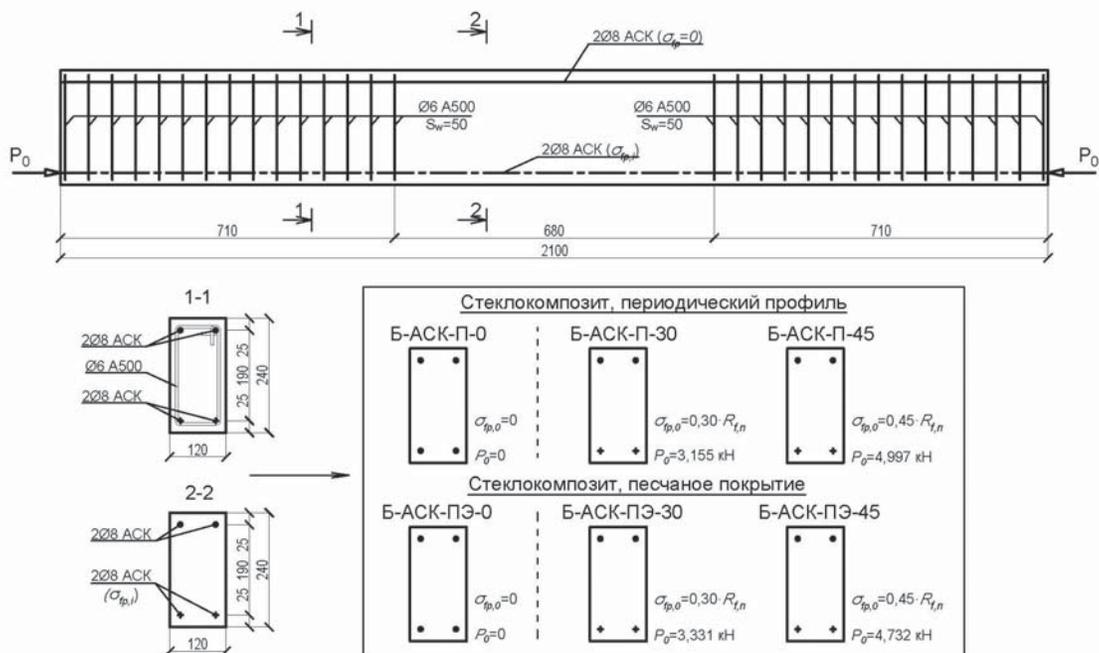


Рис. 1. Принципиальные конструктивные решения опытных конструкций  
 Fig. 1. Conceptual designs of tested structures

положении устанавливались металлические каркасы с поперечной арматурой, через которые продевались (без раскрепления) и располагались в проектном положении продольные преднапрягаемые стержни, на выступающих за торцы опалубки концах которых были устроены анкерные устройства, выполненные по аналогии с испытательными муфтами по п. 5.2.4 ГОСТ 32492-2015 [30].

Деревянная опалубка располагалась в замкнутой жесткой металлической раме. С одной стороны рамы закреплялся неподвижный упор со специальным захватом, в котором фиксировались концы преднапрягаемой арматуры с анкерными устройствами. Конструкция захвата позволяла выполнять одновременное равномерное натяжение двух арматурных стержней. С другой стороны устанавливалась силовая система, состоящая из домкрата, подвижного упора, динамометра (силомера) и захвата для фиксации концов преднапрягаемой арматуры с анкерными устройствами (рис. 2). При помощи домкрата осуществлялось перемещение подвижного упора. Контроль заданного усилия натяжения силовой системы (и, как следствие, преднапрягаемой арматуры) осуществлялся при помощи динамометра типа АЦД/1Р-100/1И-1. При достижении заданного уровня натяжения арматуры подвижный упор фиксировался с последующим периодическим контролем показаний динамометра. Мониторинг показаний динамометров осуществлялся вплоть до бетонирования образцов, а далее – до передачи усилий натяжения арматуры на бетон.

Значения потерь от релаксации напряжений АСК определялись параллельными измерениями на специальных динамометрических рамах, позволяющих обеспечить контроль усилия в образце и неизменность его деформаций на период испытаний. Данные измерения выполнялись по методике, разработанной в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева.

