



УДК: 691.328.4

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_101

EDN: HJVCIL



## Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой

И. А. Антаков<sup>1</sup>, А.М. Сулейманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Работа изгибаемых элементов с полимерной композитной арматурой под нагрузкой имеет ряд принципиально отличающихся от железобетона особенностей, что является следствием различий в физико-механических свойствах композитной и стальной арматур. При этом разработка действующих методик расчета конструкций с композитами производилась путем адаптации существующих методик расчета железобетонных конструкций, за счет введения и корректировки различных эмпирических коэффициентов. Целью данного исследования является совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой. Задачи исследования: анализ существующих исследований в данной области и действующих методик расчета изгибаемых элементов и конструкций с композитной арматурой, выявление их особенностей и различий; экспериментальные исследования деформативности балок с композитной арматурой, сравнение экспериментальных данных по прогибам и теоретических, определенных по рассматриваемым методикам расчета; корректировка выражения для вычисления величин прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами.

*Результаты.* Выполнен анализ проведенных экспериментальных исследований опытных образцов бетонных балок сечением 120 × 220 мм и длиной 1810 мм, армированных в растянутой зоне двумя стержнями стеклокомпозитной арматуры. Испытания проводились при кратковременном приложении нагрузок. Выполнено сравнение теоретических, определенных по нормативным методикам России – свод правил 295.1325800.2017 и Соединенных Штатов Америки – American Concrete Institute 440.1R-06, и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами. Выявлено, что с увеличением нагрузки достоверность, точность результатов расчета прогибов по рассматриваемым методикам снижается. На основании проведенного исследования расчет прогибов изгибаемых элементов с полимерной композитной арматурой предлагается выполнять по существующей методике свода правил 295.1325800.2017, с учетом разработанного корректирующего коэффициента.

*Выводы.* Использование разработанного коэффициента позволило повысить точность оценки деформативности изгибаемых элементов с композитной арматурой.

**Ключевые слова:** стеклокомпозитная арматура, арматура композитная полимерная, неметаллическая арматура, изгибаемые элементы, бетонные конструкции, прогиб

**Для цитирования:** Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.101-109, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_101, EDN: HJVCIL

# Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars

I. A. Antakov<sup>1</sup>, A.M. Suleymanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* The behavior of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement under load has a number of features fundamentally different from reinforced concrete, which is a consequence of differences in the physical and mechanical properties of composite and steel reinforcement. At the same time, the development of existing methods for calculating structures with fiber-reinforced polymer reinforcement was carried out by adapting existing methods for calculating reinforced concrete structures, by introducing and adjusting various empirical coefficients. In this regard, the purpose of this study is to improve the methodology for calculating the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer reinforcement. The research objectives include the analysis of existing study in this area and existing methods for calculating flexural members and structures with fiber-reinforced polymer reinforcement, identification of their features and differences; experimental studies of the deformability of beams with fiber-reinforced polymer reinforcement, comparison of experimental data on deflections and theoretical data determined by the considered calculation methods; conducting theoretical studies aimed at developing recommendations for calculating the deflections of these structures.

*Results.* The analysis of the conducted experimental studies of concrete beam specimens with the cross section of 120 × 220 mm and the length of 1810 mm, reinforced in the tension side with two bars of glass fiber-reinforced polymer reinforcement was carried out. The tests were carried out with a short-term application of loads. A comparison was made of the theoretical dependencies, determined according to the guidelines of Russia – Set of Rules 295.1325800.2017 and the United States of America – American Concrete Institute 440.1R-06, and experimental dependencies between the values of the bending moment and deflections. It was found out that with increasing load, the reliability of the calculation of deflections by the methods under consideration decreases. It was proposed to calculate the deflections of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement according to the method of Set of Rules 295.1325800.2017, taking into account the developed correction factor  $k$ .

*Conclusions.* The use of the developed coefficient  $k$  made it possible to improve the accuracy of assessing the deformability of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement.

