

## К методике расчета по прочности железобетонных гибких внецентренно сжатых стоек

С.В. Георгиев<sup>1</sup>, А. И. Соловьёва<sup>1</sup>, М.Ю. Беккиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону.

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

**Аннотация:** В данной работе представлена, разработанная авторами настоящей научной статьи, методика расчета по прочности железобетонных внецентренно сжатых стоек по действующей нормативной методике, согласно СП 63.13330.2018. Особенностью данной методики является условие, что, при расчёте по прочности, неизвестна внешняя сила, в свою очередь, нормативная методика, наоборот, ориентирована на вычисление площади поперечного сечения металлической арматуры при условии заранее известной внешней силы. Обратная задача нормами не предусматривается, так как используется в основном в научных целях. Следовательно, разработанная нами методика имеет большую ценность для научно-исследовательских работ, где важным фактором является определение прочности образцов для последующего сравнения с прочностью соответствующих эталонных образцов и разработки новых предложений к методикам расчёта.

Для удобства читателя, разработанная методика расчёта представлена в виде примера расчета по прочности одного внецентренно сжатого железобетонного образца, с пояснениями и ссылками на формулы нормативной литературы. Рассчитанный образец был реально изготовлен и испытан в лаборатории кафедры ЖиКК ДГТУ и все его характеристики были найдены опытным путём, следовательно, расчётная методика основывается на сравнении с результатами экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** сталь, тяжелый бетон, железобетон, испытание, стойка, эксцентриситет, прочность, внецентренное сжатие.

Современное строительство позволяет создавать уникальные здания, высотой превышающие уровень облаков и сооружения, имеющие сложные архитектурные формы, отличающиеся привлекательными архитектурными дизайнами [1,2]. Всё это становится возможным благодаря развитию технологий и систем несущих конструкций, воспринимающих огромные нагрузки [3,4]. Основным материалом несущих конструкций является железобетон [5, 6]. Совместная работа бетона и арматуры позволяет максимально эффективно использовать эти два материала в сжатой и растянутых зонах [7,8], при этом обеспечивая надёжную совместную работу на долгие годы [9]. Научные исследования ведутся в области

---

совершенствования материалов, из которых изготавливаются конструкции [10-12]. Создаются различного рода добавки [13,14], улучшающие прочностные и деформационные свойства бетона, также исследуются влияние металлических и композитных фибр [15,16], которые увеличивают деформативность бетона на сжатие и сопротивление железобетона на растяжение [17]. Постоянно создаются и изучаются различного рода изделия, в основе которых используются нетрадиционное армирование металлом и композитом [18-20]. В качестве примера можно привести изготовление сжатых конструкций, где металлическая арматура в виде трубы находится снаружи, а саморасширяющийся бетон заливается внутрь [21]. Аналогичная система из композитного внешнего бандажа используется при увеличении прочностных свойств существующих готовых железобетонных конструкций [22-24]. Все научные разработки нацелены на увеличение эффективности несущих конструкций, уменьшение их стоимости и габаритных размеров, а также сроков изготовления. Исследование, в области увеличения эффективности несущих элементов зданий и сооружений, является перспективным и актуальным для развития современного строительства.

Из всех сжатых элементов наибольшей популярностью пользуются железобетонные колонны. Нагрузка, передаваемая от перекрытия, легко воспринимается колоннами, при этом даёт возможность архитекторам и дизайнерам воплощать свои проекты в реальность. Увеличение прочности колонн приводит к уменьшению их габаритных размеров, что позволяет сохранять полезную площадь помещений. Согласно современным научным исследованиям, большую популярность набирают железобетонные композитные системы [25], позволяющие увеличить прочность тяжёлого бетона до значений высокопрочного бетона. Однако, для определения эффективности новых систем создания железобетонных композитных систем, необходимо выполнить сопоставление теоретических расчётов с

---

экспериментальными. В данном вопросе возникли сложности, так как нормативные методики расчёта не позволяют определять по характеристикам материалов их прочность. Решение данной проблемы и является целью настоящей статьи.

Как показал обзор нормативной (СП 63.13330.2018), и научно-технической отечественной [26-28] и иностранной [29-31] литературы по проектированию железобетонных конструкций в области расчёта по прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов, все методики ориентированы на определение характеристик образцов (габариты поперечного сечения колонн, площадь арматуры) под заданную нагрузку. Другими словами, целью расчетов является определение габаритов конструкций и их внутреннего армирования.