Таблица

**Основные характеристики опытных конструкций**

Table

**Basic characteristics of tested structures**

Шифр серии	Тип АСК	Значения начального натяжения арматуры $\sigma_{i,0} / \sigma_{i,B}$		
		0	0,3	0,45
Б-АСК-П-0	П	+		
Б-АСК-П-30			+	
Б-АСК-П-45				+
Б-АСК-ПЭ-0	ПЭ	+		
Б-АСК-ПЭ-30			+	
Б-АСК-ПЭ-45				+

Примечания:

1. Номинальные размеры опытных конструкций ( $L \times b \times h$ ), мм: 2100 × 120 × 240.
2. Все образцы изготовлены из одной партии тяжелого бетона. На момент испытаний определены следующие характеристики бетона: призматическая прочность на сжатие составила 48,37 МПа, начальный модуль упругости – 36,57 ГПа, прочность на растяжение при изгибе – 5,6 МПа.
3. Растянутая зона сечения армировалась двумя стержнями АСК типа «П» или «ПЭ».
4. Сжатая зона сечения имела конструктивное армирование из двух стержней АСК типа «П».
5. По результатам испытаний АСК типа «П»: номинальный диаметр  $d = 7,81$  мм, предел прочности на растяжение  $\sigma_{i,B} = 1120$  МПа, модуль упругости  $E_i = 52$  ГПа. То же, для типа «ПЭ»:  $d = 7,91$  мм,  $\sigma_{i,B} = 1152$  МПа,  $E_i = 54$  ГПа. Оба типа АСК соответствуют ГОСТ 31938-2022 [31].
6. Поперечное армирование выполнено в виде замкнутых хомутов из стальной арматуры ( $\emptyset 6$  мм класса А500 с шагом 50 мм) и установлено только в приопорных зонах.

Notes:

1. Nominal dimensions of tested structures ( $L \times b \times h$ ), mm: 2100 × 120 × 240.
2. All samples are of the same heavy concrete batch. At the time of testing, the following characteristics of concrete were determined: prismatic compressive strength of 48.37 MPa, initial elasticity modulus of 36.57 GPa, tensile strength at bending of 5.6 MPa.
3. The tensile section zone was reinforced with 2 GFRP rods with surface types of periodic profile (GFRP-PP) or sand cover (GFRP-SC).
4. The compressed section zone was structurally reinforced with 2 GFRP-PP rods.
5. According to the results of GFRP-PP tests: nominal diameter  $d = 7.81$  mm, ultimate tensile strength  $\sigma_{i,B} = 1120$  MPa, elasticity modulus  $E_i = 52$  GPa. The same for the GFRP-SC type:  $d = 7.91$  mm,  $\sigma_{i,B} = 1152$  MPa,  $E_i = 54$  GPa. Both GFRP types comply with State Standard 31938-2022 [31].
6. The transverse reinforcement is made of steel rebars (A500  $\emptyset 6$  mm with a pitch of 50 mm), shaped as closed clamps and installed only in support zones.

Испытания опытных образцов проводились в силовой раме, жестко прикрепленной к силовому полу. Опытный образец помещался на две опоры, одна из которых шарнирно-подвижна, а другая шарнирно-неподвижна. Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом, упирающимся в силовую раму, и передавалась на опытный образец через жесткую траверсу и катки в виде двух сосредоточенных сил. Величина нагрузки на образец определялась при помощи динамометра, установленного между домкратом и силовой рамой. Испытание опытных образцов выполнялось в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

Перед проведением испытания для каждого образца замерялись фактические размеры его поперечного сечения, пролет, расстояния от опор до мест приложения сосредоточенной нагрузки, а после испытания уточнялась рабочая высота сечения и толщина защитного слоя бетона. Во время испытаний измерялись осадка опор и прогибы опытных образцов (схемы установки индикаторов И1–И4 и прогибомеров П1–П5 приведены на рис. 3). Ширина раскрытия трещин на поверхности образца измерялась с помощью отсчетного

