

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.072.31:075.23

ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНУТИХ КОЛОН ПОРІВНЯНО З БУДІВЕЛЬНИМИ НОРМАМИ УКРАЇНИ

Кандидати техн. наук Є. І. Галагурия, М. О. Ковальов, Л. Б. Кравців, студ. І. В. Биченок

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ КОЛОНН ПО СРАВНЕНИЮ СО СТРОИТЕЛЬНЫМИ НОРМАМИ УКРАИНЫ

Кандидаты техн. наук Е. И. Галагурия, М. А. Ковалёв, Л. Б. Кравцев, студ. И. В. Быченко

VERIFICATION OF THE METHOD OF CALCULATION OF EXTRA-PRESSURE COMPRESSED COLUMNS COMPARED WITH THE CONSTRUCTION NORMS OF UKRAINE.

Phd. tehn. E. I. Galagurya, phd. tehn. M. O. Kovalov, phd. tehn. L. V. Kravtsiv, student I. V. Buchenok

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.177.2018.136577>

У статті наведено верифікацію розрахунку позацентрово стиснутих колон порівняно з будівельними нормами України. Розрахунок колон довжиною 3 і 6 м виконувався для трьох розрахункових схем: колона, жорстко закріплена знизу, шарнірно обіперта зверху та навантажена ексцентрично прикладеною силою на верхньому торці; колона, жорстко закріплена знизу, навантажена на вільному кінці ексцентрично прикладеною силою; колона, шарнірно закріплена, навантажена на верхньому торці ексцентрично прикладеною позовжньою силою. Граничне навантаження визначалося методом безпосереднього інтегрування. Отримані результати з похибкою до 19 % свідчать про можливість застосування запропонованих формул.

Ключові слова: колона, позацентровий стиск, граничне навантаження, небезпечний переріз, прогин.

В статье приведена верификация расчета внецентренно сжатых колонн в сравнении со строительными нормами Украины. Расчет колонн длиной 3 и 6 м выполнялся для трех расчетных схем: колонна, жестко защемленная снизу и шарнирно закрепленная сверху, нагруженная эксцентрично приложенной продольной силой на верхнем торце; колонна, жестко защемленная снизу, нагруженная на свободном конце эксцентрично приложенной силой; колонна, шарнирно закрепленная, нагруженная на верхнем торце эксцентрично приложенной продольной силой. Предельная нагрузка определялась методом непосредственного интегрирования. Полученные результаты с погрешностью до 19 % свидетельствуют о возможности применения предложенных формул.

Ключевые слова: колонна, внецентренное сжатие, предельная нагрузка, опасное сечение, прогиб.

In the works published earlier were obtained dependence which allows to obtain the value of the maximum force (the second group of limiting States) depending on the geometric characteristics

of eccentrically compressed columns. This article will be a comparison of the proposed method the calculation method of the State construction norms of Ukraine.

As the sample was adopted square steel cold formed electrically welded pipe section $50 \times 50 \times 2$ mm length $l = 3000$ mm $l = 6000$ mm.

The calculation was performed for the three design schemes: a hinged column, loaded at one end eccentrically applied force F ; the column is rigidly fixed at the bottom, hinged at the top and abbert loaded eccentrically applied force on the upper end; a column rigidly fixed at the bottom, loaded at the free end of the eccentric applied force.

In the proposed equations the value of the maximum power to obtain analytically, we can not, but knowing the geometrical characteristics of columns and using the method of direct integration it is possible to obtain the values of the ultimate strengths. The calculation process is organized as follows: set the step load in each approximation calculated deflection. The calculation continues until the load at which the obtained value of the deflection derevovolos limiting value thus. Calculated load is taken for the maximum force F which characterizes the bearing capacity of the columns.

After analyzing the results of the calculations, and received the error that does not exceed 19 %, we can talk about the possibility of using the proposed formulas for calculation of the maximum posacenere because they can afford to automate the process and reduce the computation time. The proposed formulas allow to obtain the maximum power depending on the preset value of deflection.

Keywords: column, eccentric compression, ultimate load, dangerous cross-section, deflection.