**Keywords:** glass fiber-reinforced polymer reinforcement, fiber-reinforced polymer reinforcement, non-metallic reinforcement, flexural members, concrete structures, deflection

**For citation:** Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.101-109, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_101, EDN: HJVCIL

## 1. Введение

Физико-механические свойства арматуры композитной полимерной (далее АКП) отличаются от «традиционной» стальной арматуры. АКП обладает более высокой прочностью на растяжение, относительно низким модулем упругости, при кратковременном нагружении диаграмма «напряжения – деформации» практически прямолинейна вплоть до разрушения, иной механизм сцепления с бетоном [1]. В результате чего работа изгибаемых элементов с композитной арматурой под нагрузкой имеет ряд принципиально отличающихся от железобетона особенностей:

- из-за того, что АКП имеет прямолинейную диаграмму деформирования, диаграммы для балок «изгибающий момент – прогиб» имеют билинейную форму, с двумя фазами работы: без трещин и с трещинами [2-4];

- из-за низкого модуля упругости композитов прогибы балок с АКП в 3-4 раза выше, чем у железобетонных аналогов, больше ширина раскрытия трещин [5-7], меньше высота сжатой зоны в нормальном сечении [8], в процессе нагружения происходит «разветвление» трещин у растянутой грани элемента [9];

- из-за относительно высокой подверженности композитов ползучести увеличение прогибов балок при длительном действии нагрузки составляет 15-90 % относительно начальной упругой деформации, величина приращения прогиба зависимости от вида арматуры и величины нагрузки [10, 22];

- из-за отсутствия у диаграммы деформирования композитов площадки текучести разрушения нормального сечения от разрыва растянутой арматуры и от дробления бетона в сжатой зоне имеют хрупкий характер [11-13]. Возможно одновременное разрушение по бетону и арматуре [14, 15].

Учитывая более высокую деформативность изгибаемых элементов с АКП требования по второй группе предельных состояний могут быть основными при проектировании таких конструкций [16, 17].

Разработка действующих методик расчета конструкций с АКП производилась путем адаптации существующих методик расчета железобетонных конструкций, за счет введения и корректировки различных эмпирических коэффициентов [15, 18]. В методике СП 295.1325800.2017 введены ряд изменений:

- сжатая арматура в расчетах не учитывается;

- предельные величины ширины раскрытия трещин увеличены до 0,7 мм и 0,5 мм;

- увеличены значения коэффициента  $\varphi_2$ , учитывающего профиль продольной АКП, до 0,7 для арматуры периодического профиля. В ранее действующем Приложении Л к СП 63.13330.2012 также было указано значение данного коэффициента для гладкой арматуры, равное 1,2. В исследовании [1] отмечалось, что стержни АКП с песчаным покрытием и с «вдавленной» спиральной навивкой обладают большими величинами сцепления с бетоном, по сравнению со стержнями с «наклеенной» на основной стержень навивкой.

Расчет изгибаемых элементов с АКП по прогибам, методики СП 295.1325800.2017, выполняется аналогично методике для железобетонных конструкций СП 63.13330.2018.

Представленная в АСІ 440.1R-06 методика расчета прогибов изгибаемых элементов с АКП также базируется на методике для железобетонных конструкций, в которой скорректировали формулы по определению приведенного момента инерции сечения  $I_e$  (формула 1) и коэффициента  $\lambda$  (формула 3), учитывающего длительность действия нагрузки.

$$I_e = \beta_d \cdot I_g \cdot \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + I_{cr} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \leq I_g, \quad (1)$$

где введен коэффициент  $\beta_d$

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left( \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right). \quad (2)$$

Прогибы от действия длительных нагрузок вычисляются путем умножения значения кратковременного прогиба на коэффициент  $\lambda$

$$\lambda = 0,6 \cdot \xi, \quad (3)$$

где  $\xi = 2$  – при продолжительности действия нагрузки более 5 лет,  $\xi = 1,25$  – до 6 месяцев.