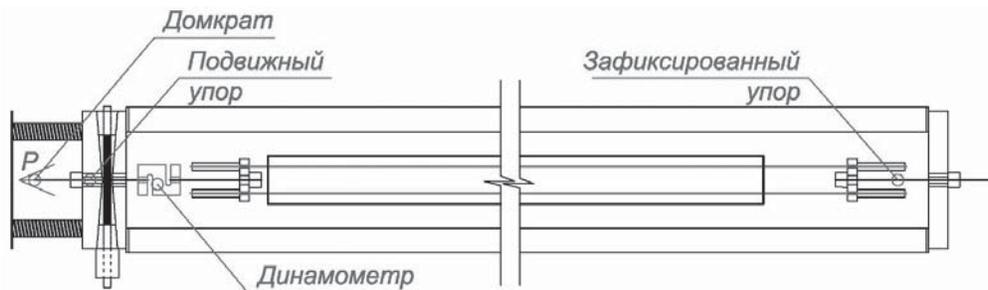


Рис. 2. Принципиальная схема станда для натяжения АКК  
Fig. 2. Principal scheme of the bench for FRP-presstressing

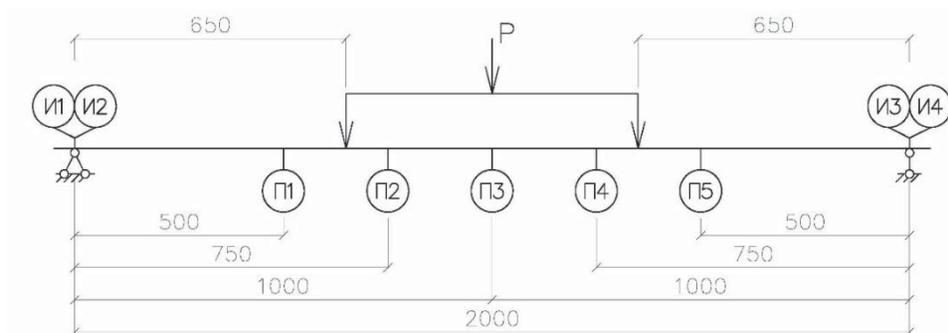


Рис. 3. Принципиальная схема испытаний опытных конструкций  
Fig. 3. Principal scheme of structures tests

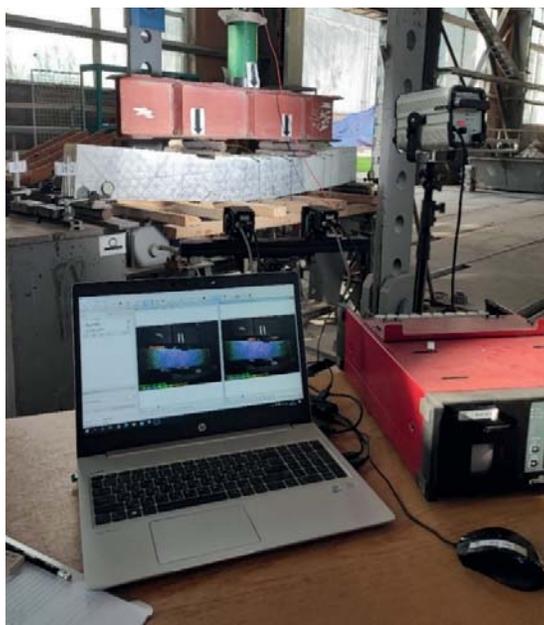


Рис. 4. Общий вид испытаний опытных конструкций  
Fig. 4. General view of structures tests

микроскопа. Дополнительно к указанным выше приборам использовалась бесконтактная оптическая система измерения деформаций Vic-3D.

Нагрузка прикладывалась ступенями 1/10 от теоретической разрушающей нагрузки, с учащением шага в диапазоне нагружения, близком к теоретическому значению нагрузки образования трещин. На каждой ступени проводилась выдержка под нагрузкой около 5 мин. За это время выполнялся визуальный осмотр, зарисовка трещин, отмечались нагрузки образования и развития трещин. Затем снимались все величины деформаций опытной конструкции. При испытаниях нагрузка доводилась до исчерпания несущей способности (до разрушения) опытной конструкции. Общий вид испытаний опытных конструкций приведен на рис. 4.