Вступ. При проектуванні металевих конструкцій необхідно враховувати методику розрахунку за граничними станами та рекомендації Державних будівельних норм України. При розрахунку на стійкість позакентрово стиснутих сталевих колон дуже складно автоматизувати процес розрахунку за методикою, викладеною в ДБН. Для вирішення цієї проблеми було вирішено використовувати диференціальне рівняння вигнутої осі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначенню значень граничних навантажень позакентрово стиснутих колон присвятили свої роботи Чихладзе Е. Д. [1–3], Ватуля Г. Л. [3], Кітов Ю. П. [3] та інші вчені. Але в даних працях недостатньо вивчена робота статично визначених і статично невизначених колон, навантажених з ексцентриситетом. У роботах [4, 5] була отримана залежність, яка дозволяє отримати значення граничної сили (по другій групі граничних станів) залежно від геометричних характеристик позакентрово стиснутих колон.

Визначення мети та завдання дослідження. Основною метою статті є розроблення методики розрахунку позакентрово стиснутих колон, використовуючи диференціальне рівняння вигнутої осі. Завдання дослідження полягає в проведенні порівняння запропонованої методики розрахунку з рекомендаціями, викладеними в ДБН [6].

Основна частина дослідження. У якості зразка була прийнята сталена квадратна електрозварна холоднодеформована труба (рис. 1) довжиною $l = 3$ м та $l = 6$ м.

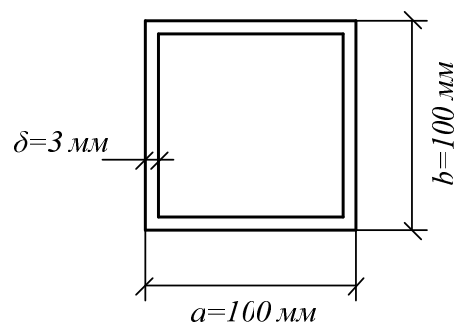


Рис. 1. Схема поперечного перерізу зразка

Розрахунок виконувався для трьох розрахункових схем (рис. 2): шарнірно закріплена колона, навантажена на одному торці ексцентрично прикладеною силою F (рис. 2, а); колона, жорстко закріплена внизу, шарнірно обіперта зверху і

навантажена ексцентрично прикладеною силою на верхньому торці (рис. 2, б); колона, жорстко закріплена внизу, навантажена на вільному кінці ексцентрично прикладеною силою (рис. 2, в).