Результаты многих исследований [19-21] показывают несовершенство действующих методик расчета, отмечались неточности в определении расчетных значений ширины раскрытия трещин и прогибов изгибаемых элементов с АКП относительно опытных данных.

Целью настоящего исследования является совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой.

Задачи исследования: анализ существующих исследований в данной области и действующих методик расчета изгибаемых элементов и конструкций с АКП, выявление их особенностей и различий; экспериментальные исследования деформативности балок с композитной арматурой, сравнение экспериментальных данных по прогибам и

теоретических, определенных по рассматриваемым методикам расчета; корректировка выражения для вычисления величин прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами.

### 2. Материалы и методы

Для получения экспериментальных данных о работе изгибаемых элементов с композитной арматурой под нагрузкой были изготовлены и испытаны образцы бетонных балок с стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной арматурой (АБК). Описание всех серий опытных образцов балок программы экспериментальных исследований представлено в статье [15]. В данной работе рассмотрены балки серии № 2, армированные АСК.

Опытными образцами являлись бетонные балки сечением 120 × 220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне, с защитным слоем бетона 20 мм. Балки с шарнирным опиранием по двум сторонам, загруженные в третях пролета (рис. 1). Испытания проводились в соответствии с положениями ГОСТ 8829-2018, при кратковременном приложении нагрузок. Результаты исследования работы балок на стадии разрушения и при длительном приложении нагрузок представлены в ранее опубликованных статьях [15, 22].

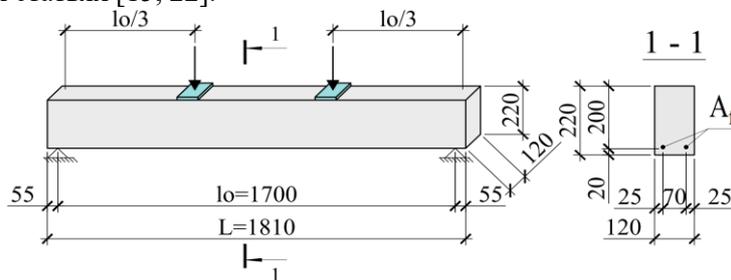


Рис. 1. Схема опирания и нагружения исследуемых балок (иллюстрация автора)

Fig. 1. Beam support and loading pattern (illustration by the author)

В таблице 1 представлены характеристики опытных образцов балок. Армирование балок серии № 2 выполнено стержнями АСК периодического профиля по ТУ 5769-248-35354501-2007, со спиральной навивкой-ребрами базальтового волокна (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики опытных образцов балок

№ серии	Класс бетона	Продольное армирование				
		Количество и диаметр стержней, класс	Расчетный диаметр, мм	Процент армирования $\mu$ , %	Модуль упругости $E_f$ , МПа	Сопротивление растяжению $R_f$ , МПа
2	В40	2 Ø10 АСК	8,6	0,484	51500	1200
		2 Ø8 АСК	7	0,321	51500	1200
		2 Ø6 АСК	5	0,164	51770	1250



Рис. 2. Стержень стеклокомпозитной арматуры (иллюстрация автора)

Fig. 2. Glass fiber-reinforced polymer bar (illustration by the author)

### 3. Результаты и обсуждение

В ранее опубликованной работе [9] представлены результаты исследования деформативности и трещиностойкости изгибаемых элементов с композитной арматурой. Рассмотрены методики расчета прогибов нормативных документов России – СП 295.1325800.2017 и США – АСІ 440.1R-06. В результате выполненного исследования зафиксированы отклонения теоретических данных по прогибам балок от экспериментальных значений. Установлено, что недостоверное определение момента трещинообразования снижает точность расчета прогибов. Использование экспериментальных значений момента трещинообразования  $M_{crc}$  вместо расчетных, при расчете балок по рассматриваемым методикам, уменьшает отклонение теоретических значений прогибов от экспериментальных данных. В исследованиях [19, 23] сравнены теоретические, определенные по методикам АСІ и Eurocode, и экспериментальные

данные по прогибам балок с АКП, где также отмечалось, что достоверность прогноза прогибов балок во многом зависит от точности расчета момента трещинообразования. В связи с этим в работе [9] были предложены корректирующие коэффициенты для определения момента трещинообразования, что позволило повысить точность расчета прогибов.