## Результаты

По результатам экспериментальных исследований опытных конструкций определены разрушающие нагрузки, установлены параметры и схемы трещинообразования (рис. 5 и 6), а также определены прогибы (рис. 7).

Анализ результатов испытаний показал следующее:

– деформирование, трещинообразование и разрушение всех опытных конструкций имели схожий характер, независимо от величины предварительного напряжения;

– значимого влияния типа анкерочного слоя АСК на результаты испытаний не выявлено;

– значимого влияния предварительного напряжения АСК на несущую способность опытных конструкций не выявлено;

– разрушение всех опытных конструкций происходило в зоне чистого изгиба, имело хрупкий характер и сопровождалось разрывом растянутой арматуры; проскальзывания арматуры в бетоне не выявлено;

– образование трещин для конструкций с предварительным напряжением арматуры происходило при больших значениях нагрузки, чем для контрольных образцов без предварительного напряжения. При уровне предварительного напряжения  $0,3\sigma_{f,B}$  наблюдалось увеличение момента образования трещин (относительно конструкций без преднапряжения) до 1,81 раза; при  $0,45\sigma_{f,B}$  – до 2,25 раза;

– наблюдается тенденция к уменьшению ширины раскрытия трещин для конструкций с предварительным напряжением арматуры; с ростом величины предварительного напряжения ширина раскрытия трещин уменьшается;

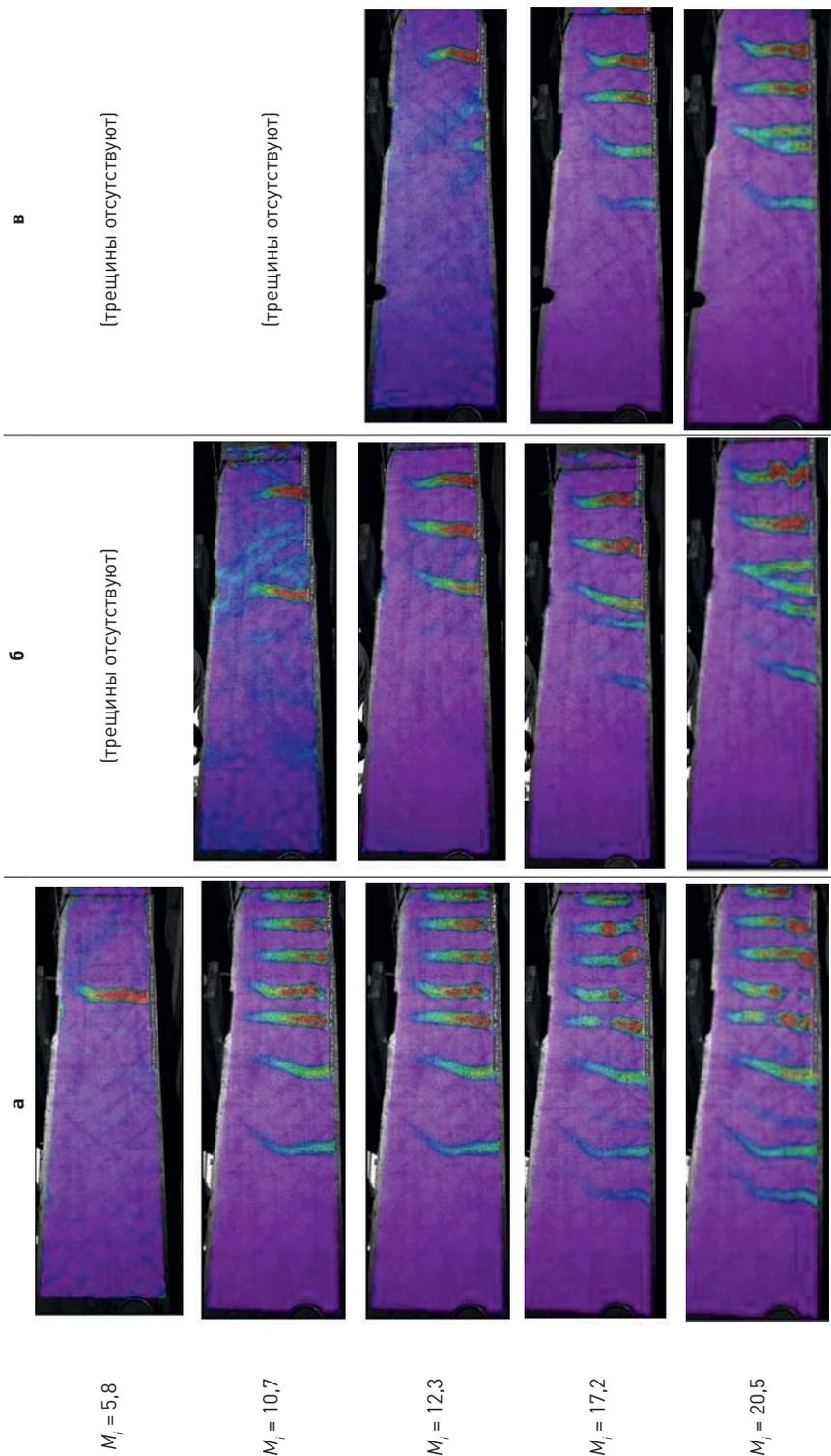
– развитие прогибов для конструкций с предварительным напряжением арматуры в меньшей степени, чем для контрольных образцов. В рассмотренном диапазоне нагружения при уровне предварительного напряжения  $0,3\sigma_{f,B}$  наблюдалось уменьшение величины прогибов в середине пролета до 0,68 раза; при  $0,45\sigma_{f,B}$  – до 0,5 раза.