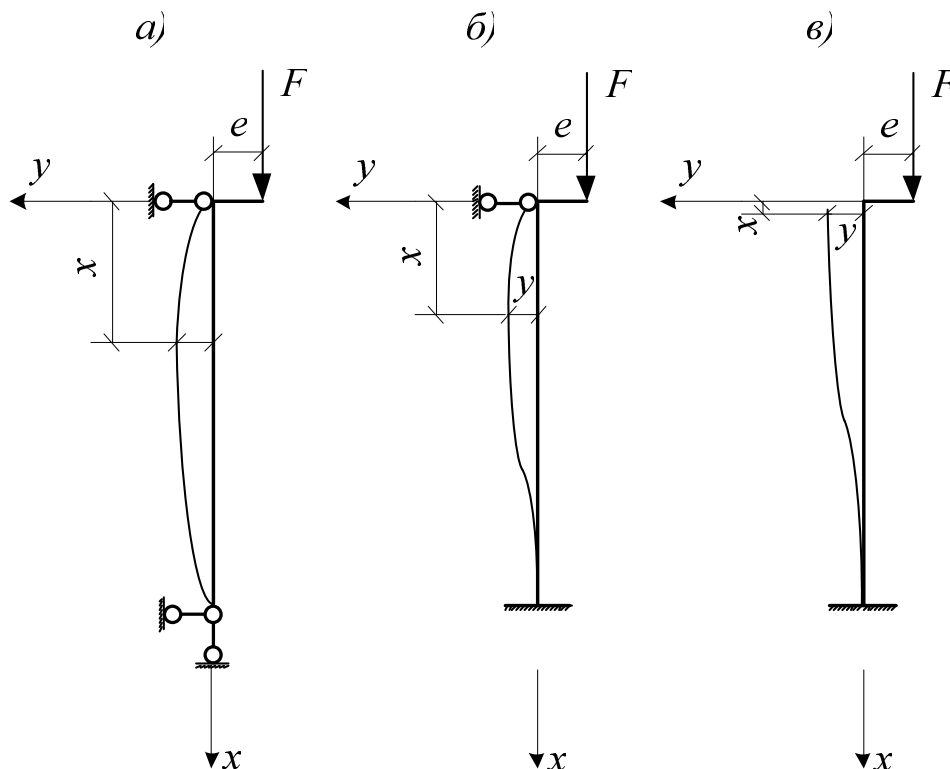


Рис. 2. Розрахункові схеми колон

1. Шарнірно закріплена колона, навантажена на одному торці ексцентрично прикладеною силою F (рис. 2, а).

Розрахунок колони за запропонованою методикою

Диференціальне рівняння вигнутої осі

$$y'' + k^2 \cdot y = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{l} - k^2 \cdot e, \quad (1)$$

де

$$k^2 = \frac{F}{EI}. \quad (2)$$

Розв'язання рівняння (1):

$$y = e \cdot \left[\cos kx - \operatorname{ctg} kl \cdot \sin kx - 1 + \frac{x}{l} \right], \quad (3)$$

Небезпечним буде перетин з максимальним прогином. Для визначення небезпечного перетину необхідно знайти точки екстремуму функції (3), тобто прирівняти першу похідну нулю та визначити значення x . Для цього використовуємо програму на ЕОМ і знаходимо перетин, де буде максимальний прогин:

$$x = \frac{2 \operatorname{arctg} \left(\frac{kl \cdot \operatorname{tg} kl - \sqrt{\frac{k^2 l^2 - 1}{\cos^2(kl)^2} + 1}}{kl + \operatorname{tg} kl} \right)}{k}, \quad (4)$$

З урахуванням рівнянь (4) та (2) рівняння (3) набуває вигляду (5)

$$y = e \cdot \cos \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{F}{EI}} l \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l - \sqrt{\frac{\frac{F}{EI} l^2 - 1}{\cos^2 \left(\sqrt{\frac{F}{EI}} l \right)^2} + 1}}{\sqrt{\frac{F}{EI}} l + \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l}} \right) \right) -$$

$$- e \cdot \operatorname{ctg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l \cdot \sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{F}{EI}} l \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l - \sqrt{\frac{\frac{F}{EI} l^2 - 1}{\cos^2 \left(\sqrt{\frac{F}{EI}} l \right)^2} + 1}}{\sqrt{\frac{F}{EI}} l + \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l}} \right) \right) -$$

$$\frac{-e + e}{\sqrt{\frac{F}{EI}} l} \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{F}{EI}} l \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l - \sqrt{\frac{\frac{F}{EI} l^2 - 1}{\cos^2 \left(\sqrt{\frac{F}{EI}} l \right)^2} + 1}}{\sqrt{\frac{F}{EI}} l + \operatorname{tg} \sqrt{\frac{F}{EI}} l}} \right) \right).$$

Оскільки в рівнянні (5) функція не визначена, то значення граничної сили аналітично отримати ми не зможемо, але,

знаючи геометричні характеристики колони та використовуючи метод послідовних наближень, можна отримати

значення граничної сили. Процес розрахунку організовано таким чином: задаємо крок по навантаженню, у кожному наближенні розраховується прогин, який порівнюється з граничним значенням відповідно до роботи [7]. Розрахунок продовжується до того навантаження, при якому отримане значення прогину дорівнювало граничному значенню [7]. Розраховане таким чином навантаження приймається за граничну силу F , яка характеризує несучу здатність колон. Результати розрахунку представлені в табл. 1.

Розрахунок за ДБН [6]

Розрахунок за державними будівельними нормами України виконувався для суцільностінчастих елементів постійного по довжині коробчастого перерізу при стиску зі згином у двох головних площинах (п. 10.2.10) [6].

Розрахункова формула

$$\frac{F \cdot \gamma_n}{\varphi_e \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} - \frac{M \cdot \gamma_n}{c \cdot \delta \cdot W \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (6)$$

де F – поздовжня сила;

M – згинальний момент;

γ_n – коефіцієнт надійності за відповідальністю, визначається відповідно до роботи [8] (при оцінюванні даних випробувань коефіцієнт відповідальності $\gamma_n=1$);

φ_e – коефіцієнт стійкості при згині зі стиском визначається відповідно до дод. Ж [6] залежно від значень умовної гнучкості $\bar{\lambda}$ та приведенного відносного ексцентриситету m_{ef} ;

A – площа перерізу брутто, $A=11.6 \cdot 10^4 \text{ м}^2$;

W – момент опору перерізу, $W_c=36.5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$;

R_y – розрахунковий опір сталі розтягу, стиску і згину за границею текучості, $R_y = 245 \text{ МПа}$;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, який визначається відповідно до роботи [6], $\gamma_c = 1.05$;

c – коефіцієнт, який визначається відповідно до дод. М [6], $c=1.07$;

δ – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$\delta = 1 - \frac{0.1 \cdot F \cdot \bar{\lambda}^2}{A \cdot R_y}. \quad (7)$$

З урахуванням рівняння (7) і приймаючи, що $M=F \cdot e$, рівняння (6) набуває такого вигляду:

$$\frac{F \cdot \gamma_n}{\varphi_e \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} - \frac{F \cdot e \cdot \gamma_n}{c \cdot \left(1 - \frac{0.1 \cdot F \cdot \bar{\lambda}^2}{A \cdot R_y} \right) \cdot W \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1. \quad (8)$$

Коефіцієнт стійкості при позacentровому стиску φ_e слід визначати відповідно до дод. Ж [6] залежно від значень умовної гнучкості $\bar{\lambda}$ та приведенного відносного ексцентриситету m_{ef} , який обчислюється за формулою

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (9)$$

де E – модуль пружності сталі, $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

λ – гнучкість, що визначається за формулою

$$\lambda = \frac{l_{np}}{i}, \quad (10)$$

де i – радіус інерції

$$i = \sqrt{\frac{I}{A'}} \quad (11)$$

де I – момент інерції, $I = 18.3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$;
 l_{np} – приведена довжина колони,

$$l_{np} = \mu \cdot l, \quad (12)$$

де l – довжина колони;
 μ – коефіцієнт приведення, $\mu = 1$.

$$m_{ef} = \eta \cdot m, \quad (13)$$

де η – коефіцієнт впливу форми перерізу, приймається відповідно до роботи [6],

$$\eta = (1.75 - 0.1 \cdot m) - 0.02(5 - m)\bar{\lambda}, \quad (14)$$

де m – відносний ексцентриситет,

$$m = \frac{e \cdot A}{W_c}, \quad (15)$$

де e – ексцентриситет, $e = 0.025 \text{ м}$;

W_c – момент опору перерізу,
 $W_c = 36.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Результати розрахунків зведемо до табл. 2.

2. Колона, жорстко закріплена знизу, шарнірно обіперта зверху та навантажена ексцентрично прикладеною силою на верхньому торці (рис. 2, б).

Розрахунок колони за запропонованою методикою

Диференціальне рівняння вигнутої осі

$$y'' + k^2 \cdot y = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{2 \cdot l} - k^2. \quad (16)$$

Розв'язання рівняння (16):

$$y = e \left(\cos kx - \left(\frac{\cos kl + 0.5}{\sin kl} \right) \cdot \sin kx - 1 + \frac{x}{2 \cdot l} \right). \quad (17)$$

Для визначення небезпечного перетину необхідно знайти екстремум функції (17). У результаті отримаємо

