

УДК 624.075.23

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160)

EDN: IMCDFS

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ АРМАТУРОЙ

Т.А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук

С.А. МАЙОРОВ✉

*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*

Аннотация

Введение. Экспериментами установлено, что при определенном конструировании прочность внецентренно сжатых элементов возрастает за счет работы композитной полимерной арматуры, расположенной в сжатой зоне сечения. Однако зависимости для расчета прочности внецентренно сжатых элементов, представленные в действующем своде правил по проектированию бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой, не позволяют выполнить учет ее работы на сжатие, а потому требуют уточнения.

Цель исследования – разработка методики расчета прочности армированных композитной полимерной арматурой внецентренно сжатых бетонных элементов с учетом ее работы в сжатой зоне сечения.

Материалы и методы. Методика расчета прочности внецентренно сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения разработана с учетом положений действующих норм проектирования и проверена данными экспериментальных исследований, выполненных отечественными и зарубежными исследователями.

Результаты. Получены результаты проверки надежности методики расчета экспериментальными данными испытаний опытных образцов, армированных угле-, стекло- и базальтопластиковой стержневой арматурой с различными видами профиля. Установлено, что при расчете внецентренно сжатых элементов точность и надежность с использованием предложенных зависимостей для вычисления высоты сжатой зоны сечения элементов сопоставима с точностью расчета по зависимостям, принятым в действующем своде правил по проектированию бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой.

Выводы. Предложенные зависимости для вычисления высоты сжатой зоны сечения обеспечивают достаточную точность расчетов прочности внецентренно сжатых бетонных элементов без учета сжатой арматуры и позволяют выполнять расчеты с учетом работы композитной полимерной арматуры на сжатие.

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

Для цитирования: Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;33(2):150–160. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160)

Вклад авторов

Мухамедиев Т.А. – разработка метода расчета прочности армированных композитной полимерной арматурой внецентренно сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения.

Майоров С.А. – разработка методики расчета прочности армированных композитной полимерной арматурой внецентренно сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения и выполнение расчетов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.04.2022

Поступила после рецензирования 05.05.2022

Принята к публикации 17.05.2022

STRENGTH CALCULATION OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE ELEMENTS WITH A COMPOSITE POLYMER REINFORCEMENT

T.A. MUKHAMEDIEV, Dr. Sci. [Engineering]

S.A. MAIOROV✉

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

Abstract

Introduction. According to experimental data, at a certain design, the strength of eccentrically compressed elements increases due to the work of a composite polymer reinforcement located in a compressed cross-sectional area. However, dependences for calculating the strength of eccentrically compressed elements, represented in acting regulations for the design of concrete structures with a composite polymer reinforcement, appear to be inapplicable for calculating the reinforcement compression stress and, therefore, require refinement.

Aim. To develop a methodology for calculating the strength of eccentrically compressed concrete elements with a composite polymer reinforcement, considering the work of the latter in a compressed cross-sectional area.

Materials and methods. Considering the work of a reinforcement in the compressed cross-sectional area, the methodology of calculating the strength of eccentrically compressed elements was developed taking into account the positions of current design standards and verified by the data of experimental studies performed by domestic and foreign researchers.

Results. The results of methodology reliability tests were obtained using the experimental data of test samples with a carbon, glass, and basalt-plastic reinforcement of various profile types. During the calculation of eccentrically compressed elements using the proposed dependencies for calculating the height of an element compressed cross-sectional area, the accuracy and reliability were established to be comparable with those calculated according to dependencies adopted in current regulations for the design of concrete structures with a composite polymer reinforcement.

Conclusions. The proposed dependencies for calculating the height of a compressed cross-sectional area provide the sufficient accuracy of strength calculations for eccentrically compressed concrete elements both with and without taking into account the compression work of a composite polymer reinforcement.

Keywords: building structures, compressed elements, composite polymer reinforcement, strength, calculation methodology

For citation: Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Strength calculation of eccentrically compressed concrete elements with a composite polymer reinforcement. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;33(2):150–160. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160)

Author contribution statements

Mukhamediev T.A. – development of the method for calculating the strength of non-centrally compressed elements with fiber reinforced polymer bars taking account into the operation of the reinforcement in the compressed zone of cross-section.