## Выводы

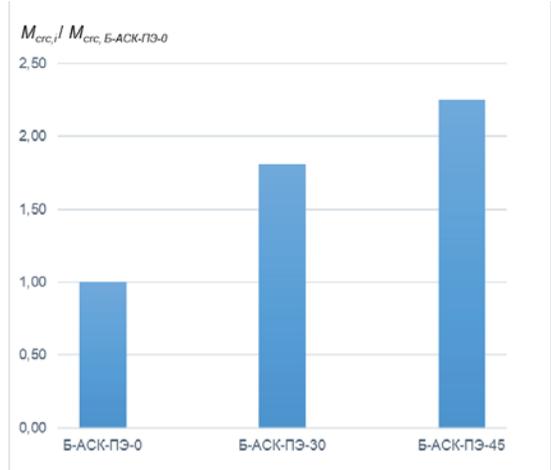
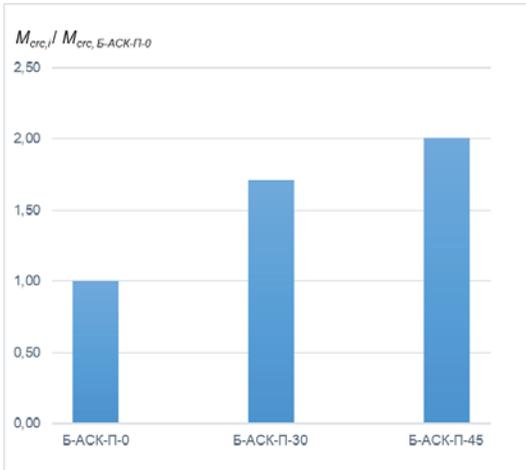
В лабораторных условиях апробирована технология натяжения АКП механическим способом. Получен положительный результат, однако для ее реализации в условиях современных производственных предприятий требуется адаптация натяжных устройств и захватов.

В рамках работы была разработана и реализована программа экспериментальных исследований, которая включала изготовление и испытание шести серий опытных образцов с различными параметрами предварительного напряжения АСК. По результатам испытаний можно сделать вывод, что предварительное напряжение АКП является эффективным способом повышения трещиностойкости и жесткости изгибаемых бетонных элементов.

В последующем предполагается более детальная публикация результатов анализа полученных опытных данных проведенного исследования.