В свою очередь, при необходимости определения прочности внецентренно сжатых железобетонных конструкций, где расчёт ведётся по балочной схеме, возникает необходимость определения коэффициента гибкости  $\eta$ , однако в процессе расчета возникает ряд сложностей. Во-первых, для того чтобы определить коэффициент гибкости  $\eta$  необходимо знать внешнюю силу  $N$ . При условии проектирования железобетонных внецентренно сжатых конструкций внешняя сила определяется путем сбора нагрузок, однако при выполнении научных исследований прочность конструкций нам неизвестна и определяется только после проведения экспериментальных исследований, а для начала проведения экспериментальных исследований требуется знать теоретическую прочность для определения этапов нагружения. Следовательно, при использовании нормативных методик расчетов «круг замкнулся», при нахождении прочности  $N$  необходимо определить коэффициент  $\eta$ , а при определении коэффициента  $\eta$  необходимо знать прочность  $N$ , то есть необходимо найти неизвестную через неизвестную. В подобных случаях расчёт ведётся

---

итерационно, методом последовательных приближений. Поиск методик итерационного расчета, согласно действующего СП 63.13330.2018 результатов не дал, что и стало основной причиной написания настоящей статьи.

Для подтверждения точности итерационной методики расчета по прочности, на кафедре ЖИКК ДГТУ была изготовлена и испытана гибкая железобетонная стойка, работающая с эксцентриситетом приложения нагрузки, равным  $0,32h$ . В данном случае нагрузка выходит за ядро сечения и конструкция разрушается по второму случаю предельных состояний. Характеристики испытанной стойки, а также конструкция каркаса и результаты испытания приведены в работах [32-34].

Ниже приведена методика расчета на примере опытной железобетонной стойки, а также произведено сравнение с экспериментальными результатами прочности. Пример расчета расписан пошагово на каждом этапе итерационного расчёта.

1. Исходные данные приведены в табл. 1:

Таблица 1

Исходные данные характеристик опытного образца, полученные в результате экспериментальных исследований

$h$	$b$	$l_0$	$R_{sn}$	$R_{sc}$	$A_s$	$A'_s$	$\bar{R}$	$e_0$	$E_s$	$E_b$	$a$	$a'$
см	см	см	кгс·с/см <sup>2</sup>	кгс·с/см <sup>2</sup>	см <sup>2</sup>	см <sup>2</sup>	кгс/см <sup>2</sup>	см	кгс·с/см <sup>2</sup>	кгс·с/см <sup>2</sup>	см	см
12,5	25	240	5000	4000	2,261	2,26	434,4	4	2000000	365000	3	3

2. Определение призменной прочности бетона и эксцентриситетов, относительно растянутой и сжатой арматуры.

$$R_b = \bar{R}(0.77 - 0.0001\bar{R}) = 434.4(0.77 - 0.0001 \cdot 434.4) = 315.6 \text{ кгс/см}^2$$

$$h_0 = h - a = 12.5 - 3 = 9.5 \text{ см} \quad e = \frac{h_0 - a'}{2} + e_0 = \frac{9.5 - 3}{2} + 4 = 7.25 \text{ см}$$

$$e' = \frac{h_0 - a'}{2} - e_0 = \frac{9,5 - 3}{2} - 4 = -0,75 \text{ см} \quad (1)$$

3. Определение сжатой зоны бетона  $x$  производится по формуле (2), которая построена относительно действия внешней нагрузки, где сумма всех моментов сил сечения равна нулю. В формуле (2) последнее слагаемое авторами настоящей статьи было предложено заменить  $R_S$  на  $\sigma_s$ , при этом  $\sigma_s$  предлагается определять по формуле (3), где в свою очередь, по формуле (4) заменяется значение эпсилон  $\varepsilon_{b2}$  на эпсилон  $\varepsilon_{b,ult}$

$$R_b \cdot b \cdot x \cdot (e - h_0 + x/2) \pm R_{SC} \cdot A'_S \cdot e' - \sigma_s \cdot A_S \cdot e = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_s = \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot \left( \frac{0,8 \cdot h_0}{x} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{b,ult} \cdot 10^5 = 1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot \alpha - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot \alpha) \cdot e^{-5,75 \cdot \sqrt[3]{\alpha \cdot \frac{e_0}{h_0}}} \right) \quad (4)$$