Maiorov S.A. – development of the methodology for calculating the strength of non-centrally compressed elements with fiber reinforced polymer bars taking account into the operation of the reinforcement in the compressed zone of cross section, performing calculations.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.04.2022

Revised 05.05.2022

Accepted 17.05.2022

Введение

В своде правил по проектированию бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой (АКП) СП 295.1325800.2017 [1] расчет элементов по прочности рекомендовано выполнять методом предельных усилий или по деформационной модели. Физические соотношения для расчета таких элементов приняты на основе положений, установленных для расчета железобетонных конструкций, но с учетом особенностей свойств композитной арматуры. В связи с низким сопротивлением композитной полимерной арматуры осевому сжатию в своде правил [1] при расчете прочности элементов работа арматуры в сжатой зоне сечения не учитывается. Вместе с тем экспериментально установлено [4], что при определенном конструировании прочность внецентренно сжатых элементов возрастает за счет работы сжатой композитной арматуры, и в ряде случаев это целесообразно учитывать в расчетах. Однако принятая в [1] методика расчета внецентренно сжатых элементов не позволяет выполнить расчеты их прочности с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения. Для выполнения таких расчетов необходимо принять правила нормирования расчетного сопротивления арматуры осевому сжатию R_{fc} , а также установить зависимости для вычисления высоты сжатой зоны элемента с учетом работы сжатой арматуры.

Цель

Целью исследования, результаты которого приведены в статье, является разработка методики расчета прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой, с учетом ее работы в сжатой зоне сечения.

Материалы и методы

Методику расчета прочности армированных композитной полимерной арматурой внецентренно сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения разрабатывали на основе положений [1] и проверяли данными экспериментальных исследований, выполненных отечественными и зарубежными исследователями.

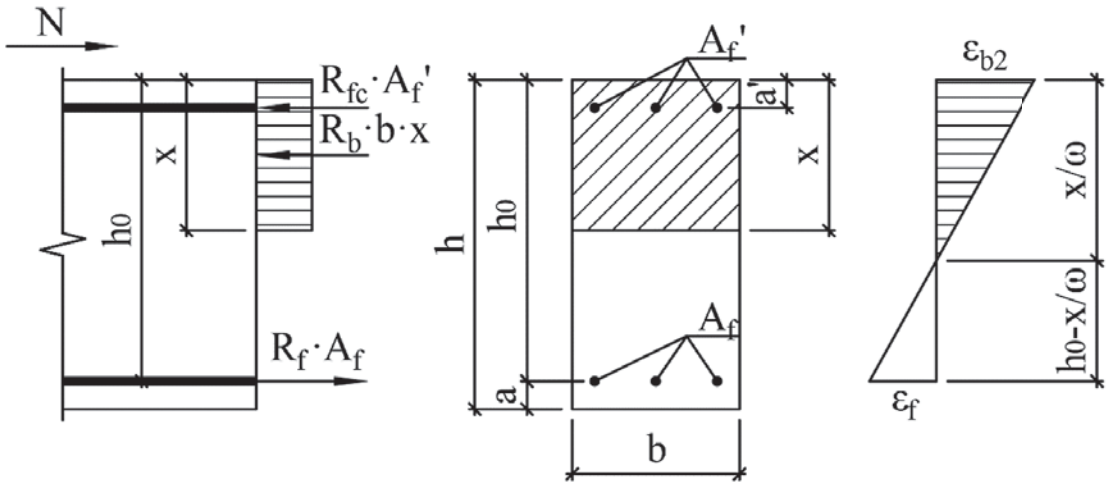


Рис. 1. Схема усилий и деформаций в нормальном сечении внецентренно сжатого элемента прямоугольного сечения при расчете его прочности

Fig. 1. Diagram of forces and deformations in the normal section of an eccentrically compressed element with a rectangular cross-section during strength calculations

При расчете методом предельных усилий условие прочности внецентренно сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения будет иметь вид (рис. 1):

$$N \times e \leq R_b \times b \times x \times (h_0 - 0,5 \times x) + R_{fc} \times A'_f \times (h_0 - a') \quad (1)$$

Высоту сжатой зоны сечения внецентренно сжатых элементов определяют по формулам, устанавливаемым в зависимости от уровня напряжений в растянутой арматуре в предельном по прочности состоянии.