Результаты исследования, представленные в [9], показали, что величины кратковременного прогиба, определенные по методике АСІ, являются заниженными. Предельное отклонение теоретических значений максимального прогиба от опытных данных составляет 38,7 %. В исследованиях [11, 19, 20] также было установлено увеличение отклонения теоретических величин прогибов, определенных по методике АСІ, от экспериментальных данных по мере увеличения нагрузки, в сторону занижения прогибов. При этом выявлена корреляция между точностью расчета прогибов и процентом армирования. У балок с меньшим процентом армирования отклонения от экспериментальных данных выше.

На основании анализа опытных данных расчет прогибов изгибаемых элементов с АКП предлагается выполнять по методике СП 295.1325800.2017 с учетом разработанного корректирующего коэффициента  $k$  (формула 4). Он нивелирует нарастающее, по мере увеличения нагрузки, отклонение теоретических величин прогибов от фактических, опытных данных. А также учитывается влияние процента армирования через отношение величин относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi$  и граничной относительной высоты сжатой зоны  $\xi_R$ .

$$f = kSl^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{max}, \tag{4}$$

$$k = 1,6 - 0,6 \left(\frac{M_{crсc}}{M}\right) \left(\frac{\xi}{\xi_R}\right).$$

Аналогичные результаты расчета прогибов, после образования трещин, можно получить по методике, представленной на рис. 3. На первом этапе определяется напряжение в арматуре  $\sigma_f$  и относительная деформация растянутой арматуры  $\varepsilon_f$ . Затем, исходя из гипотезы плоских сечений, определяется относительная деформация крайнего волокна сжатой зоны бетона  $\varepsilon_b$ . С учетом коэффициентов  $\psi_f$  и  $\psi_b$  вычисляются средние относительные деформации растянутой арматуры  $\bar{\varepsilon}_f$  и бетона сжатой зоны  $\bar{\varepsilon}_b$ . Коэффициент  $\psi_b$ , учитывающий неравномерность краевых деформаций бетона сжатой зоны, предложен автором. По выражению Мурашова В.И. определяется средняя кривизна оси изгибаемого элемента  $1/r$ . Прогиб  $f$  рассчитывается по формуле СП с учетом корректирующего коэффициента  $k$ .

На рис. 4-6 приведено сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами (M-f). Для каждого вида балок представлены экспериментальные данные по двум идентичным образцам. Теоретические данные по рассматриваемым методикам определены с учетом экспериментальных значений момента трещинообразования. В методике СП использовался коэффициент  $\psi_f = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crсc}}{M}$ . В методике АСІ кратковременный прогиб умножался на коэффициент  $\lambda = 0,6 \cdot \xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$ , где  $\xi=2$  соответствует продолжительности действия нагрузки более 5 лет. В модифицированной методике СП (ММ СП) значения прогибов определялись с учетом коэффициента  $k$ .

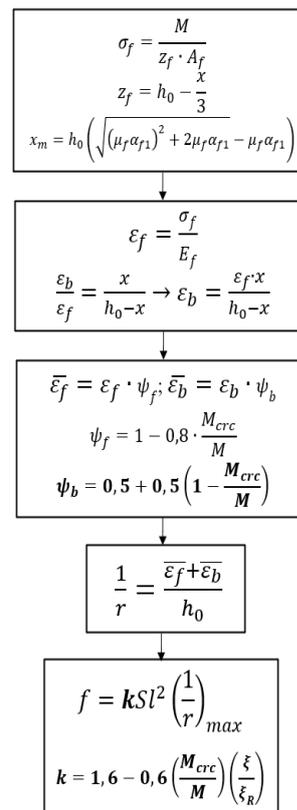


Рис. 3. Блок-схема методики расчета прогибов изгибаемых элементов с АКП (иллюстрация автора)