Расчет стойки:

$$\varepsilon_{b,ult} \cdot 10^5 =$$

$$1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot 0,114 - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot 0,114) \cdot 7,25^{-5,75 \cdot \sqrt[3]{0,114 \cdot \frac{4}{12,5}}} \right) = 295,2;$$

$$\text{где } \alpha = \mu \cdot \frac{R_s}{R_b} = 0,0072 \cdot \frac{5000}{315,62} = 0,114; \mu = \frac{A_s}{A_b} = \frac{2,26}{25 \cdot 12,5} = 0,0072$$

$$\varepsilon_{b,ult} = 295,2 / 10^5 = 0,002952;$$

В формуле (2)  $\pm$  заменяется на  $+$ , так как значение  $e'_n$  (1) будет вставляться в расчет со своим знаком. Все известные значения в формуле (2) численно вставляются, приведя уравнение к кубическому по отношению к сжатой зоне бетона –  $x$ .

$$R_b \cdot b \cdot x \cdot (e - h_0 + x/2) + R_{SC} \cdot A'_S \cdot e' - \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot \left( \frac{0,8 \cdot h_0}{x} - 1 \right) \cdot A_S \cdot e = 0$$

$$R_b \cdot b \cdot x \cdot e - R_b \cdot b \cdot x \cdot h_0 + R_b \cdot b \cdot x \cdot \frac{x}{2} + R_{SC} \cdot A'_S \cdot e' -$$

$$-\frac{A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot 0,8 \cdot h_0}{x} + A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s = 0 \mid \cdot x$$

$$R_b \cdot b \cdot x^2 \cdot e - R_b \cdot b \cdot x^2 \cdot h_0 + 0,5 \cdot R_b \cdot b \cdot x^3 + R_{sc} \cdot A_s' \cdot e' \cdot x -$$

$$- A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot 0,8 \cdot h_0 + A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot x = 0$$

$$(0,5 \cdot R_b \cdot b)x^3 + (e - h_0) \cdot R_b \cdot b)x^2 + (R_{sc} \cdot A_s' \cdot e' + A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s) \cdot x - A_s \cdot e \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot 0,8 \cdot h_0 = 0$$

$$(0,5 \cdot 315,6 \cdot 25)x^3 + ((7,25 - 9,5) \cdot 315,6 \cdot 25)x^2 + (4000 \cdot 2,261 \cdot$$

$$-0,75 + 2,261 \cdot 7,25 \cdot 0,00295 \cdot 2 \cdot 106 \cdot x - 2,261 \cdot 7,25 \cdot 0,00295 \cdot 2 \cdot 106 \cdot 0,8 \cdot 9,5 = 0$$

$$3945x^3 + (-17753,5)x^2 + 89974,7 \cdot x - 735353,9 = 0$$

Кубическое уравнение решается в программе Excel методом «автоматического подбора значений». Проверка данного метода осуществляется решением кубического уравнения по методу Виета-Кардана (расчет кубического уравнения можно произвести онлайн на сайте [webmath.ru/web/prog19\\_1.php](http://webmath.ru/web/prog19_1.php)), в результате, корнем уравнения вычисляется искомая сжатая зона бетона  $x$ .

$$x = 6 \text{ см}$$

#### 4. Определение $\sigma_{sc,1}$ :

Для коротких стоек, малой гибкости при условно центральном сжатии:

$$\sigma_{sc,1} = E_s \cdot \varepsilon_{sc} \text{ где } \varepsilon_{sc} = \varepsilon_{b,ult}$$

Для гибких внецентренно сжатых:

$$\sigma_{sc,1} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot (x - a)}{x} = \frac{2000000 \cdot 0,00295 \cdot (6 - 3)}{6} = 2922,5 \text{ кгс/см}^2$$

5. Несущая способность колонны без учета гибкости определяется по формуле 6.5, СП 63.13330.2018:

$$N = \frac{R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}) + \sigma_{sc,1} \cdot A_s' \cdot (h_0 - a')}{e} = \frac{315,6 \cdot 25 \cdot 6 \cdot (9,5 - \frac{6}{2}) + 2922,5 \cdot 2,26 \cdot (9,5 - 3)}{7,25} = 48140 \text{ кгс}$$

6. Определение коэффициента  $\eta$  п. 8.1.15 СП 63.13330.2018:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}; \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}; \quad D = k_b E_b I + k_s E_s I_s,$$

$$6.1. \quad k_b = \frac{0,15}{\varphi_l (0,3 + \delta_e)} = \frac{0,15}{1(0,3 + 0,32)} = 0,242,$$