Если в предельном по прочности состоянии напряжения в растянутой арматуре σ_f достигают ее сопротивления осевому растяжению R_f , то высоту сжатой зоны x определяют из равенства внешних и внутренних продольных сил в сечении:

$$N = R_b \times A_b + R_{fc} \times A'_f - R_f \times A_f. \quad (2)$$

Композитная полимерная арматура имеет низкий модуль упругости и высокое сопротивление осевому растяжению, поэтому в предельном по прочности состоянии напряжения в композитной арматуре, как правило, не достигают своих предельных значений. Принятая в [1] для этого случая формула для вычисления высоты сжатой зоны сечения элемента не позволяет учитывать работу арматуры в сжатой зоне сечения и потому потребовала изменения.

Для этого были рассмотрены два варианта определения высоты сжатой зоны сечения при расчете прочности внецентренно сжатых элементов методом предельных усилий.

В первом варианте для определения высоты сжатой зоны сечения использована принятая для конструкций со стальной арматурой линейная зависимость напряжений σ_f от относительной высоты сжатой зоны сечения $\xi = x/h_0$ в пределах от ее граничного значения $\xi_R = x_R/h_0$ до 1: от R_f (при $\xi \leq \xi_R$) до минус R_{fc} (при $\xi = 1$) (рис. 2), учитывая при этом, что для композитной полимерной арматуры $R_f \neq R_{fc}$:

$$\sigma_f = R_f - \frac{\xi - \xi_R}{1 - \xi_R} \times (R_f + R_{fc}). \quad (3)$$

Из совместного решения уравнений (2) и (3) высота сжатой зоны сечения прямоугольной формы при $\xi > \xi_R$ составит:

$$x = \frac{N + A_f \times \frac{R_f + R_{fc} \times \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{fc} \times A'_f}{R_b \times b + \frac{(R_f + R_{fc}) \times A_f}{h_0 \times (1 - \xi_R)}}. \quad (4)$$

При расчете элемента без учета сжатой арматуры в формуле (4) достаточно принять $A'_f = 0$ и $R_{fc} = 0$. Полученная зависимость будет отличаться от принятой в [1]:

$$x = \frac{N + \frac{R_f \times A_f}{1 - \xi_R}}{R_b \times b + \frac{R_f \times A_f}{h_0 \times (1 - \xi_R)}} \quad (5)$$

Во втором варианте для определения высоты сжатой зоны сечения внецентренно сжатых элементов с учетом сжатой арматуры также, как и в [3], использовали гипотезу линейного распределения относительных деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента (рис. 1):

$$\frac{\varepsilon_{b2} + \varepsilon_f}{h_0} = \frac{\varepsilon_{b2} \times \omega}{x}. \quad (6)$$

В этом случае зависимость для вычисления высоты сжатой зоны сечения определили из совместного решения уравнений (2) и (6), принимая в уравнении (2) вместо параметра R_f напряжение в растянутой арматуре в предельном по прочности состоянии, равное $\sigma_f = \varepsilon_f \times E_f \times A_f$

$$x = \left(\sqrt{0,5 \times (\mu_f \times \alpha + \mu'_f \times \alpha_R - \alpha_N)} \right)^2 + \mu_f \times \alpha \times \omega - 0,5 \times (\mu_f \times \alpha + \mu'_f \times \alpha_R - \alpha_N) \times h_0 \quad (7)$$

где

$$\mu_f = \frac{A_f}{b \times h_0}; \mu'_f = \frac{A'_f}{b \times h_0}; \alpha = \frac{E_f}{E_{b2}}; E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}}; \alpha_R = \frac{R_{fc}}{R_b}; \alpha_N = \frac{N}{R_b \times b \times h_0}$$

$$\varepsilon_{b2} = 0,0035; \omega = 0,8$$

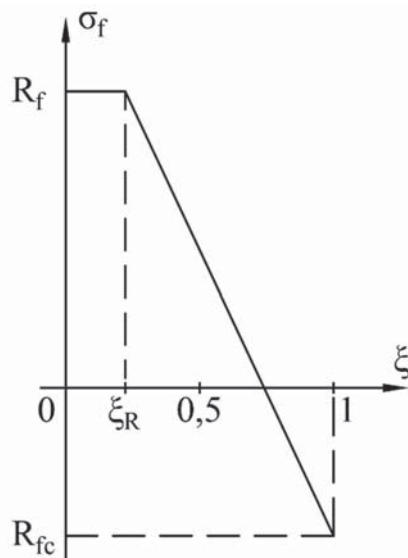


Рис. 2. Расчетная зависимость напряжений в арматуре от относительной высоты сжатой зоны сечения внецентренно сжатого элемента