Fig. 3. Flowchart method for calculating deflections flexural members with FRP bars (illustration by the author)

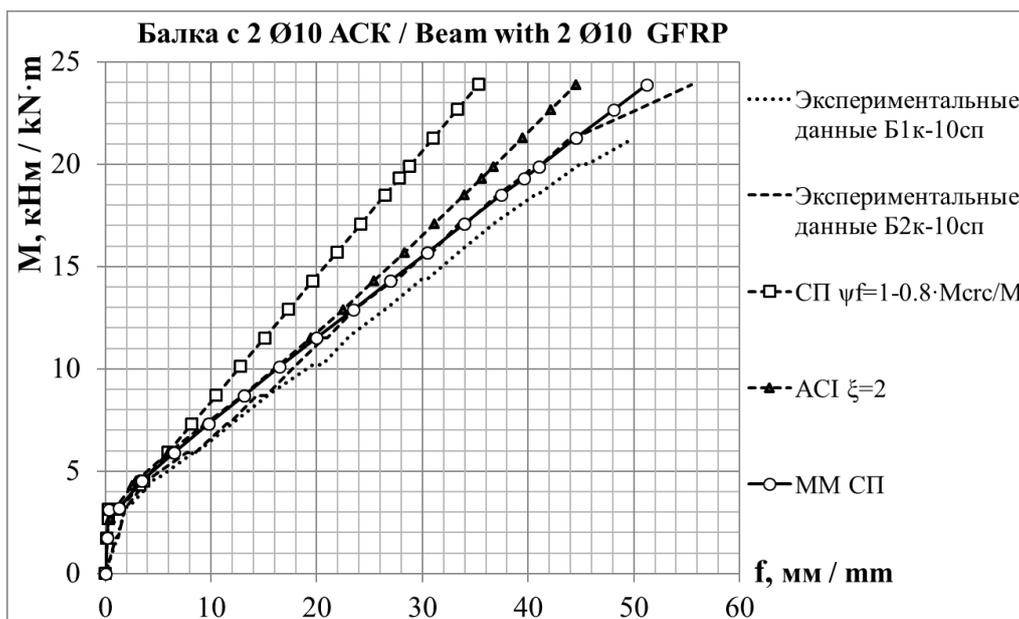


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø10 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø10 GFRP (illustration by the author)

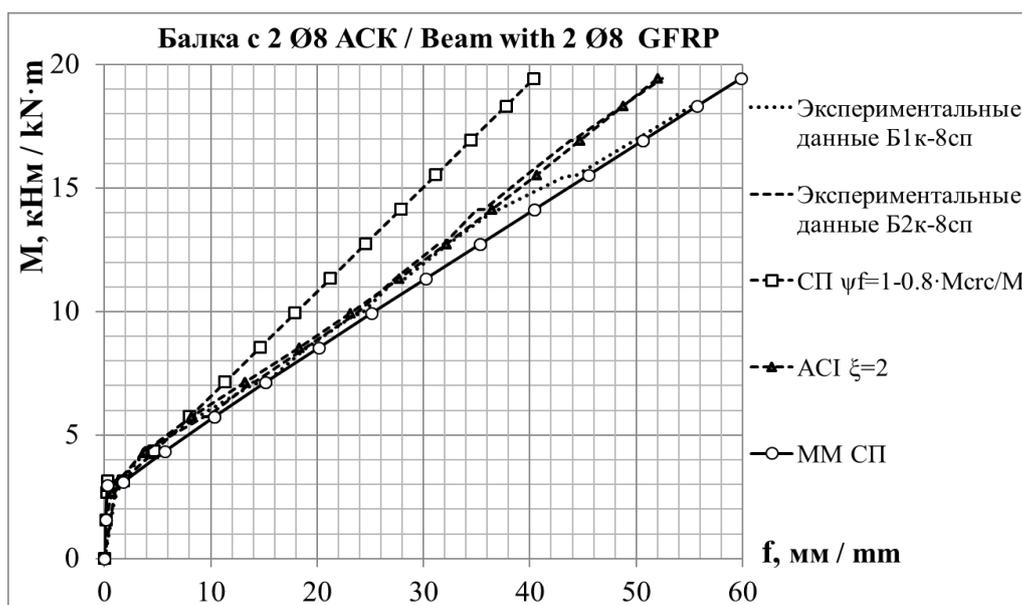


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø8 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 5. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø8 GFRP (illustration by the author)

