

Методика вычисления предельной продольной силы от внешней нагрузки, действующей на внецентренно сжатый железобетонный элемент

Н.Ю. Цыбин

Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье рассматривается вопрос определения допустимой сжимающей продольной силы от внешней нагрузки, действующей на внецентренно сжатый железобетонный элемент. Расчетные предпосылки приняты в соответствии с действующим сводом правил СП 63.13330.2018. Преобразование исходных формул, приведенных в данном нормативном документе, позволило получить и решить в явном виде кубическое уравнение относительно сжимающей продольной силы без привлечения итерационных методов расчета. Найденное решение может быть использовано в процессе проектирования для определения оптимальных габаритов сечений.

Ключевые слова: Железобетон, внецентренное сжатие, предельные усилия.

Введение

Железобетонные несущие каркасы зданий и сооружений являются наиболее распространенными на данный момент. Вертикальные несущие элементы подобных зданий и сооружений находятся в условиях внецентренного сжатия. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов по первой группе предельных состояний регламентируется действующим сводом правил СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». Данный нормативный документ допускает два основных метода расчета: на основе нелинейной деформационной модели [1-3] или на основе предельных усилий. Расчет с использованием нелинейной деформационной модели затруднительно выполнять без привлечения специализированных программных комплексов, поэтому в рамках данной статьи рассматривается расчет на основе предельных усилий. При этом рассматривается элемент с прямоугольным поперечным сечением, как наиболее распространенным.

Решение подобной задачи можно получить с использованием метода конечных элементов [4]. Также отметим, что в настоящий момент проводится большое число исследований, связанных с поведением внецентренно-сжатых колонн, усиленных углепластиком или железобетонными обоймами, например, [5, 6].

В статье далее будут приведены формулы СП 63.13330.2018 в объеме, необходимом для полноты изложения.

На рис. 1 приведена схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси внецентренно сжатого железобетонного элемента, при расчете его по прочности.

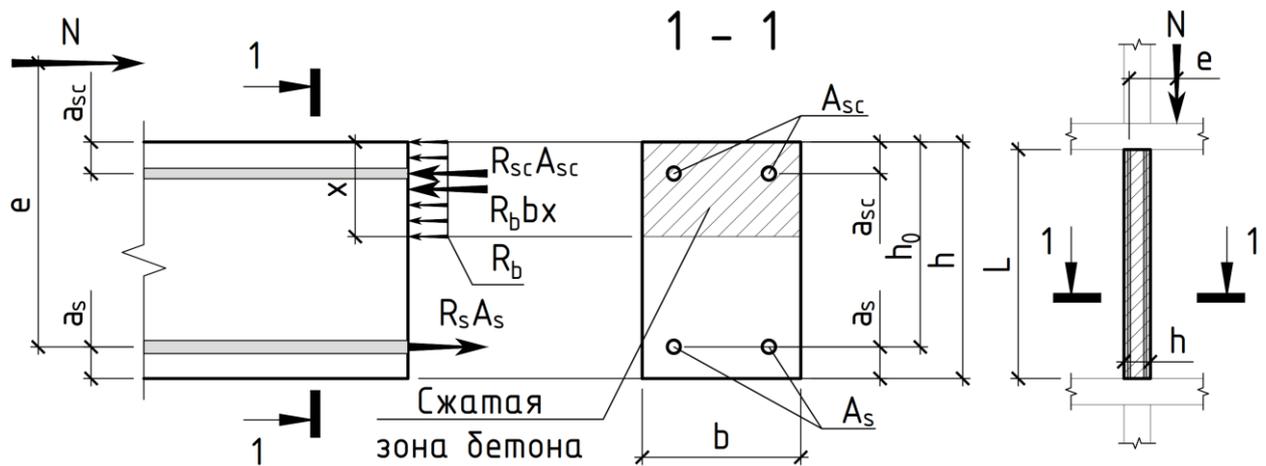


Рис. 1. – Схема усилий и напряжений в нормальном сечении внецентренно сжатого железобетонного элемента

На основе схемы усилий и напряжений в нормальном сечении в СП 63.13330.2018 приведено следующее условие прочности для внецентренно сжатого элемента:

$$N \cdot e \leq R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A_{sc} (h_0 - a_{sc}). \quad (1)$$

Данное условие можно получить, составив уравнение моментов относительно растянутой (наименее сжатой) арматуры.