где  $\varphi_l$  — коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки

$$6.2. \quad \varphi_l = 1 + \frac{M_{l1}}{M_1} \text{ т.к. } M_{l1} = 0 \rightarrow \varphi_l = 1 \leq 2,$$

где  $M_1$   $M_{l1}$  — моменты относительно центра наиболее растянутого или наименее сжатого (при целиком сжатом сечении) стержня арматуры соответственно от действия полной нагрузки и от действия постоянных и длительных нагрузок;

$\delta_e = \frac{e_0}{h} = \frac{4}{12,5} = 0,32$  — относительное значение эксцентриситета продольной силы, принимаемое не менее 0,15 и не более 1,5.

$$6.3. \quad E_b = 365000 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2 \quad E_s = 2000000 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2 \quad k_s = 0,7$$

6.4.  $I$ ,  $I_s$  — моменты инерции площадей сечения соответственно бетона и всей продольной арматуры относительно центра тяжести поперечного сечения элемента;

$$I_s = 2 \cdot A_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right)^2 = 2 \cdot 2,26 \cdot \left(\frac{12,5}{2} - 3\right)^2 = 47,74 \text{ см}^4 \quad I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{25 \cdot 12,5^3}{12} = 4069 \text{ см}^4$$

6.5. Определение жесткости конструкции:

$$D = k_b E_b I + k_s E_s I_s = 0,242 \cdot 365000 \cdot 4069 + 0,7 \cdot 2000000 \cdot 47,74 = 426250770 \text{ кг}\cdot\text{с}\cdot\text{см}^2$$

$$6.6. \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}; \quad = \frac{3,14^2 \cdot 426250770}{240^2} = 72962,9 \text{ кг}\cdot\text{с}$$

$$6.7. \eta_1 = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{48144}{72962,9}} = 3,05$$

7. Второй цикл итерационного расчета производится с учетом первого приближения силы и эффекта гибкости конструкции.

7.1. Определение эксцентриситетов с учетом гибкости и относительной деформации бетона  $\varepsilon_{b,ult}$ , которая в свою очередь определяется по формуле, предложенной в [34].

$$e_{\eta_1} = \frac{h_0 - a'}{2} + e_0 \cdot \eta_1 = \frac{9,5 - 3}{2} + 4 \cdot 3,05 = 15,45(\text{см})$$

$$e'_{\eta_1} = \frac{h_0 - a'}{2} - e_0 \cdot \eta_1 = \frac{9,5 - 3}{2} - 4 \cdot 3,05 = -8,95(\text{см})$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{b,ult} \cdot 10^5 &= 1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot \alpha - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot \alpha) \cdot e_{\eta_1}^{-5,75 \cdot \sqrt[3]{\alpha} \cdot \frac{e_0 \cdot \eta_1}{h}} \right) = \\ &= 1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot 0,114 - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot 0,114) \cdot 15,45^{-5,75 \cdot \sqrt[3]{0,114} \cdot \frac{4,2,93}{12,5}} \right) = 342,0, \end{aligned}$$

$$\text{где } \alpha = \mu \cdot \frac{R_s}{R_b} = 0,0072 \cdot \frac{5000}{315,62} = 0,114; \quad \mu = \frac{A_s}{A_b} = \frac{2,26}{25 \cdot 12,5} = 0,0072$$

$$\varepsilon_{b,ult} = 328,34/10^5 = 0,003399$$

7.2. Определение высоты сжатой зоны бетона,  $x$  аналогично п.3:

$$\begin{aligned} (0,5 \cdot R_b \cdot b)x_{\eta_1}^3 + (e_{\eta_1} - h_0) \cdot R_b \cdot b x_{\eta_1}^2 + (\sigma_{sc,1} \cdot A'_s \cdot e'_{\eta_1} + A_s \cdot e_{\eta_1} \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s) \cdot x_{\eta_1} - A_s \cdot e_{\eta_1} \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_s \cdot 0,8 \cdot h_0 &= 0 \\ (0,5 \cdot 315,6 \cdot 25)x_{\eta_1}^3 + ((15,45 - 9,5) \cdot 315,6 \cdot 25)x_{\eta_1}^2 + (2922 \cdot 2,261 \cdot & \\ - 8,95 + 2,261 \cdot 15,45 \cdot 0,00342 \cdot 2 \cdot 106)x_{\eta_1} - 2,261 \cdot 15,45 \cdot 0,003399 \cdot 2 \cdot 106 \cdot 0,8 \cdot 9,5 & \\ = 0 & \end{aligned}$$

$$3945x_{\eta_1}^3 + 43317,8x_{\eta_1}^2 + 175614,8x_{\eta_1} - 1760994 = 0$$

$$x_{\eta_1} = 4,0\text{см}$$

7.3. Определение сопротивления арматуры на сжатие  $\sigma_{sc,2}$ :



Проверка:  $x_{\eta 1} = 4,0 \text{ см} < 2 \cdot a = 2 \cdot 3 = 6 \text{ см}$ , следовательно сжатая арматура не учитывается в расчете,  $\sigma_{sc,2} = 0$

7.4. Несущая способность с учетом первого приближения и эффекта гибкости:

$$N_{\eta 1} = \frac{R_b \cdot b \cdot x_{\eta 1} \cdot \left(\square_0 - \frac{x_{\eta 1}}{2}\right) + \sigma_{sc,2} \cdot A'_S \cdot (\square_0 - a')}{e_{\eta 1}} = \frac{315,6 \cdot 25 \cdot 4,15 \cdot \left(9,5 - \frac{4,15}{2}\right) + 0 \cdot 2,26 \cdot (9,5 - 3)}{15,45} =$$

15735 кГс,

7.5. Для второго приближения используется средняя полученная прочность конструкции  $N_{cp1} = \frac{N + N_{\eta 1}}{2}$ .

$$N_{cp} = \frac{48144 + 15735}{2} = 32190 \text{ кГс}$$

8. Третий цикл итерационного расчета производится с учетом первого и второго приближения силы:

$$8.1. \eta_2 = \frac{1}{1 - \frac{N_{cp}}{N_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{32190}{72962,9}} = 1,80$$

8.2. Эксцентриситеты и относительная деформация бетона с учетом первого и второго приближения силы:

$$e_{\eta 2} = \frac{h_0 - a'}{2} + e_0 \cdot \eta_2 = \frac{9,5 - 3}{2} + 4 \cdot 1,8 = 10,44 (\text{см})$$

$$e'_{\eta 2} = \frac{h_0 - a'}{2} - e_0 \cdot \eta_2 = \frac{9,5 - 3}{2} - 4 \cdot 1,8 = -3,94 (\text{см})$$

$$\varepsilon_{b,ult} \cdot 10^5 = 1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot \alpha - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot \alpha) \cdot e_{\eta 2}^{-5,75 \sqrt[3]{\alpha} \cdot \frac{e_0 \cdot \eta}{h}} \right) =$$

$$= 1,1 \cdot \left( 340 - 175 \cdot 0,114 - 170 \cdot (1 - 2,25 \cdot 0,114) \cdot 10,44^{-5,75 \sqrt[3]{0,114} \cdot \frac{4 \cdot 1,8}{12,5}} \right) = 323,9,$$

где  $\alpha = \mu \cdot \frac{R_s}{R_b} = 0,0072 \cdot \frac{5000}{315,62} = 0,114$ ;  $\mu = \frac{A_s}{A_b} = \frac{2,26}{25 \cdot 12,5} = 0,0072$

$$\varepsilon_{b,ult} = 328,34 / 10^5 = 0,003239$$

8.3. Определение высоты сжатой зоны бетона,  $x$  аналогично п.3:

$$(0,5 \cdot R_b \cdot b)x_{\eta 2}^3 + ((e_{\eta 2} - h_0) \cdot R_b \cdot b)x_{\eta 2}^2 + (\sigma_{sc,2} \cdot A'_S \cdot e'_{\eta 2} + A_S \cdot e_{\eta 2} \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_S) \cdot x_{\eta 2} - A_S \cdot e_{\eta 2} \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot E_S \cdot 0,8 \cdot h_0 = 0$$

$$(0,5 \cdot 315,6 \cdot 25)x_{\eta 2}^3 + ((10,44 - 9,5) \cdot 315,6 \cdot 25)x_{\eta 2}^2 + (0 \cdot 2,261 \cdot (-3,94) + 2,261 \cdot 10,44 \cdot 0,003239 \cdot 2 \cdot 10^6)x_{\eta 2} - 2,261 \cdot 10,44 \cdot 0,003239 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 9,5 = 0$$

$$3945x_{\eta 1}^3 + 7126,28x_{\eta 1}^2 + 152343,448x_{\eta 1} - 1157810,205 = 0$$

$$x_{\eta 1} = 4,43 \text{ см}$$

8.4. Определение сопротивления арматуры на сжатие  $\sigma_{sc,3}$ :

Проверка:  $x_{\eta 1} = 4,43 \text{ см} < 2 \cdot a = 2 \cdot 3 = 6 \text{ см}$ , следовательно сжатая

арматура не учитывается в расчете,  $\sigma_{sc,2} = 0$

8.5. Несущая способность с учетом первого и второго приближения:

$$N_{\eta 3} = \frac{R_b \cdot b \cdot x_{\eta 2} \cdot (\square_0 - \frac{x_{\eta 2}}{2}) + \sigma_{sc,3} \cdot A'_S \cdot (\square_0 - a')}{e_{\eta 2}} = \frac{315,6 \cdot 25 \cdot 4,43 \cdot (9,5 - \frac{4,43}{2}) + 0 \cdot 2,26 \cdot (9,5 - 3)}{10,44} =$$

24478 кГс,

8.6. Проверка точности расчета:

$$\left| \frac{N_{cp1} - N_{cp2}}{N_{cp1}} * 100 \right| = \left| \frac{32190 - 27484}{32190} * 100 \right| = 14,6\% > 5\%$$

Для расчета прочности производится еще цикл!

Для третьего приближения используется средняя полученная

$$\text{прочность конструкции } N_{cp2} = \frac{N_{cp1} + N_{\eta 3}}{2} = \frac{32190 + 24478}{2} = 27484 \text{ кГс}$$

9. Расчет ведется итерационно, повторяя этапы, согласно примеру п. 8.1-8.6, до тех пор, пока расхождение  $N_{cp(i)}$  и  $N_{cp(i-1)}$  не составит менее 5%. В результате проведения 5 циклов результаты были следующие:

$$\left| \frac{N_{cp4} - N_{cp5}}{N_{cp4}} * 100 \right| = \left| \frac{26633.9 - 27106.8}{26633.9} * 100 \right| = 1,77\% < 5\%$$

В лаборатории кафедры ЖиКК ДГТУ, была изготовлена и испытана железобетонная стойка, с характеристиками, указанными в данном примере расчёта. Ее прочность составила 24250 кгс, при этом разность с теоретической прочностью составила 9,8%, что входит в статистический разброс.

В заключение стоит отметить, что разработанная методика расчёта показывает хорошие результаты сходимости теоретической и экспериментальной прочности, однако является достаточно трудоёмкой и содержит много этапов итерационного расчёта. Поэтому целесообразно перед проведением научных исследований разработать программный алгоритм согласно предложенной методике расчёта. Наиболее подходящим и распространённым программным продуктом является Excel. Разработка алгоритма в данной программе является дальнейшей научно-исследовательской задачей авторов.

### Литература

1. Дектерев С. А., Винницкий М. В., Третьяков Д. И., Шуплецов В. Ж. Уникальное здание сложной технологической структуры (театральное здание): Учебное пособие – Екатеринбург: Уральский государственный архитектурно-художественный университет, 2016. – 98 с.
2. Липкина, В. С., Никишина А. А. Анализ уникальных инженерных решений при строительстве высотных зданий в мире // Международный студенческий строительный форум - 2018: Сборник докладов. Том 1. –



- Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 112-118.
3. Крылов, В. В. Проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки // Научный аспект. – 2019. – Т. 3. – № 3. – С. 320-325.
4. Шадрина Е. Э. Анализ нагрузок и воздействий на железобетонные конструкции // XXIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тезисы докладов XXIII Региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2019. – С. 308.
5. Мелющенко Н. А., Фастов А. В., Фастова Ю. В. Применение бетона и железобетона в качестве основного материала строительных конструкций // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 306-309.
6. Швидко Я. И. Железобетонные конструкции. Основные сведения о железобетоне: Учеб. пособие для студентов строит. специальностей; М-во путей сообщения Рос. Федерации. Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ). Каф. "Строит. конструкции". – Москва, 2003. – 57 с.
7. Торопов А. С. Бетон и железобетон - основные материалы в строительстве // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2017. – № 4. – С. 107-109.
8. Мадатян С. А. Условия эффективного применения в бетоне стальной и композитной арматуры повышенной прочности // Бетон и железобетон - взгляд в будущее : Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: Том 3. – Москва: Московский государственный строительный университет, 2014. – С. 78-84.
-



9. Ластовка А. В., Иванова А. В. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной арматуры // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2022. – Т. 12. – № 2(41). – С. 174-181.
  10. Александровский С.В., Батраков В.Г., Будагянц Л.И., Булгакова Н.Г., Волков И.В., Волков Ю.С., Гузеев Е.А., Жуков В.В., Залесов А.С., Звездов А.И., Зикеев Л.Н., Иссерс Ф.А., Малинина Л.А. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России; Госстрой России, НИИЖБ. – Москва: Издательство Готика, 2001. – 684 с.
  11. Рощупкин А. А., Беленцов Ю. А., Лопухов В. Ю., Ключев С. В. Совершенствование контроля качества бетона для повышения уровня надежности железобетонных конструкций // Эффективные строительные композиты : Научно-практическая конференция, Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 553-557.
  12. Меркулов С. И., Римшин В. И. Композитные материалы для бетонных и железобетонных конструкций // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Материалы Семнадцатой Международной научно-технической конференции, Саранск. 2018. – С. 222-225.
  13. Касымов Т. М., Кудайбергенова Н. С. Прочностные свойства мелкозернистого бетона, дисперсно армированного базальтовым волокном различной пропорции и добавки // Материаловедение. – 2020. – № 2(34). – С. 42-48.
  14. Крамар Л. Я., Мордовцева М. В., Погорелов С. Н., Иванов И. М. Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 35-45.
-



15. Соловьев В. Г., Шувалова Е. А. Эффективность применения различных видов фибры в бетонах // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 9-3(63). – С. 78-81.
  16. Меркулов С. И. , Есипов С. М. Прочность и деформативность композитного материала на основе углеродной фибры при одноосном растяжении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 11. – С. 69-73.
  17. Маилян Д.Р., Польской П.П., Мерват Х., Кургин К.В. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094).
  18. Кувшинов Н. Е. Армирования и технология металлических композиционных материалов // Форум молодых ученых. – 2017. – № 5(9). – С. 1126-1129.
  19. Бронников И. В. Сравнительный анализ металлической арматуры и арматуры из композитных материалов // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. – 2019. – № 3. – С. 33.
  20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Шилов А.А., Меретуков З.А. Армирование и схемы испытания наклонных сечений балок с внешним композитным усилением. Новые технологии. 2015. № 4. С. 44-48.
  21. Гасымов Д. С. Бетон на основе саморасширяющегося цемента // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Том Часть II. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2022. – С. 72-75.
-



22. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком. Научное обозрение. 2014. № 10-3. С. 667-670.
23. Михуб А., Польской П.П., Маилян Д.Р., Блягоз А.М. Сопоставление опытной и теоретической прочности железобетонных балок, усиленных композитными материалами, с использованием разных методов расчёта. Новые технологии. 2012. № 4. С. 101-110.
24. Маилян Д. Р., Михуб А., Польской П. П. Вопросы исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674).
25. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374).
26. Мандриков А.П. Примеры расчета железобетонных конструкций. Стройиздат, 1989. 506 С.
27. Заикин А.И. Железобетонные конструкции одноэтажных промышленных зданий: Учебное пособие. АСВ, 2004.
28. Беккиев М.Ю. Методика расчетной оценки прочности подкрановых строительных конструкций здания ГЭС // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809).
29. Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D.. Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.
30. Lilistone D., Jolly C.K. An innovative form of reinforcement for concrete columns using advanced composites, The Structural Engineer, Vol. 78, No. 23/24, 5 December 2000, pp. 20-28.
-

31. Pan J. L., Xu T., Hu Z. J. Experimental investigation of load carrying capacity of the slender reinforced concrete columns wrapped with FRP // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. №. 11. С. 1991-1996.
32. Польской П.П., Георгиев С.В. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика. // Научное обозрение. 2014. № 10-3. С. 662-666.
33. Маилян Д.Р., Польской П.П. Георгиев С.В. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2013, № 2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673
34. Маилян Д.Р. Зависимость предельной деформации бетона от армирования и эксцентриситета сжимающего усилия // Бетон и железобетон, №7, 1980год, с. 11-12.

### References

1. Dekterev S. A., Vinnickij M. V., Tret'jakov D. I, Shuplecov V. Zh. Unikal'noe zdanie slozhnoj tehnologicheskoy struktury (teatral'noe zdanie) [Unique building of complex technological structure (theater building)]: Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj arhitekturno-hudozhestvennyj universitet, 2016. 98 P.
  2. Lipkina V. S., Nikishina A. A. Analiz unikal'nyh inzhenernyh reshenij pri stroitel'stve vysotnyh zdaniy v mire. Mezhdunarodnyj studencheskij stroitel'nyj forum - 2018: Sbornik dokladov. Tom 1. – Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2018. pp. 112-118.
  3. Krylov V. V. Nauchnyj aspekt. 2019. T. 3. № 3. pp. 320-325.
  4. Shadrina E. Je. Analiz nagruzok i vozdeystvij na zhelezobetonnye konstrukcii. XXIII Regional'naja konferencija molodyh issledovatelej Volgogradskoj oblasti. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, 2019. P. 308.
-





5. Meljushhenko N. A., Fastov A. V., Fastova Ju. V. Transport: Nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnyh trudov. Tom 2. Rostov-na-Donu: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2020. pp. 306-309.
  6. Shvidko Ja. I. Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye svedenija o zhelezobetone [Reinforced concrete structures. Basic information about reinforced concrete]: Ucheb. posobie dlja studentov stroit. special'nostej; M-vo putej soobshhenija Ros. Federacii. Mosk. gos. un-t putej soobshh. (MIIT). Kaf. "Stroit. konstrukcii". Moskva, 2003. 57 P.
  7. Toropov A. S. Nauchnomu progressu – tvorcestvo molodyh. 2017. № 4. pp. 107-109.
  8. Madatjan S. A. Nauchnye trudy III Vserossijskoj (II Mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu. Moskva: Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet, 2014. pp. 78-84.
  9. Lastovka A. V., Ivanova A. V. Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2022. T. 12. № 2(41). pp. 174-181.
  10. Aleksandrovskij S.V., Batrakov V.G., Budagjanc L.I., Bulgakova N.G., Volkov I.V., Volkov Ju.S., Guzeev E.A., Zhukov V.V., Zalesov A.S., Zvezdov A.I., Zikeev L.N., Malinina L.A. Zhelezobeton v XXI veke: sostojanie i perspektivy razvitija betona i zhelezobetona v Rossii; Gosstroj Rossii, NIIZhB. Moskva: Izdatel'stvo Gotika, 2001. 684P.
  11. Roshhupkin A. A., Belencov Ju. A., Lopuhov V. Ju., Kljuev S. V. Jeffektivnye stroitel'nye kompozity: Nauchno-prakticheskaja konferencija, Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2015. pp. 553-557.
  12. Merkulov S. I., Rimshin V. I. Aktual'nye voprosy arhitektury i stroitel'stva: Materialy Semnadcatoj Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskaj konferencii, Saransk, 06–08 nojabrja 2018 goda. 2018. pp. 222-225.
-



13. Kasymov T. M., Kudajbergenova N. S. Materialovedenie. 2020. № 2(34). pp. 42-48.
  14. Kramar L. Ja., Mordovceva M. V., Pogorelov S. N., Ivanov I. M. Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. T. 22. № 3. pp. 35-45.
  15. Solov'ev V. G., Shuvalova E. A. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2017. № 9-3(63). pp. 78-81.
  16. Merkulov, S. I., Esipov S. M. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2016. № 11. pp. 69-73.
  17. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094).
  18. Kuvshinov N. E. Forum molodyh uchenyh. 2017. № 5(9). pp. 1126-1129.
  19. Bronnikov I. V. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tehnologij Integral. 2019. № 3. P. 33.
  20. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Shilov A.A., Meretukov Z.A. Novye tehnologii. 2015. № 4. pp. 44-48.
  21. Gasymov D. S. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh i obuchajushhihsja, Sankt-Peterburg. Tom Chast' II. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2022. pp. 72-75.
  22. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. pp. 667-670.
  23. Mihub A., Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Bljagoz A.M. Novye tehnologii. 2012. № 4. pp. 101-110.
  24. Mailjan D. R., Mihub A., Pol'skoj P. P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2(25). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674).
  25. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №4 (38). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374).
-



26. Mandrikov A.P. Primery rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij. [Examples of calculation of reinforced concrete structures]. Strojizdat, 1989. 506 P.
27. Zaikin A.I. Zhelezobetonnye konstrukcii odnojetazhnyh promyshlennyh zdaniy [Reinforced concrete structures of single-storey industrial buildings]: Uchebnoe posobie. ASV, 2004.
28. Bekkiev M.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809).
29. Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.
30. Lilistone D., Jolly C.K. The Structural Engineer, Vol. 78, № 23/24, 5 December 2000, pp. 20-28.
31. Pan J. L., Xu T., Hu Z. J. Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. № 11. pp. 1991-1996.
32. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. pp. 662-666.
33. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P. Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673).
34. Mailjan D.R. Beton i zhelezobeton, №7, 1980 g, pp. 11-12.