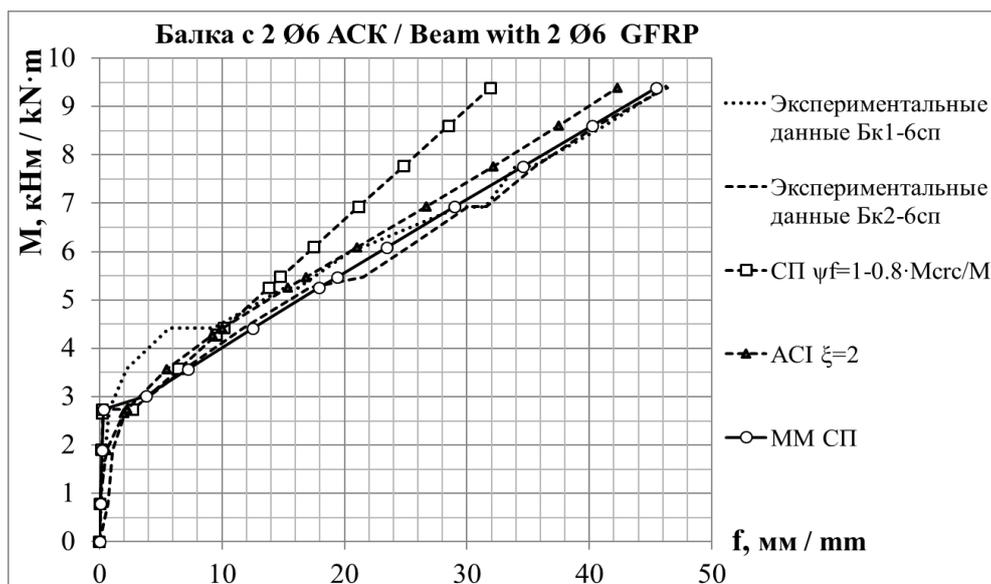


Рис. 6. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø6 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 6. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø6 GFRP (illustration by the author)

Зависимость между величинами изгибающего момента и прогибами балок с АКП после образования трещин, вплоть до разрушения, преимущественно линейная. Расчетные диаграммы рассматриваемых методик после предполагаемого образования трещин также прямолинейны. В методике СП, при расчете прогибов изгибаемых элементов, величина жесткости поперечного сечения определяется с учетом двух расчетных случаев – отсутствие и наличие трещин. В момент предполагаемого образования трещин у диаграмм методики СП 295.1325800.2017 имеется горизонтальный участок. Отклонение теоретических значений максимального прогиба по методике СП от экспериментальных данных достигает 53,6 %, у методики ACI – 19,8 %.

#### 4. Заключение

В отличие от методики ACI 440.1R-06 в методике СП 295.1325800.2017 расчет прогибов изгибаемых элементов с АКП выполняется аналогично действующей методике для железобетонных конструкций, без введения дополнительных коэффициентов или корректировки существующих.

Сравнение экспериментальных и теоретических данных по деформативности исследуемых балок с АКП показало необходимость совершенствования методик СП 295.1325800.2017 и ACI 440.1R-06 в части расчета прогибов, что также отмечалось и в других исследованиях. На первом этапе данной работы удалось повысить точность расчета прогибов за счет приближения теоретических значений момента трещинообразования к опытным данным, путем введения корректирующих коэффициентов.