Обозначения в формуле (1) и на рис. 1, в целом, соответствуют использованным в СП 63.13330.2018, кроме: A_{sc} и a_{sc} – площадь сжатой (наиболее сжатой) арматуры и ее привязка к наиболее сжатой грани сечения.

Расстояние e вычисляется по формуле:

$$e = e_0 \cdot \eta + (h_0 - a_{sc})/2. \quad (2)$$

в которой e_0 – начальный эксцентриситет продольной силы; η – коэффициент, учитывающий влияние прогиба элемента при расчете по недеформированной (без учета геометрической нелинейности) схеме.

Начальный эксцентриситет продольной силы e_0 , входящий в (2) вычисляется по формуле:

$$e_0 = e_f + e_a = |M|/N + e_a, \quad (3)$$

где e_f – статический эксцентриситет; M – изгибающий момент, действующий в сечении; e_a – случайный эксцентриситет, принимаемый равным:

$$e_a = \max(L/600; h/30; 10\text{мм}). \quad (4)$$

В статически неопределимых конструкциях величина случайного эксцентриситета e_a в формуле (3) принимается равной нулю, однако при этом должно выполняться условия $e_0 \geq e_a$.

Высота сжатой зоны бетона x в зависимости от относительной высоты сжатой зоны $\xi = x/h_0$ и вычисляется по формулам СП 63.13330.2018, а именно:

- при $\xi = x/h_0 \leq \xi_R$:

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_{sc}}{R_b \cdot b}; \quad (5)$$

- при $\xi = x/h_0 > \xi_R$:

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} \cdot A_{sc}}{R_b \cdot b + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_0(1 - \xi_R)}}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) можно записать в следующем виде:

$$x = (N + F_1) / F_2. \quad (7)$$

Тогда в случае $\xi = x/h_0 \leq \xi_R$ получим:

$$F_1 = R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_{sc}; \quad F_2 = R_b \cdot b. \quad (8)$$

Аналогично при $\xi = x/h_0 > \xi_R$:

$$F_1 = R_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} \cdot A_{sc}; \quad F_2 = R_b \cdot b + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_0(1 - \xi_R)}. \quad (9)$$

Вернемся к формуле (2). Коэффициент η в данной формуле учитывает влияние продольного изгиба и определяется выражением (аналогично классической формуле курса сопротивления материалов):

$$\eta = 1 / \left(1 - \frac{N}{N_{cr}} \right). \quad (10)$$

Здесь N_{cr} – условная критическая сила. Формула для ее вычисления будет приведена далее.

При известной величине действующих на элемент усилий задача подбора армирования является достаточно исследованной, однако в некоторых случаях необходимо выполнять итерационный расчет с последовательными приближениями. Большое число примеров подобных расчетов можно найти, например в [7].

Обратная задача определения предельно допустимой продольной силы при заданном армировании существенно сложнее, так как величина продольной сжимающей силы N входит в расчетное условие (1) неявно, а именно:

- непосредственно в качестве множителя в левой части условия (1);

- в величину начального эксцентриситета (3);
- в коэффициенте продольного изгиба η , согласно формуле (10);
- в формулах для вычисления высоты сжатой зоны бетона (5) и (6).

Величина изгибающих моментов, возникающих в значительном числе внецентренно сжатых железобетонных элементов, особенно достаточно гибких (стены и пилоны), незначительна по сравнению с продольной силой. В силу этого в дальнейших расчетах будем учитывать только случайный эксцентриситет, предполагая, что он больше статического. Учитывая данное упрощение, после получения величины допустимой сжимающей продольной силы, необходимо определить допустимое значение изгибающего момента, при котором статический эксцентриситет не будет превышать случайный. Для случая значительного статического эксцентриситета (превышающего случайный) расчетная методика, приведенная в данной статье, требует уточнения.

В предельном состоянии левая часть условия (1) равна правой. В этом случае, используя формулы (2), (3), (7) и (10), после несложных алгебраических преобразований условие прочности (1) можно свести к кубическому уравнению вида:

$$N^3 + AN^2 - BN + C = 0. \quad (11)$$

Коэффициенты уравнения (11) записаны ниже:

$$\left. \begin{aligned} A &= \beta_1 + 2\beta_2 - N_{cr}; \quad C = 2N_{cr} \cdot (\beta_3 + \beta_1 \cdot R_{sc} \cdot A_{sc}); \\ B &= N_{cr} \cdot \left(\frac{2e_0 + h_0 - a_{sc}}{h_0 - a_{sc}} \cdot \beta_1 + 2\beta_2 \right) + 2\beta_1 \cdot R_{sc} \cdot A_{sc} + 2\beta_3, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

в которых:

$$\beta_1 = F_2^2 \cdot (h_0 - a_{sc}) / (R_b \cdot b); \quad \beta_2 = F_1 - h_0 \cdot F_2; \quad \beta_3 = h_0 \cdot F_1 \cdot F_2 - F_1^2 / 2. \quad (13)$$

Решение уравнения (11) удобнее всего искать с применением тригонометрической теоремы Виетта. В этом случае необходимо вычислить вспомогательные величины:

$$Q = (A^2 + 3B)/9; R = (2A^3 + 9A \cdot B + 27C)/54; S = Q^3 - R^2. \quad (14)$$

Корни уравнения (11), в случае, если $S > 0$, далее находятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Phi = \arccos(R/\sqrt{Q^3})/3; x_1 = -2\sqrt{Q} \cdot \cos(\Phi) - A/3; \\ x_2 = -2\sqrt{Q} \cdot \cos(\Phi + 2\pi/3) - A/3; x_3 = -2\sqrt{Q} \cdot \cos(\Phi - 2\pi/3) - A/3. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

При количественном исследовании данной задачи случаев $S \leq 0$ (см. формулы (14)) обнаружено не было, однако исключать подобную ситуацию нельзя. В этом случае формулы (15) необходимо заменить на другие, которые легко найти в справочной литературе.

Верным является наименьший положительный из представленных корней. Серия численных экспериментов показывает, что таким свойством обладает корень x_3 , однако, во избежание ошибок и частных случаев, необходимо проверять все три корня.

Аналогичная задача исследовалась в работе [8], где авторами было получено кубическое уравнение относительно высоты сжатой зоны, однако решения в замкнутом виде не приведено. Для его решения авторы использовали встроенный инструмент MS Excel «автоматический подбор значений». При этом, для определения допустимой нагрузки авторы использовали разработанный ими итерационный метод расчета. Похожим образом данная задача решена в работе [9]. Некоторые дополнительные особенности расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов отражены в статье [10].

Условная критическая сила N_{cr} вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \pi^2 D / (\mu L)^2, \quad (16)$$

где μ – коэффициент приведения длины; D – жесткость железобетонного элемента, величину которой допускается вычислять по формуле ниже.

$$D = k_b E_b I_b + k_s E_s I_s, \quad (17)$$

где E_b и E_s – модули упругости бетона и стали соответственно; I_b и I_s – моменты инерции площадей сечения бетона и продольной арматуры; k_b и k_s – коэффициенты приведения жесткости бетона и стали.

Коэффициент приведения стали принимается равным $k_s = 0.7$, а для бетона k_b вычисляется по формуле:

$$k_b = \frac{0.15}{\varphi_l \cdot (0.3 + \delta_e)}, \quad (18)$$

где φ_l – коэффициент, учитывающий длительность нагрузки, вычисляемый по формуле:

$$1 \leq \varphi_l = 1 + M_{ll} / M_l \leq 2; \quad (19)$$

δ_e – относительное значение эксцентриситета, вычисляемое по формуле

$$0.15 \leq \delta_e = e_0 / h \leq 1.5. \quad (20)$$

Слагаемое M_{ll} / M_l в формуле (19) можно интерпретировать как длительность действия нагрузки и обозначить коэффициентом d_l , который изменяется в диапазоне от 0 до 1, т.е. $0 \leq d_l \leq 1$.

В случае симметричного армирования, когда $A_{sc} = A_s$ и $a_{sc} = a_s$, формула (17) для прямоугольного сечения примет вид:

$$D = k_b \cdot E_b \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} + 2k_s \cdot E_s \cdot A_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a_s \right)^2. \quad (21)$$

Пример расчета по предлагаемой методике

В качестве примера рассмотрим задачу определения предельной продольной сжимающей силы, воспринимаемой 1 п.м ($b = 100 \cdot \text{см}$) стены толщиной $h = 25 \cdot \text{см}$. Нагрузки считаем кратковременными. Единицы длины

далее будем приводить в см, а силы в кН. Высоту стены примем равной $L = 300 \cdot \text{см}$ с коэффициентом приведения $\mu = 0.8$. Стена выполняется из бетона класса прочности на сжатие В25, следовательно, расчетное сопротивление сжатию (с учетом понижающего коэффициента $\gamma_{b3} = 0.85$) составляет $R_b = 14.5 \cdot 0.85 = 12.325 \cdot \text{МПа} = 1.2325 \cdot \text{кН/см}^2$. Модуль упругости бетона $E_b = 30 \cdot 10^3 \cdot \text{МПа} = 3 \cdot 10^3 \cdot \text{кН/см}^2$. Арматура класса А500, расчетные сопротивления растяжению и сжатию равны: $R_s = 435 \cdot \text{МПа} = 43.5 \cdot \text{кН/см}^2$ и $R_{sc} = 400 \cdot \text{МПа} = 40.0 \cdot \text{кН/см}^2$. Модуль упругости стали $E_s = 2 \cdot 10^5 \cdot \text{МПа} = 2 \cdot 10^4 \cdot \text{кН/см}^2$. Армирование рассматриваемой стены – стержни диаметром $16 \cdot \text{мм} = 1.6 \cdot \text{см}$ с шагом $20 \cdot \text{см}$ расположенные симметрично у противоположных граней с привязками $a_s = a_{sc} = 5 \cdot \text{см}$. Рабочая высота сечения в этом случае равна $h_0 = 20 \cdot \text{см}$. Соотношение между длительными и кратковременными (полными) нагрузками примем равным 0.87.

1) Принимая начальный эксцентриситет равный случайному, вычислим его значение по формуле (4):

$$e_0 = e_a = \max\left(\frac{300 \cdot \text{см}}{600}; \frac{25 \cdot \text{см}}{30}; 1 \cdot \text{см}\right) = \max(0.5 \cdot \text{см}; 0.833 \cdot \text{см}; 1 \cdot \text{см}) = 1 \cdot \text{см}.$$

2) Зная величину начального эксцентриситета вычислим его относительное значение по формуле (20):

$$\delta_e = 1/25 = 0.04.$$

Так как полученное значение меньше, чем 0.15, принимаем для дальнейших расчетов $\delta_e = 0.15$.

3) Вычислим коэффициент, учитывающий длительность нагрузки по формуле (19).

$$\varphi_l = 1 + M_{ll}/M_l = 1 + 0.87 = 1.87.$$

4) Вычислим коэффициент приведения бетона по формуле (18).

$$k_b = \frac{0.15}{\varphi_l \cdot (0.3 + \delta_e)} = \frac{0.15}{1.87 \cdot (0.3 + 0.15)} = 0.1783.$$

5) Вычислим площадь растянутой и сжатой арматуры.

$$A_s = A_{sc} = \frac{\pi \cdot (1.6 \cdot \text{см})^2}{4} \cdot \frac{1 \cdot \text{м}}{0.2 \cdot \text{м}} = 10.053 \cdot \text{см}^2.$$

6) Используя формулу (21) вычислим жесткость сечения.

$$D = 0.1783 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{100 \cdot 25^3}{12} + 2 \cdot 0.7 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 10.053 \cdot \left(\frac{25}{2} - 5\right)^2 = 8.548 \cdot 10^7 \cdot \text{кН} \cdot \text{см}^2.$$

7) По формуле (16) вычислим условную критическую силу.

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot 8.548 \cdot 10^7 / (0.8 \cdot 300)^2 = 14647 \cdot \text{кН}.$$

8) Предполагая, что в случае малых эксцентриситетов относительная высота ξ сжатой зоны превышает граничную $\xi_R = 0.4934$ (бетон В25, арматура А500, нагрузки кратковременные), вычислим параметры F_1 и F_2 , по формулам (9):

$$F_1 = R_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} \cdot A_{sc} = 43.5 \cdot 10.053 \cdot \frac{1 + 0.4934}{1 - 0.4934} - 40.0 \cdot 10.053 = 887 \cdot \text{кН}$$

$$F_2 = R_b \cdot b + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_0 \cdot (1 - \xi_R)} = 1.2325 \cdot 100 + \frac{2 \cdot 43.5 \cdot 10.053}{20 \cdot (1 - 0.4934)} = 209.57 \cdot \text{кН/см}.$$

9) Вычисляем коэффициенты β_1 , β_2 , β_3 по формулам (13)

$$\beta_1 = (20 - 5) \cdot 209.57^2 / (1.2325 \cdot 100) = 5345 \cdot \text{кН};$$

$$\beta_2 = 887 - 20 \cdot 209.57 = -3304 \cdot \text{кН};$$

$$\beta_3 = 20 \cdot 887 \cdot 209.57 - 887^2 / 2 = 3.32 \cdot 10^6 \cdot \text{кН}^2.$$

10) Вычисляем коэффициенты A , B , C по формулам (12).

$$A = 5345 + 2 \cdot (-3304) - 14647 = -15910 \cdot \text{кН};$$

$$C = 2(3.32 \cdot 10^6 + 5345 \cdot 40 \cdot 10.053) \cdot 14647 = 1.603 \cdot 10^{11} \cdot \text{кН}^3.$$

11) Вычисляем коэффициенты Q , R , S по формулам (14).

$$Q = \frac{(-15910)^2 + 3 \cdot 2.878 \cdot 10^6}{9} = 2.908 \cdot 10^7 \cdot \text{кН}^2;$$

$$R = \frac{2 \cdot (-15910)^3 + 9 \cdot (-15910) \cdot 2.878 \cdot 10^6 + 27 \cdot 1.603 \cdot 10^{11}}{54} = -7.66 \cdot 10^{10} \cdot \text{кН}^3;$$

$$S = (2.908 \cdot 10^7)^3 - (-7.66 \cdot 10^{10})^2 = 1.872 \cdot 10^{22} \cdot \text{кН}^6;$$

12) Так как $S > 0$, то формулы, приведенные в (15) применимы.

$$\Phi = \frac{1}{3} \arccos\left(-7.66 \cdot 10^{10} / \sqrt{(2.908 \cdot 10^7)^3}\right) = 0.6937.$$

Вычисляем корни кубического уравнения x_1, x_2, x_3 по формулам (15).

$$x_1 = -2\sqrt{2.908 \cdot 10^7} \cos(0.6937) + 15910/3 = -2900 \cdot \text{кН};$$

$$x_2 = -2\sqrt{2.908 \cdot 10^7} \cos(0.6937 + 2\pi/3) + 15910/3 = 15422 \cdot \text{кН};$$

$$x_3 = -2\sqrt{2.908 \cdot 10^7} \cos(0.6937 - 2\pi/3) + 15910/3 = 3478 \cdot \text{кН}.$$

Из представленных корней выбираем наименьший положительный, т.е. x_3 . Таким образом предельное значение сжимающей силы составляет $N = 3478 \cdot \text{кН} = 354.7 \cdot \text{тс}$.

13) Вычисляем высоту сжатой зоны бетона по формуле (6):

$$x = \frac{3478 + 43.5 \cdot 10.053 \cdot \frac{1 + 0.4934}{1 - 0.4934} - 40.0 \cdot 10.053}{1.2325 \cdot 100 + \frac{2 \cdot 43.5 \cdot 10.053}{20 \cdot (1 - 0.4934)}} = 20.83 \cdot \text{см}.$$

14) Вычисляем относительную высоту сжатой зоны бетона и сравниваем с граничной:

$$\xi = x/h_0 = 20.828/20 = 1.04 \geq \xi_R = 0.4934.$$

Таким образом относительная высота сжатой зоны бетона превышает граничную, следовательно, корректировать расчеты нет необходимости. В противном случае необходимо было бы повторно провести расчет, начиная с пункта 8, вычислив выражения для F_1 и F_2 по формулам (8).

15) Проверяем правильность расчетов, подставляя найденное значение продольной силы в исходные формулы.

$$\eta = 1 / \left(1 - \frac{3478}{14647} \right) = 1.311; \quad e = 1 \cdot 1.311 + (20 - 5) / 2 = 8.81 \cdot \text{см}.$$

Вычисляем левую и правую часть условия прочности (1).

$$N \cdot e = 8.81 \cdot 3477 = 30632 \cdot \text{кН} \cdot \text{см};$$

$$R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A_{sc} (h_0 - a_{sc}) = 1.2325 \cdot 100 \cdot 20.83 \cdot (20 - 0.5 \cdot 20.83) + \\ + 40 \cdot 10.053 \cdot (20 - 5) = 30639 \cdot \text{кН} \cdot \text{см}.$$

Полученные результаты совпадают с высокой точностью.

16) Оценим значение изгибающего момента, соответствующего найденной допустимой продольной силе и величине начального эксцентриситета.

$$M = N \cdot e_0 = 3477 \cdot 1 = 3477 \cdot \text{кН} \cdot \text{см} = 34.77 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}.$$

Выводы

В статье, на основе исходных предпосылок и формул СП 63.13330.2018 получены выражения, позволяющие в явном виде вычислить допустимое значение продольной сжимающей внецентренно приложенной силы от внешней нагрузки на железобетонный элемент прямоугольного сечения. Полученное решение может быть легко реализовано в различных программных средах, например, MS Excel. Главным преимуществом полученного решения является то, что для поиска ответа не требуется привлечения итерационных методов. Так как решение представлено в аналитическом виде, с его помощью можно легко, например, построить зависимость допустимой сжимающей силы от высоты этажа, или процента армирования, что позволяет быстро решать задачу подбора требуемых габаритов сечения.

Литература

1. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2013. № 4(26). С. 113 – 120.

2. Гаджиев М.А., Алаева С.М. Несущая способность внецентренно сжатых армированных стержней с применением полной диаграммы деформирования армируемого материала на примере железобетонного стержня // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 4. С. 36 – 43.

3. Ерышев В.А. Численные методы расчета прочности железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием диаграмм деформирования материалов // Вестник НГИЭ. 2018. № 6(85). С. 17 – 26.

4. AlNajmi L., Abed F. Evaluation of FRP Bars under Compression and Their Performance in RC Columns // Materials. 2020. №13 (20). 4541. DOI: 10.3390/ma13204541

5. Gao S., Liu L.. Effects of Freeze–Thaw Cycles on Axial Compression Behaviors of UHPC-RC Composite Columns // Materials. 2024. №17 (8). 1843. DOI: 10.3390/ma17081843

6. Xing L., Lin G., Chen J. F. Behavior of FRP-Confined Circular RC Columns under Eccentric Compression // Journal of Composites for Construction. 2020. №24(4). 04020030. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001036

7. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций. Москва: Высшая школа, 2006. 504 с.

8. Георгиев С.В., А.И. Соловьёва, Беккиев М.Ю. К методике расчета по прочности железобетонных гибких внецентренно сжатых стоек //

Инженерный вестник Дона. 2022. № 12. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8083.

9. Старишко И.Н. Способы определения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 59 – 69.

10. Евтушенко И.И., Вахидов Р.Н., Барамия А.Л., Пустовалов С.А., Зотов В.В., Нор-Аревян С.Л., Нуриев В.Э. Об особенностях методик расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4623.

References

1. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radajkin O.V. K Stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya. 2013. № 4(26). pp. 113 – 120.
2. Gadzhiev M.A., Alaeva S.M. Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2012. № 4. pp. 36 – 43.
3. Eryshev V.A. Vestnik NGIE. 2018. № 6(85). pp. 17 – 26.
4. AlNajmi L., Abed F. Materials. 2020. №13 (20). 4541. DOI: 10.3390/ma13204541
5. Gao S., Liu L. Materials. 2024. №17 (8). 1843. DOI: 10.3390/ma17081843
6. Xing L., Lin G., Chen J. F. Journal of Composites for Construction. 2020. №24 (4). 04020030. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001036
7. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Primery rascheta zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij. Moskva: Vysshaya shkola, 2006. 504 p.
8. Georgiev S.V., A.I. Solov'yova, Bekkiev M.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8083.
9. Starishko I.N. Vestnik MGSU. 2014. № 4. pp. 59 – 69.



10. Evtushenko I.I., Vahidov R.N., Baramiya A.L., Pustovalov S.A., Zotov V.V., Nor-Arevyan S.L., Nuriev V.E. Inzhenernyj vestnik Dona. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4623.

Дата поступления: 17.04.2024

Дата публикации: 30.05.2024