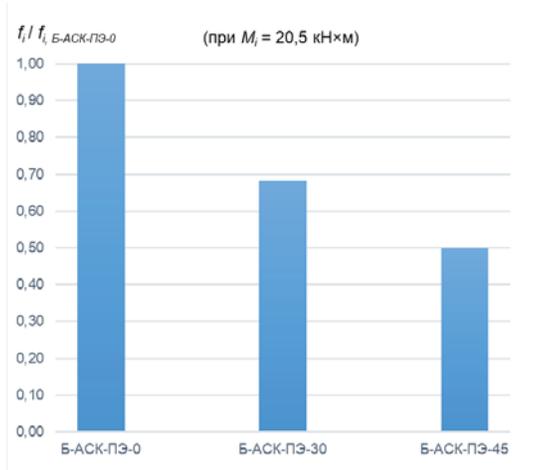
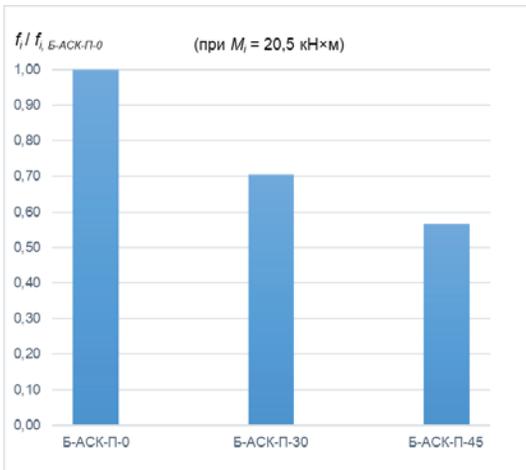


**Рис. 5.** Характерные схемы развития трещин (показания измерительной системы Vis-3D) при разных значениях изгибающего момента  $M_f$ , кНхм, для опытных конструкций: а – Б-АСК-П-0; б – Б-АСК-П-30; в – Б-АСК-П-45  
**Fig. 5.** Typical crack development patterns (Vis-3D measuring system readings) at various bending moment values  $M_f$ , kN x m, for tested structures: а – В-GFRP-PP-0; б – В-GFRP-PP-30; в – В-GFRP-PP-45



**а** **б**  
**Рис. 6.** Гистограммы средних величин изгибающих моментов при образовании нормальных трещин, выраженных относительно аналогичных значений для конструкций без предварительного напряжения АСК: *а* – для группы Б-АСК-П; *б* – для группы Б-АСК-ПЭ

**Fig. 6.** Histograms of average bending moments during the formation of normal cracks relative to similar values for structures without FRP prestressing: *a* – B-GFRP-PP; *б* – B-GFRP-SC



**а** **б**  
**Рис. 7.** Гистограммы средних величин прогибов в середине пролета опытных конструкций при величине изгибающего момента  $M_g = 20,5$  кН\*м, выраженных относительно аналогичных значений для конструкций без предварительного напряжения АСК: *а* – для группы Б-АСК-П; *б* – для группы Б-АСК-ПЭ

**Fig. 7.** Histograms of average deflection values in the middle of the span of experimental structures at the bending moment value  $M_g = 20.5$  kN\*m relative to similar values for structures without GFRP prestressing: *a* – B-GFRP-PP; *б* – B-GFRP-SC