В результате проведенного исследования выполнено совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами. На основании анализа опытных данных разработан корректирующий коэффициент для выражения по определению прогибов методики СП 295.1325800.2017. При использовании данного коэффициента расхождение между теоретическими и опытными величинами максимального прогиба колеблется в пределах 10 %. Требуются дополнительные исследования применения предложенного корректирующего коэффициента для иных схем опирания и нагружения балок, видов композитной полимерной арматуры.

**Список литературы / References**

1. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 30-38 [Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. Iss. 11, P. 30–38.]
2. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: experimental testing and numerical simulation // *Journal of composites for construction*. 2020. Vol. 24. Iss. 2. P. 04020007 DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
3. Salih R., Zhou F. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars // *Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 5. Iss. 11. P. 2296-2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
4. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 606-619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
5. Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 131. P. 231-242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007
6. Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement // *Journal of asian architecture and building engineering*. 2019. Vol. 18. Iss. 2. P. 94-100. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814
7. Pan M.X., Xu X.S. Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars // 3rd international conference on energy materials and environment engineering (ICEMEE). Bangkok, Thailand, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/01203
8. Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C. Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced // Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008). Zurich, Switzerland, 2008.
9. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Experimental and theoretical analysis of crack resistance and deformability of concrete beams reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *Proceedings of STCCE 2022, Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 291. P. 381-404. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7\_34
10. Gross S., Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads // *International Conference on High Performance Materials in Bridges*, American Society of Civil Engineers, 2003. P. 451-462. DOI: 10.1061/40691(2003)40
11. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanour A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // *Construction and building materials*. 2015. Vol. 84. P. 354-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
12. Ruan XJ., Lu CH., Xu K., Xuan GY., Ni MZ. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars // *Composite structures*. 2020. Vol. 235. P. 111772 DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772
13. Fei Peng, Weichen Xue. Design approach for flexural capacity of concrete T-beams with bonded prestressed and nonprestressed FRP reinforcements // *Composite Structures*. 2018. Vol. 204. P. 333-341. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.091
14. Sun Y., Liu Y., Wu T., Liu X., Lu H. Numerical analysis on flexural behavior of steel fiber-reinforced LWAC beams reinforced with GFRP bars // *APPLIED SCIENCES-BASEL*/ 2019. Vol. 23. Iss. 9. P. 5128 DOI: 10.3390/app9235128
15. Mirsayapov Il., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2020)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

16. Baša N., Vuković N. K., Ulićević M., Muhadinović M. Effects of internal force redistribution on the limit states of continuous beams with GFRP reinforcement // Applied Sciences (Switzerland). 2020. P. 3973. DOI:10.3390/app10113973
17. Ju M., Park, Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams // Composite Structures. 2017. Vol. 182. P. 74-685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
18. Ветрова О.А. Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 103-114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114 [Vetrova O. A. Pilot Studies of Concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2020. Vol. 24. Iss. 1. P. 103-114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114]
19. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behavior of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Iss. 5. P. 2125-2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007
20. Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K. Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach // Composite Structures. 2020. Vol. 234. P. 111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664
21. Elgabbas F., Ahmed E. A., & Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads // Journal of Composites for Construction. 2017. Vol. 21. Iss. 3. P. 04016098. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
22. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой при длительном приложении нагрузки // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР–2016. Изд-во Чуваш. ун-та, Чебоксары, 2016. – С. 67-72. [Antakov A.B., Antakov I.A. Experimental studies of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement under sustained load application // International conference on new architecture, design construction and renovation NASKR 2016. Cheboksary, 2016. P. 67-72]
23. Pecce M., Manfredi G., Cosenza E. A Probabilistic assessment of deflections in FRP RC beams // Proceedings of 5th International Conference on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-5, Cambridge, 16-18 July, Thomas Telford Publishing. 2001. Vol. 2. P. 887-896.

#### Информация об авторах

**Антаков Игорь Андреевич**, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: igor788@bk.ru

**Сулейманов Альфред Мидхатович**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

#### Information about the authors

**Igor A. Antakov**, senior lector of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: igor788@bk.ru

**Alfred M. Suleymanov**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru