

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

УДК 624.012.454

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-64-73

Расчет момента трещинообразования изгибаемого бетонного элемента, армированного стеклопластиковой арматурой**Моргунов М. В.** ¹ ✉

¹ Брянский государственный инженерно-технологический университет, Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Димитрова, 3

✉ e-mail: 5555@bk.ru

Резюме

Цель исследования. В данной статье рассматриваются нормируемые методы расчета момента трещинообразования в элементах из мелкозернистого бетона, армированных стеклопластиковой арматурой без предварительного напряжения.

Методы. В бетонных элементах, армированных композитной арматурой, момент трещинообразования предлагается определять аналогично железобетонным конструкциям, которые используют нелинейную деформационную модель, обеспечивающую единую связь при расчете по первой и второй группе предельных состояний. Одновременно в действующих нормах разрешается применять расчет момента трещинообразования с использованием упругопластического момента сопротивления сечения.

Точное определение момента трещинообразования является важным элементом расчета по второй группе предельных состояний, особенно соответствие теоретических данных экспериментальным для бетонных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой. Рассмотрены методы расчета: с использованием упругопластического момента и расчет по нелинейной деформационной модели (двух- и трехлинейные диаграммы состояния бетона с параметрами).

В качестве исходных данных для расчета момента трещинообразования по рассматриваемым методикам, приняты опытные данные из эксперимента. Рассмотрены четыре балки, армированные стеклопластиковой арматурой, и одна – металлической. Арматура без предварительного напряжения.

Результаты. Проведен анализ результатов расчета момента трещинообразования по приведенным методикам. Для сравнения с экспериментальными данными, определялась соответствующая моменту трещинообразования нагрузка на балку. Выполнен сравнительный анализ рассматриваемых методов расчета момента трещинообразования с экспериментальными данными. Расчет по трехлинейной диаграмме состояния бетона был наиболее близким к результатам эксперимента, а при использовании методики с двухлинейной диаграммой наблюдается запас более 20%.

Заключение. Данные методы, построенные на основе расчета железобетонных конструкций, обеспечивают разумную сходимость результатов и при использовании стеклопластиковой арматуры, но наибольшую точность к экспериментальным данным обеспечивают для стальной арматуры в пределах 9%.

Ключевые слова: момент трещинообразования; композитная арматура; бетонный элемент; упругопластический момент сопротивления сечения; нелинейная деформационная модель.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Моргунов М.В. Расчет момента трещинообразования изгибаемого бетонного элемента, армированного стеклопластиковой арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 1. С. 64-73. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-64-73.

UDC 624.012.454

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-64-73

Calculation of the Cracking Moment of a Flexible Concrete Element Reinforced with Fiberglass Fitting

Mikhail V. Morgunov¹ ✉

¹ Bryansk State Technological University of Engineering, 3, Prospekt Stanke Dimitrova, Bryansk, 241037, Russian Federation

✉ e-mail: 5555@bk.ru

Abstract

Purpose of research. This article discusses the normalized methods for calculating the cracking moment in elements of fine grained concrete, reinforced with fiberglass fitting without prestressing.

Methods. In concrete elements reinforced with composite fitting, it is proposed to determine the cracking moment in the same way as reinforced concrete structures that use a nonlinear deformation model that provides a single connection when calculating the first and second groups of limit states. At the same time in current standards it is allowed to apply the calculation of the cracking moment using the elastoplastic section modulus.

Accurate determination of the cracking moment is an important element of the calculation for the second group of limit states, especially the consistency of theoretical data with experimental data for concrete elements reinforced with fiberglass fitting. The following calculation methods are considered: using the elastoplastic moment and calculation using a nonlinear deformation model (two- and three-line diagrams of concrete state with parameters).

Experimental data from the experiment have been taken as the initial data for the calculation of the cracking moment for the considered methods. We have considered four beams reinforced with fiberglass fitting, and one - metal. Fitting is without prestressing.

Results. The analysis of the results of the calculation of the cracking moment is carried out by the given methods. For comparison with experimental data, the load on the beam corresponding to the cracking moment is determined. A comparative analysis of the considered methods for the calculation of the cracking moment with experimental data is performed. The calculation using the three-line concrete state diagram is the closest to the experimental results, and when using the technique with the two-line diagram, there is a margin of more than 20%.

Conclusion. These methods, based on the calculation of reinforced concrete structures, provide a reasonable convergence of results when using fiberglass fitting but provide the greatest accuracy to the experimental data for steel fitting within 9%.

Key words: cracking moment; composite fitting; concrete element; elastoplastic section modulus; nonlinear deformation model.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Morgunov M. V. Calculation of the Cracking Moment of a Flexible Concrete Element Reinforced with Fiberglass Fitting. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 64-73 (in Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-64-73.

Введение

Совершенствование бетонных конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой, и разработка новых конструктивных решений строительных конструкций зависит от уточнения существующих и создания новых методов расчета, позволяющих получить более точное описание физической модели конструкции [1–8].

Важным моментом при расчете по второй группе предельных состояний бетонных конструкций является расчет момента трещинообразования [9, 10]. Бетонные конструкции, армированные стеклопластиковой арматурой, в действующих нормах [12, 13], предлагается рассчитывать аналогично железобетонным элементам, используя нелинейную деформационную модель, которая обеспечивает одинаковый подход к расчету конструкций по первой и второй группе предельных состояний [1, 9]. В нелинейной деформационной модели используется трехлинейное состояние диаграммы бетона или двухлинейное. Также расчет может вестись с учетом упругопластического сопротивления момента сечения, применяя правила сопротивления материалов.

Рассмотрим три метода расчета момента трещинообразования элементов из бетона, армированных стеклопластиковой арматурой, и сравним с экспериментальными данными [14]:

1. На основе упругопластического момента сопротивления сечения.

2. По нелинейной деформационной модели с применением двухлинейной диаграммы состояния бетона.

3. По нелинейной деформационной модели с использованием трехлинейной диаграммы состояния бетона.

Материалы и методы решения задачи

Исходными данными для расчетов приняты результаты испытаний балок армированных стальной (БС-1) и стеклопластиковой арматурой (БК-2, БК-3, БК-4, БК-5) без предварительного напряжения.

Бетон: $R_{b,n} = 5.73 \text{ МПа}$, $R_{bt,n} = 0.72 \text{ МПа}$, $E_b = 12000 \text{ МПа}$. Арматура стеклопластиковая: $E_f = 54500 \text{ МПа}$. Арматура стальная: $E_s = 200000 \text{ МПа}$

Поперечное сечение и геометрические размеры образца БК-4 показаны на рисунке 1.

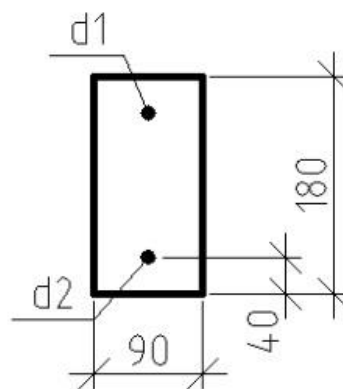


Рис. 1. Поперечное сечение образца БК-4

1. Определение момента трещинообразования на основе упругопластического момента сопротивления сечения

Момент трещинообразования при применении стеклопластиковой арматуры определяется по формуле

$$M_{\text{crc}} = R_{\text{bt,ser}} \cdot W_{\text{pl}} \pm N \cdot e_x, \quad (1)$$

где W_{pl} – упругопластический момент сопротивления сечения по отношению к крайнему растянутому волокну бетона;

e_x – эксцентриситет от точки приложения силы N до ядровой точки, находящейся на наибольшем расстоянии от растянутой зоны сечения элемента.

В сечениях прямоугольного вида значение W_{pl} определяется по упрощенной формуле:

$$W_{\text{pl}} = 1,3 \cdot W_{\text{red}}, \quad (2)$$

где W_{red} – упругий момент сопротивления приведенного сечения относительно растянутой зоны сечения;

$$W_{\text{red}} = \frac{I_{\text{red}}}{y_t}, \quad (3)$$

где I_{red} – момент инерции приведенного сечения относительно о центра тяжести сечения;

$$I_{\text{red}} = I + I_f \alpha_f, \quad (4)$$

где I, I_f – моменты инерции сечений бетона и растянутой стеклопластиковой арматуры соответственно;

α_f – коэффициент приведения стеклопластиковой арматуры к бетону

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_b}, \quad (5)$$

где E_f, E_b – модули упругости стеклопластиковой арматуры и бетона соответственно;

$$A_{\text{red}} = A + A_f \alpha_f, \quad (6)$$

где A_{red} – площадь приведенного поперечного сечения элемента;

A, A_f – площади поперечного сечения бетона и растянутой стеклопластиковой арматуры соответственно;

y_t – расстояние от наиболее растянутого бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента

$$y_t = \frac{S_{\text{red}}}{A_{\text{red}}}, \quad (7)$$

где S_{red} – статический момент инерции площади приведенного поперечного сечения элемента относительно растянутой зоны рассматриваемого сечения.

Расчет момента трещинообразования на основе упругопластического момента сопротивления производится по формулам (1) – (7). Результаты расчета приведены в таблице 1.

2. Определение момента трещинообразования по нелинейной деформационной модели с применением двухлинейной диаграммы состояния бетона

Методика расчета момента трещинообразования M_{crc} по нелинейной деформационной модели приведена в следующем источнике [15].

Таблица 1

Результаты расчета момента трещинообразования при помощи
упругопластического момента сопротивления сечения

№ п/п	Код образца	$A_{red}, \text{см}^2$	$S_{red}, \text{см}^3$	$y_t, \text{см}$	$I_{red}, \text{см}^4$	$W_{red}, \text{см}^3$	$M_{crc}, \text{кН}$
1	БС-1	188,16	1693,50	9,00	5028,16	558,69	0,523
2	БК-2	160,38	1391,10	8,67	4070,68	469,32	0,439
3	БК-3	160,38	1389,66	8,66	4083,43	471,27	0,441
4	БК-4	164,88	1469,54	8,91	4444,83	498,72	0,466
5	БК-5	164,88	1470,97	8,92	4431,37	496,72	0,465

Относительные деформации бетона приведены в [1]: $\varepsilon_{b1,red} = 0.0015$, $\varepsilon_{b2} = 0.0035$, $\varepsilon_{bt1,red} = 0.00008$, $\varepsilon_{bt2} = 0.00015$.

Для нахождения момента трещинообразования необходимо вычислить момент трещинообразования от растянутой арматуры, а также сжатого и растянутого бетона. Момент трещинообразования от бетона вычисляется с помощью перемножения эпюр единичного момента M_{crc} и эпюры усилий в растянутом и сжатом бетоне (рис. 2).

3. Определение момента трещинообразования по нелинейной деформационной модели с применением трехлинейной диаграммы состояния бетона

На рисунке 3 приведена трехлинейная диаграмма состояния бетона.

Расчет момента трещинообразования выполняется аналогично расчету как для двухлинейной диаграммы состояния бетона [9].

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов по всем методикам для всех образцов приведены в таблице 2.

В экспериментальных данных за достижение момента трещинообразования принималась соответствующая относительная деформация растянутой зоны бетона, равная $\varepsilon = 0,00015$. В таблице 2 приведены сравнения экспериментальных и теоретических нагрузок, соответствующих моменту трещинообразования.

В результате теоретического расчета момента трещинообразования по трем методикам наиболее близким к экспериментальным данным оказался расчет по трехлинейной диаграмме состояния бетона. Наибольший запас, при определении момента трещинообразования, наблюдается для методики по двухлинейной диаграмме более 20%.

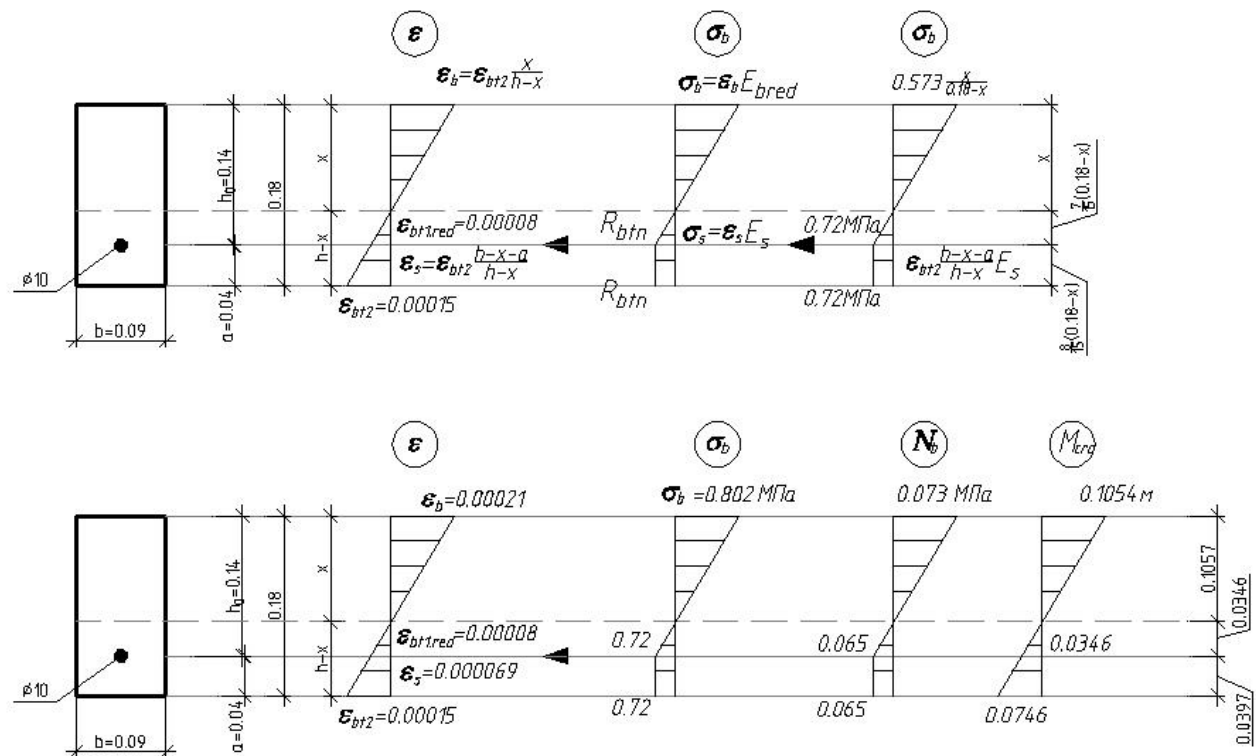


Рис. 2. К определению момента трещинообразования сечения балки БК-4

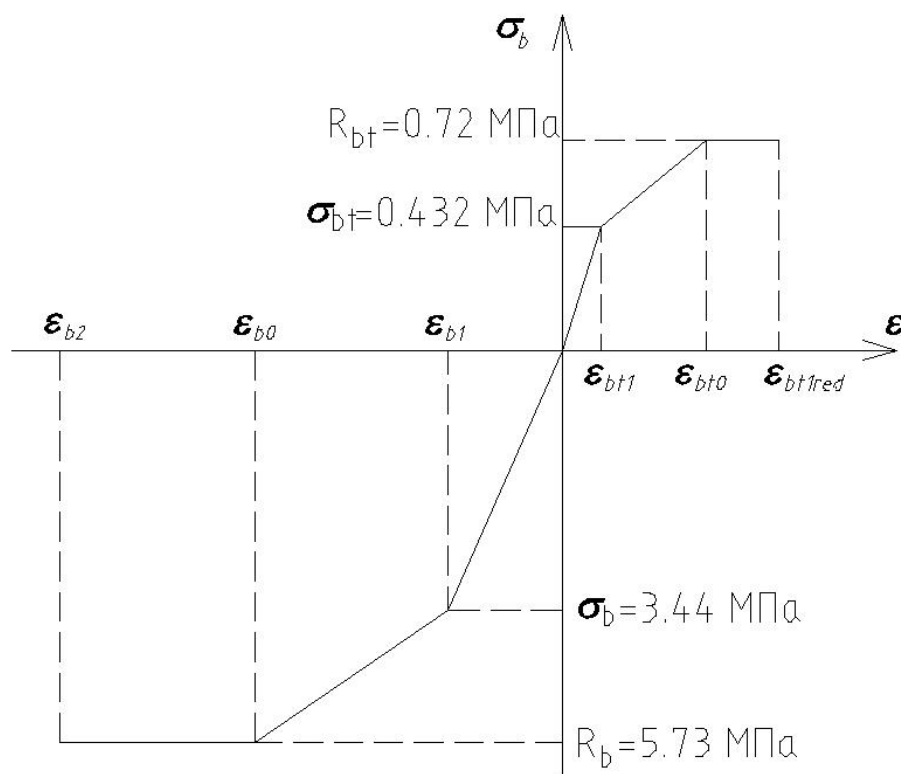


Рис. 3. Трехлинейная диаграмма состояния бетона

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные моменты трещинообразования

№ п/п	Наименование методики	Показатели	БС-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
1	С использованием упругопластического момента сопротивления	$M_{срс}$, кНм	0,523	0,439	0,441	0,466	0,465
		$R_{срс}$, кг	435,83	365,83	367,50	388,33	387,50
2	По двухлинейной диаграмме	$M_{срс}$, кНм	0,448	0,371	0,377	0,395	0,393
		$R_{срс}$, кг	373,33	309,16	314,16	329,16	327,5
3	По трехлинейной диаграмме	$M_{срс}$, кНм	0,655	0,524	0,527	0,557	0,548
		$R_{срс}$, кг	545,83	436,66	439,16	464,16	456,66
4	Эксперимент	$R_{срс}$, кг	600	490,00	410,00	700	770

Выводы и заключение

Данные методы, построенные на основе расчета железобетонных конструкций, обеспечивают разумную сходимость результатов и при использовании стеклопластиковой арматуры наибольшую точность к экспериментальным данным

обеспечивают для стальной арматуры меньше 9%. Дальнейшее уточнение особенностей при использовании стеклопластиковой арматуры в методах расчета момента трещинообразования позволит более точно оценивать бетонную конструкцию.

Список литературы

1. Астахов Ю.В. Экспериментально-расчетная оценка взаимодействия стальной канатной и стеклопластиковой арматуры с бетоном: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2002. 139 с.
2. Беккер А.Т., Уманский А.М., Завгороднев А.В., Иванов Е.С. Study of Stress and Strain State of Flexible Concrete Elements Strengthened by Basalt-Plastic Reinforcement ANK-BM // Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, Korea, June 15-20, 2014 – p.211-214. ISBN 978-1 880653 91-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set).
3. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1986. 265 с.
4. Brik V.B. Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber/BF Composite Rebar Reinforcement, Washinton: Transportation Research Board, 2003.

5. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. (Reported by ACI Committee 440).
6. Building Research Centre, Royal Scientific Society, Amman, Jordan. 2 - Centre for Cement and Concrete, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, United Kingdom.
7. Calibration of flexural design of concrete members reinforced with frp bars. A Thesis, Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering in The Department of Civil and Environmental Engineering.
8. Моргунов М. В. Изгибаемые бетонные элементы конструкций, армированные композитной арматурой // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: сборник научных статей XXI научно-методической конференции ВИТУ (16 марта 2017 года)/ ВИ(ИТ) ВА МТО (ВИТУ). СПб., 2017. С.315-318.
9. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.
10. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. Метод физических моделей сопротивления железобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 51-55.
11. Тамразян А.Г. К теории расчета по предельным состояниям на основе реологической механики железобетона // Бетон и железобетон. 1999. №3.
12. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003:СП 63.13330.2012. Дата введения 2015-01-01.М.: ООО «Аналитик», 2012. 158 с.
13. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. Свод правил: СП 295.1325800.2017 / ТК 465 "Строительство". Введ. 2017-08-21. М., 2017.
14. Курочкина Е.И., Радченко А.Н., Моргунов М.В. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной арматурой // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 5-й международной научной конференции. Курск, 2016. Т.3. С. 48-53.
15. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: АСВ, 2010. 352 с.

Поступила в редакцию 10.01.2019

Подписана в печать 12.02.2019

Reference

1. Astahov Ju.V. Jeksperimental'no-raschetnaja ocenka vzaimodejstvija stal'noj kanatnoj i stekloplastikovoj armatury s betonom. Diss. kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2002, 139 p.
2. Bekker A.T., Umanskij A.M., Zavgorodnev A.V., Ivanov E.S. Study of Stress and Strain State of Flexible Concrete Elements Strengthened by Basalt-Plastic Reinforcement ANK-BM. Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, Korea, June 15-20, 2014 – p.211-214. ISBN 978-1 880653 91-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set).
3. Vasil'ev V.V. Mehanika konstrukcij iz kompozicionnyh materialov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 265 p.
4. Brik V.B. Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber/BF Composite Rebar Reinforcement, Washinton: Transportation Research Board, 2003.
5. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. (Reported by ACI Committee 440).
6. Building Research Centre, Royal Scientific Society, Amman, Jordan. 2 - Centre for Cement and Concrete, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, United Kingdom.
7. Calibration of flexural design of concrete members reinforced with frp bars. A Thesis, Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering in The Department of Civil and Environmental Engineering.
8. Morgunov M. V. Izgibaemye betonnye jelementy konstrukcij armirovannye kompozitnoj armaturoj. Defekty zdaniy i sooruzhenij. Usilenie stroitel'nyh konstrukcij. Sbornik nauchnyh statej XXI nauchno-metodicheskoy konferencii. Saint-Petersburg, 2017, pp. 315-318.
9. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona. Moscow, ASV Publ., 2004, 472 p.
10. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A., Kljueva N.V. Metod fizicheskikh modelej soprotivlenija zhelezobetona. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 12, pp. 51-55.
11. Tamrazjan A.G. K teorii rascheta po predel'nyh sostojanijam na osnove reologicheskoy mehaniki zhelezobetona. *Beton i zhelezobeton*, 1999, no. 3.
12. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003:SP 63.13330.2012. Data vvedenija 2015-01-01. Moscow, 2012, 158 p.

13. Konstrukcii betonnye, armirovannye polimernoj kompozitnoj armaturoj. Pravila proektirovanija. Svod pravil: SP 295.1325800.2017. TK 465 "Stroitel'-stvo". Vved. 2017-08-21. Moscow, 2017.

14. Kurochkina E.I., Radchenko A.N., Morgunov M.V. Deformativnost' izgibaemyh betonnyh jelementov, armiro-vannyh kompozitnoj armaturoj. Pokolenie budushhego: vzgljad molodyh uchenyh. Sbornik nauchnyh statej 5-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Kursk, 2016, vol. 3, pp. 48-53.

15. Kodysh Je.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij iz tjazhelogo betona po prochnosti, treshhinostojkosti i deformacijam. Moscow, ASV Publ., 2010, 352 p.

Received 10.01.2019

Accepted 12.02.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Михаил Валерьевич Моргунов, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Российская Федерация
e-mail: 5555@bk.ru

Mikhail V. Morgunov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Construction design department, Bryansk State Technological University of Engineering, Bryansk, Russian Federation
e-mail: 5555@bk.ru