## Список литературы

1. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Степанов А.Ю. Арматура композитная полимерная и композитные полимерные изделия. Москва; 2023.
2. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю., Жирков Е.П. Арматура композитная полимерная. Москва: АСВ; 2013.
3. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях. Строительные материалы. 2017;(11):30–38.
4. Наджибуллохи Р., Рахмонов А.Д. Экспериментальное исследование работы бетонных конструкций, армированных неметаллической композитной арматурой. Доклады Национальной академии наук Республики Таджикистан. 2018;61(1):71–77.
5. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры. Промышленное и гражданское строительство. 2016;(5):22–26.
6. Ганзий Ю.В. Идентификация опасностей получения некачественной продукции из полимерного композитного материала на примере строительной композитной арматуры. Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018;21(3):13–19.
7. Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016;(5):91–101.
8. Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г. Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных. Наука и техника. 2019;18(2):155–163. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163>
9. Захида М.Э., Никулин А.И. Определение трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов с применением преднапряженной композитной арматуры. В: Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; 2019, с. 59–64.
10. Белуцкий И.Ю., Сим А.Д. К оценке трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016;(4):95–102.
11. Лапишинов А.Е., Борисов А.В. Безопасность применения изгибаемых бетонных конструкций, армированных стеклокомпозитной арматурой. Композиты и наноструктуры. 2020;12(1):25–30.
12. Ветрова О.А. Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой. Известия Юго-Западного государственного университета. 2020;24(1):103–114. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114>
13. Антаков И.А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой. Жилищное строительство. 2018;(5):15–18.
14. Falikman V., Solovyov V., Nurtdinov M. Mechanical properties and durability of FRC with glass-polymer composite fiber. FIB 2018 - Proceedings for the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger; 2019, pp. 2490–2500.
15. Тарек М.Ф.Э. Прочность преднапряженных изгибаемых балочных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой, при действии кратковременных динамических нагрузок [диссертация]. Москва; 1992.
16. Кудяков А.И., Плевков В.С., Белов В.В., Невский А.В., Кудяков К.Л. Технология и состав углеродо-фибробетона с повышенной однородностью прочностных показателей. Вопросы материаловедения. 2016;(1):66–72.
17. Кудяков В.А., Кудяков А.И., Лукьянчиков С.А., Кудяков К.Л. Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017;(6):116–126.
18. Nevsky A., Kudyakov K., Danke I., Kudyakov A., Kudyakov V. Improvement of cement concrete strength properties by carbon fiber additives. Advanced Materials in Technology and Construction. AIP Conference Proceedings. 2016;1698(1):070005. <https://doi.org/10.1063/1.4937875>
19. Плевков В.С., Тамразян А.Г., Кудяков К.Л. Прочность и трещиностойкость изгибаемых фибробетонных элементов с преднапряженной стеклокомпозитной арматурой при статическом и кратковременном динамическом нагружении. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та; 2021.
20. 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):64–69.

21. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю., Никишов Е.И., Абрамов И.В., Турыгин Ю.В., Лекомцев П.В. Приспособление анкерного типа для реализации натяжения композитной полимерной арматуры для преднапряженных бетонных конструкций. Вестник НИЦ «Строительство». 2019;22(3):98–111.
22. CAN/CSA-S6-00. Canadian High Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2000.
23. CAN/CSA-S6-02. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association; 2002.
24. CAN/CSA-S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymer. Canadian Standards Association; 2012.
25. CAN/CSA-S6-14. Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2017.
26. CAN/CSA-S6-06. Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2010.
27. Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS). Prestressing concrete structures with fibre-reinforced polymers. Design Manual No. 5. Winnipeg: ISIS Canada Corporation; 2008.
28. ACI 440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP tendons. American Concrete Institute; 2004.
29. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
30. ГОСТ 32492-2015. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2015.
31. ГОСТ 31938-2022. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.

## References

1. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudiyakov K.L., Stepanov A.Yu. Composite polymer fittings and composite polymer products. Moscow; 2023. (In Russian).
2. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu., Zhirkov E.P. Composite polymer reinforcement. Moscow: ASV Publ.; 2013. (In Russian).
3. Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of Polymer-Composite Reinforcement with Cement Concrete in Structures. Stroitel'nye Materialy = Construction Materials. 2017;(11):30–38. (In Russian).
4. Najibullokh R., Rakhmonov A.D. Experimental study of the work of concrete structures reinforced with non-metallic composite reinforcement. Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan. 2018;61(1):71–77. (In Russian).
5. Rimshin V.I., Merkulov S.I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2016;(5):22–26. (In Russian).
6. Ganziy Yu.V. Danger Identification of Receiving the Low-Quality Production from Polymeric Composite Material on the Example of Constructive Composite Fittings. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2018;21(3):13–19. (In Russian).
7. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudiyakov K.L., Nevskii A.V. Strength and Deformability of Polymer Composites Under Tensile and Compressive Loads (Tomsk). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture. 2016;(5):91–101. (In Russian).
8. Begunova N.V., Grakhov V.P., Vozmishchev V.N., Kislyakova Yu.G. Comparative evaluation of the test results of concrete beams with composite reinforcement and calculated data. Nauka i tehnika = Science and Technique. 2019;18(2):155–163. (In Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163>
9. Zahidi M.Z., Nikulin A.I. Determination of crack resistance of bent reinforced concrete elements using pre-stressed composite reinforcement. In: Science and innovations in construction. Collection of reports of the III International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of V.G. Shukhov BSTU. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova; 2019, pp. 59–64. (In Russian).
10. Belutsky I.Yu., Sim A.D. Evaluation of Fracture Toughness of Concrete Flexural Members Reinforced by Composite Armature. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Pacific National University. 2016;(4):95–102. (In Russian).
11. Lapshinov A.E., Borisov A.V. Safety under bending of concrete with glass-fibre composite reinforcement. Composites and nanostructures. 2020;12(1):25–30. (In Russian).