Fig. 2. Calculated dependence of reinforcement stresses on the relative height of a compressed cross-sectional area in an eccentrically compressed element

Принимая в формуле (7) $\mu'_f = 0$, получим зависимость для расчета элемента без учета сжатой арматуры

$$x = \sqrt{[0,5 \times (\mu_f \times \alpha - \alpha_N)]^2 + \mu_f \times \alpha \times \omega - 0,5 \times (\mu_f \times \alpha - \alpha_N)} \times h_0 \quad (8)$$

Результаты

Сравнение высоты сжатой зоны сечения элемента, вычисленной по зависимостям (5) и (8), показало, что значения высоты сжатой зоны элемента, получаемые по формуле (8) и принятой в [1] формуле близки между собой, а формула (5) приводит к более высоким значениям. Например, для внецентренно сжатого с эксцентриситетом $e = h_0$ элемента прямоугольного сечения из бетона класса В25, армированного композитной арматурой с характеристиками $R_f = 600$ МПа и $E_f = 50000$ МПа, с увеличением коэффициента армирования $\mu_f = A_f / (b \times h_0)$ до 2,8 % расхождение достигает 46 % (рис. 3).

При этом расчетные значения несущей способности элемента, вычисленные с использованием зависимости (5), также более высокие. Так, для элемента с рассмотренными выше характеристиками бетона и арматуры с увеличением коэффициента армирования до 2,8 % значение прочности повышается до 21 % (рис. 4).

Влияние предложенных зависимостей для высоты сжатой зоны сечения на точность расчета несущей способности внецентренно сжатого элемента оценивали по результатам расчетов опытных образцов. Для этого были собраны и проанализированы результаты экспериментальных исследований опытных образцов, испытанных на внецентренное сжатие отечественными и зарубежными исследователями. Всего в обработку было включено

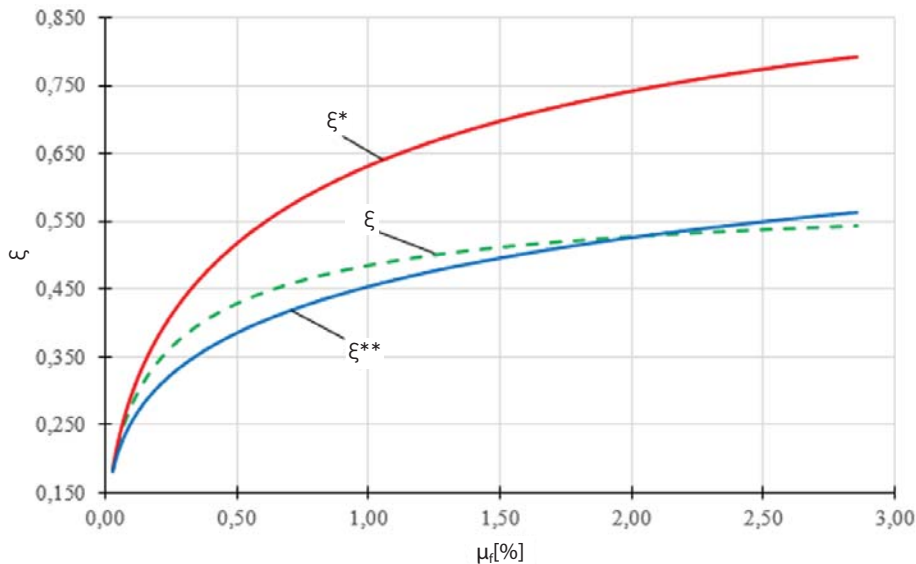


Рис. 3. Сравнение относительной высоты сжатой зоны в предельном по прочности состоянии элемента, вычисленной по зависимостям [1] – ξ , по формуле (5) – ξ^* и формуле (8) – ξ^{**}

Fig. 3. Comparison of the compressed area relative height in the ultimate strength state of an element calculated by the dependencies of [1] – ξ , according to formula (5) – ξ^* and formula (8) – ξ^{**}

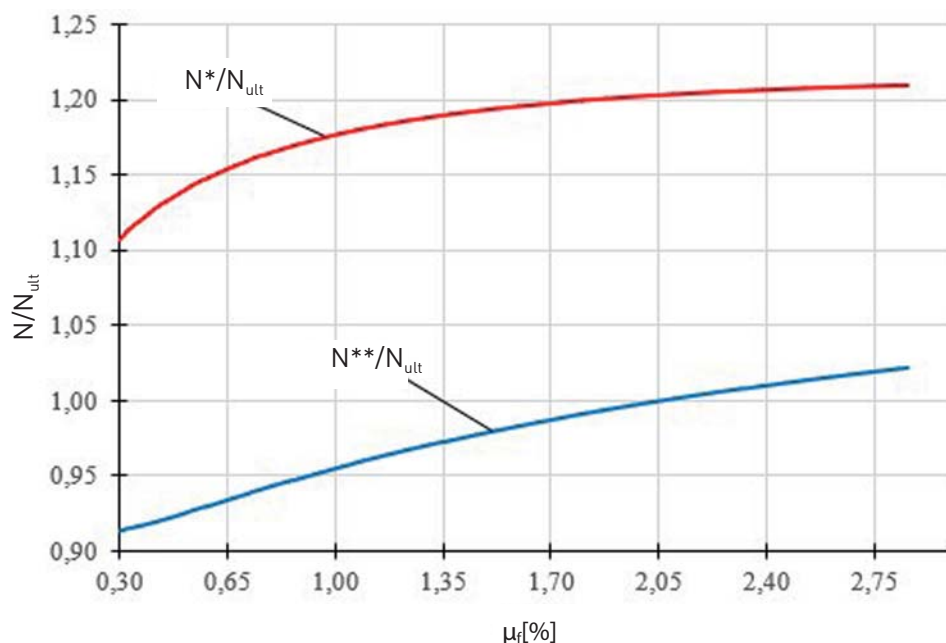


Рис. 4. Сравнение расчетной несущей способности внецентренно сжатых элементов, вычисленной методом предельных усилий с использованием зависимости (5) – N^* и (8) – N^{**} и зависимости, принятой в [1] – N_{ult}
Fig. 4. Comparison of the bearing capacity for eccentrically compressed elements calculated by the critical force method using dependences (5) – N^* and (8) – N^{**} , as well as the dependence adopted in [1] – N_{ult}

180 образцов с прямоугольной формой поперечного сечения, при разрушении которых соблюдалось условие $\xi > \xi_R$. Выборка включала опытные образцы, армированные угле-, стекло- и базальтопластиковой стержневой арматурой с различными видами профиля. Расчеты опытных образцов методом предельных усилий выполнили с определением высоты сжатой зоны сечения образцов в предельном по прочности состоянии по указаниям [1] и по формулам (5) и (8). Работу арматуры в сжатой зоне сечения в расчетах не учитывали. Сопоставление опытных значений несущей способности опытных образцов с расчетными, вычисленными по трем вариантам расчета, показаны на рис. 5.

Для общей выборки среднее значение отношения опытной и расчетной несущей способности составило:

- 1,030 при среднеквадратическом отклонении 0,207 – при расчете с использованием для вычисления высоты сжатой зоны сечения образцов принятой в [1] зависимости;
- 0,923 при среднеквадратическом отклонении 0,187 – при расчете с использованием зависимости (5) для вычисления высоты сжатой зоны сечения;
- 1,143 при среднеквадратическом отклонении 0,195 – при расчете с использованием зависимости (8) для вычисления высоты сжатой зоны сечения.

В целом результаты расчетов прочности опытных образцов, выполненных с использованием всех рассмотренных зависимостей для вычисления сжатой зоны сечения, близки к опытным значениям их несущей способности.

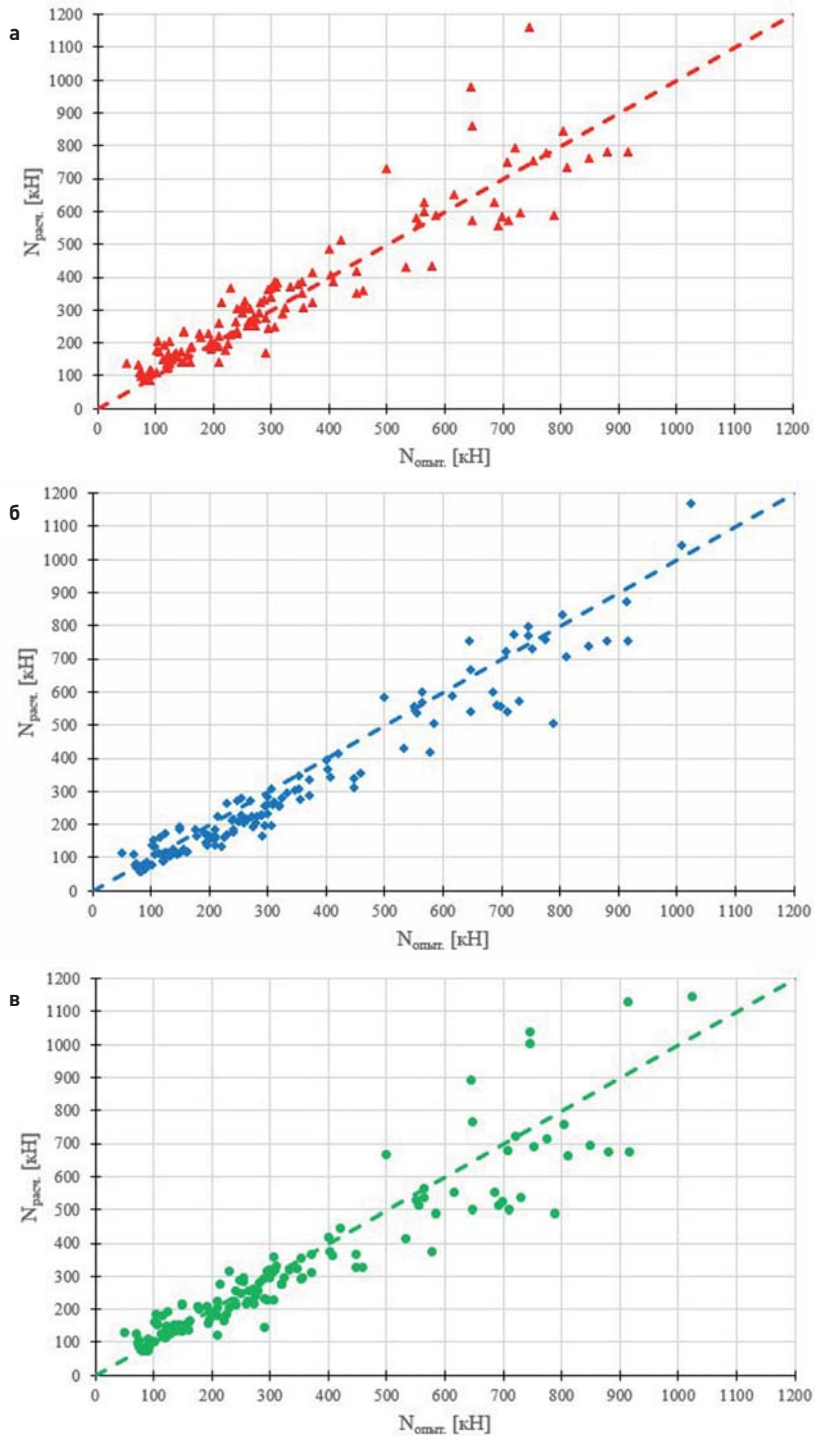


Рис. 5. Отношение опытной несущей способности образцов и расчетной, вычисленной методом предельных усилий с использованием зависимости [5] – а, [8] – б, и зависимости, принятой в [1] – в
Fig. 5. The ratio of the experimental sample bearing capacity and that calculated by the critical force method using dependences [5] – а and [8] – б, as well as the dependence adopted in [1] – в

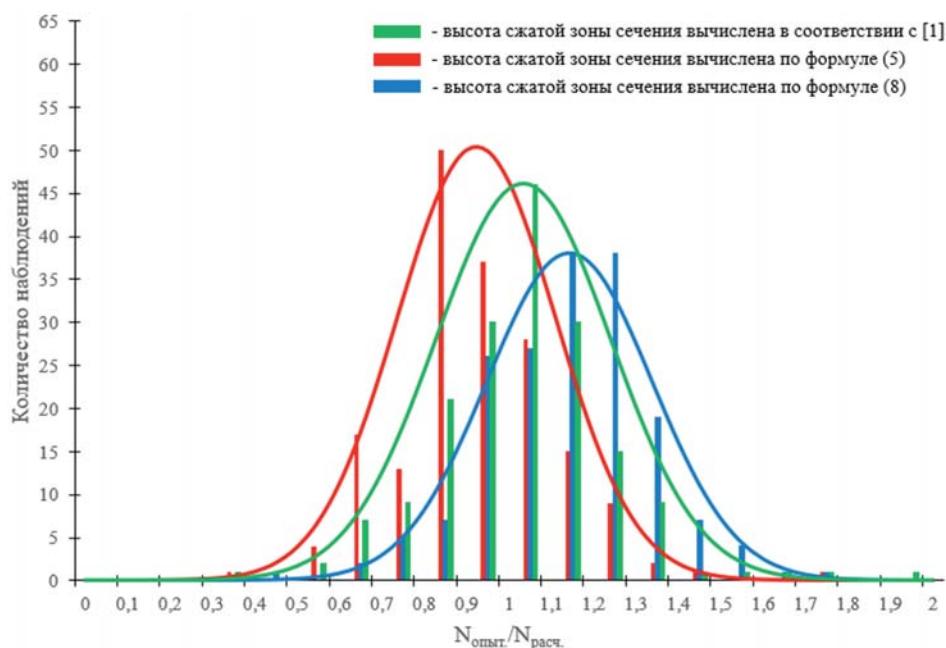


Рис. 6. Гистограммы распределений отношения опытной несущей способности образцов и ее расчетных значений, вычисленных с использованием формулы [5], формулы [8] и зависимостей, принятых в [1] для вычисления высоты сжатой зоны сечения

Fig. 6. Distribution histograms for the ratio of experimental bearing capacity and its values calculated using formula (5), formula (8), and dependences accepted in [1] for calculating the height of a compressed cross-sectional area

Выводы

Таким образом, использование предложенных зависимостей (5) и (8) для вычисления высоты сжатой зоны сечения с одной стороны обеспечивает высокую точность расчетов внецентренно сжатых бетонных элементов без учета сжатой арматуры, а с другой – позволяют выполнять расчеты прочности с учетом работы композитной полимерной арматурой на сжатие.

Список литературы

1. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
2. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.
3. Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В. К расчету по прочности изгибаемых конструкций из бетона с композитной арматурой. Строительная механика и расчет сооружений. 2016;(4):18–22.
4. Лапшинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой. Строительство и реконструкция. 2018;(4):20–29.
5. Фридман Л.С. Прочность и трещиностойкость внецентренно сжатых бетонных элементов, предварительно напряженных стеклопластиковой арматурой: дис. ... канд. техн. наук. Минск; 1983.
6. Уманский А.М. Совершенствование методов расчета конструкций морских гидротехнических сооружений из композитобетона с использованием базальтопластиковой арматуры: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток; 2017.

7. Невский А.В. Прочность сжатых углеорофобетонных элементов с углекомпозитным стержневым и внешним армированием при кратковременном динамическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. Томск; 2018.
8. Alwash N.A., Jasim A.H. Behavior of short concrete columns reinforced by CFRP bars and subjected to eccentric load. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015;6(10);15–24.
9. Duy N.P., Anh V.N., Minh N., Anh T., Polikutin A.E. Load-carrying capacity of short concrete columns reinforced polymer bars under concentric axial load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018;9(2):1712–1719. <https://doi.org/10.35940/ijeat.b2372.129219>
10. Elchalakani M., Ma G. Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*. 2017;151:93–104. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.023>
11. Fan X., Zhang M.. Behavior of inorganic polymer concrete columns reinforced with basalt FRP bars under eccentric compression: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2016;104:44–56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.020>
12. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Nanni A., Shield C.K. Eccentric behavior of full-scale reinforced concrete columns with glass fiber-reinforced polymer bars and ties. *ACI Structural Journal*. 2018;115(2):489–499. <https://doi.org/10.14359/51701107>
13. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Shield C.K., Nanni A. Effect of glass fiber-reinforced polymer reinforcement ratio on axial-flexural strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 2018;115(4):1049–1061. <https://doi.org/10.14359/51701279>
14. Hadi M.N., Youssef J. Experimental investigation of GFRP-reinforced and GFRP-encased square concrete specimens under axial and eccentric load, and four-point bending test. *Journal of Composites for Construction*. 2016;20(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000675](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000675)
15. Khorramian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2017;151:761–773. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.064>
16. Othman Z.S., Mohammad A.H. Behavior of eccentric concrete columns reinforced with carbon fibre-reinforced polymer bars. *Advances in Civil Engineering*. 2019;2019:1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/1769212>
17. Salah-Eldin A., Mohamed H.M., Benmokrane B. Axial-Flexural performance of high-strength-concrete bridge compression members reinforced with basalt-FRP bars and ties: experimental and theoretical investigation. *Journal of Bridge Engineering*. 2019;24(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001448](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001448)
18. Xue W., Peng F., Fang Z. Behavior and design of slender rectangular concrete columns longitudinally reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2018;115(2):311–322. <https://doi.org/10.14359/51701131>

References

1. SP 295.1325800.2017 Concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement. Design rules. Moscow: Standartinform; 2017 (in Russian).
2. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russian).
3. Mukhamediev T.A., Kuzevanov D.V. On the calculation of the strength of bent structures made of concrete with composite reinforcement. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* = Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2016;4(4):18–22 (in Russian).
4. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. On the effect of transverse reinforcement on the strength and deformability of compressed concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* = Building and Reconstruction. 2018;4(4):20–29 (in Russian).
5. Friedman L.S. Strength and crack resistance of non-centrally compressed concrete elements prestressed with fiberglass reinforcement [dissertation]. Minsk; 1983 (in Russian).
6. Umansky A.M. Improvement of methods for calculating structures of marine hydro-technical structures made of composite concrete using basalt-plastic armature [dissertation]. Vladivostok; 2017 (in Russian).
7. Nevsky A.V. Strength of compressed carbon-fiber concrete elements with carbon composite core and external reinforcement under short-term dynamic loading [dissertation]. Tomsk; 2018 (in Russian).

8. Alwash N.A., Jasim A.H. Behavior of short concrete columns reinforced by CFRP bars and subjected to eccentric load. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015;6(10);15–24.
9. Duy N.P., Anh V.N., Minh N., Anh T., Polikutin A.E. Load-carrying capacity of short concrete columns reinforced polymer bars under concentric axial load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018;9(2):1712–1719. <https://doi.org/10.35940/ijeat.b2372.129219>
10. Elchalakani M., Ma G. Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*. 2017;151:93–104. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.023>
11. Fan X., Zhang M.. Behavior of inorganic polymer concrete columns reinforced with basalt FRP bars under eccentric compression: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2016;104:44–56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.020>
12. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Nanni A., Shield C.K. Eccentric behavior of full-scale reinforced concrete columns with glass fiber-reinforced polymer bars and ties. *ACI Structural Journal*. 2018;115(2):489–499. <https://doi.org/10.14359/51701107>
13. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Shield C.K., Nanni A. Effect of glass fiber-reinforced polymer reinforcement ratio on axial-flexural strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 2018;115(4):1049–1061. <https://doi.org/10.14359/51701279>
14. Hadi M.N., Youssef J. Experimental investigation of GFRP-reinforced and GFRP-encased square concrete specimens under axial and eccentric load, and four-point bending test. *Journal of Composites for Construction*. 2016;20(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000675](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000675)
15. Khorramian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2017;151:761–773. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.064>
16. Othman Z.S., Mohammad A.H. Behavior of eccentric concrete columns reinforced with carbon fibre-reinforced polymer bars. *Advances in Civil Engineering*. 2019;2019:1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/1769212>
17. Salah-Eldin A., Mohamed H.M., Benmokrane B. Axial-Flexural performance of high-strength-concrete bridge compression members reinforced with basalt-FRP bars and ties: experimental and theoretical investigation. *Journal of Bridge Engineering*. 2019;24(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001448](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001448)
18. Xue W., Peng F., Fang Z. Behavior and design of slender rectangular concrete columns longitudinally reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2018;115(2):311–322. <https://doi.org/10.14359/51701131>

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
тел.: +7 (499) 171-75-17

Takhir A. Mukhamediyev, Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher, Laboratory of Theory of Reinforced Concrete and Structural Systems of the NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: takhir50@rambler.ru
tel.: +7 (499) 171-75-17

Станислав Александрович Майоров✉, ведущий инженер лаборатории теории железобетона и конструктивных систем НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: maiorov.st@gmail.com
тел.: +7 (499) 171-75-17

Stanislav A. Maiorov✉, Chief Engineer, Laboratory of Theory of Reinforced Concrete and Structural Systems of the NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: maiorov.st@gmail.com
tel.: +7 (499) 171-75-17

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author