12. *Vetrova O.A.* Pilot Studies of Concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement. Proceedings of the Southwestern State University. 2020;24(1):103–114. (In Russian). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114>
13. *Antakov I.A.* Features of behavior of flexural members with composite polymeric reinforcement under load. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction*. 2018;(5):15–18. (In Russian).
14. *Falikman V., Solovyov V., Nurtdinov M.* Mechanical properties and durability of FRC with glass-polymer composite fiber. *FIB 2018 - Proceedings for the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger*; 2019, pp. 2490–2500.
15. *Tarek M.F.E.* Strength of prestressed bent beam elements reinforced with fiberglass reinforcement under the action of short-term dynamic loads [dissertation]. Moscow; 1992. (In Russian).
16. *Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Belov V.V., Nevskii A.V., Kudyakov K.L.* Technology and composition of carbon-fiber-reinforced concrete with high homogeneity of strength properties. *Voprosy Materialovedeniya*. 2016;(1):66–72. (In Russian).
17. *Kudyakov V.A., Kudyakov A.I., Luk'yanchikov S.A., Kudyakov K.L.* Industrial Process Control in Modified Concrete Technology. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture*. 2017;(6):116–126. (In Russian).
18. *Nevsky A., Kudyakov K., Danke I., Kudyakov A., Kudyakov V.* Improvement of cement concrete strength properties by carbon fiber additives. *Advanced Materials in Technology and Construction. AIP Conference Proceedings*. 2016;1698(1):070005. <https://doi.org/10.1063/1.4937875>
19. *Plevkov V.S., Tamrazyan A.G., Kudyakov K.L.* Strength and crack resistance of bent fiber-reinforced concrete elements with prestressed glass composite reinforcement under static and short-term dynamic loading. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. (In Russian).
20. *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;(1–2):64–69. (In Russian).
21. *Stepanova V.F., Buchkin A.V., Yurin E.Yu., Nikishov E.I., Abramov I.V., Turygin Y.V., Lekomtsev P.V.* Anchoring device for realizing the tension of composite polymer reinforcement for prestressed concrete structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019;22(3):98–111. (In Russian).
22. CAN/CSA-S6-00. Canadian High Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2000.
23. CAN/CSA-S6-02. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association; 2002.
24. CAN/CSA-S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymer. Canadian Standards Association; 2012.
25. CAN/CSA-S6-14. Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2017.
26. CAN/CSA-S6-06. Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association; 2010.
27. Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS). Prestressing concrete structures with fibre-reinforced polymers. Design Manual No. 5. Winnipeg: ISIS Canada Corporation; 2008.
28. ACI 440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP tendons. American Concrete Institute; 2004.
29. SP 295.1325800.2017. Concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars. Design rules. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).
30. State Standard 32492-2015. Fiber-reinforced polymer bar for concrete reinforcement. Determination of physical-mechanical properties. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
31. State Standard 31938-2022. Fiber-reinforced polymer bars for reinforcing concrete structures. General specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Константин Львович Кудяков**<sup>✉</sup>, 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  
e-mail: konst\_k@mail.ru

**Konstantin L. Kudyakov**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, 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, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow  
e-mail: konst\_k@mail.ru

**Андрей Викторович Бучкин**, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Andrey V. Buchkin**, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Евгений Юрьевич Юрин**, аспирант, старший научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Evgeniy Yu. Yurin**, Graduate Student, Senior Researcher, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Сергей Константинович Хлебников**, инженер лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; студент НИУ МГСУ, Москва  
**Sergey K. Khlebnikov**, Engineer, 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; Student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

**Владислава Александровна Пентюхова**, инженер лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Vladislava A. Pentykhova**, Engineer, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author