відстань x до перетину з максимальним прогином:

$$x = \frac{1}{k} \cdot 2 \arctg \left(\frac{-4kl \operatorname{tg}(0.5kl)}{kl \operatorname{tg}(0.5kl)^2 - 3kl - 6 \operatorname{tg}(0.5kl)} \right) + \frac{\sqrt{k^2 l^2 \operatorname{tg}(0.5kl)^4 + 10k^2 l^2 \operatorname{tg}(0.5kl)^2 + 9k^2 l^2 - 36 \operatorname{tg}(0.5kl)^2}}{kl \operatorname{tg}(0.5kl)^2 - 3kl - 6 \operatorname{tg}(0.5kl)}, \quad (18)$$

З урахуванням виразів (18), (17) отримуємо вираз, у якому функція не визначена та значення граничної сили аналітично ми вивести не зможемо, але,

знаючи геометричні характеристики колони та використовуючи метод, запропонований раніше, ми зможемо визначити значення сили.

$$\begin{aligned}
 & y = e \cdot \cos \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{l \sqrt{\frac{F}{EI}} \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) - \sqrt{\frac{Fl^2}{EI \cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2 + 1} - \frac{1}{\cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2}}}{l \sqrt{\frac{F}{EI}} + \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)} \right) \right) - \\
 & - e \operatorname{ctg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) \sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{l \sqrt{\frac{F}{EI}} \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) - \sqrt{\frac{Fl^2}{EI \cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2 + 1} - \frac{1}{\cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2}}}{l \sqrt{\frac{F}{EI}} + \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)} \right) \right) - \\
 & 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{l \sqrt{\frac{F}{EI}} \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) - \sqrt{\frac{Fl^2}{EI \cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2 + 1} - \frac{1}{\cos^2 \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)^2}}}{l \sqrt{\frac{F}{EI}} + \operatorname{tg} \left(l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)} \right) \\
 & - e + e \\
 & \qquad \qquad \qquad l \sqrt{\frac{F}{EI}}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Результати розрахунків представлено в табл. 1.

Розрахунок за ДБН [6] ведеться аналогічно за формулами з попереднього пункту.

3. Колона, жорстко затиснена знизу, навантажена на вільному кінці ексцентрично прикладеною силою (рис. 2, в).

Розрахунок колони за запропонованою методикою

Диференціальне рівняння вигнутої осі має такий вигляд:

$$y'' + k^2 y = -k^2 e. \tag{20}$$

Розв'язання рівняння (20):

$$y = e \left(\cos kx + \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \sin kx - 1 \right). \tag{21}$$

Прирівнявши першу похідну функції (21) до 0, визначимо значення x , при якому функція добігає максимального значення (тобто знаходимо перетин з максимальним прогином). Для цього використовуємо ЕОМ.

$$x = - \frac{\operatorname{arctg} \left(\frac{\cos(0.5kl) - 1}{\sin(0.5kl)} \right)}{k}. \tag{22}$$

З урахуванням виразу (22) рівняння (21) набуває такого вигляду:

$$y = e \cdot \cos \left(-\operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \left(0.5l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) - 1}{\sin \left(0.5l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)} \right) \right) +$$

$$+ e \cdot \left(\frac{1 - \cos l \sqrt{\frac{F}{EI}}}{\sin l \sqrt{\frac{F}{EI}}} \right) \sin \left(-\operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \left(0.5l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right) - 1}{\sin \left(0.5l \sqrt{\frac{F}{EI}} \right)} \right) \right) - e. \quad (23)$$

З рівняння (23) виразимо значення критичної сили F за допомогою ЕОМ.

$$F = \frac{4 \operatorname{arctg} \left(-\frac{2e \cdot \sqrt{2ey + y^2}}{(y + e)^2} \right)^2 EI}{l^2}. \quad (24)$$

Результати розрахунків подано в табл. 1.

Розрахунок за ДБН [6] ведеться аналогічно за формулами з п. 1.

4. Результати розрахунків
У табл. 2 подано результати розрахунків колон довжиною 3 та 6 м за ДБН [6].

Таблиця 1

Порівняння результатів розрахунків за запропонованими формулами порівняно з методикою ДБН

Розрахункова схема	Розрахунок колон довжиною 3 м			Розрахунок колон довжиною 6 м		
	запропонована формула	за ДБН	похибка	запропонована формула	за ДБН	похибка
Рис. 2, а	273.39	310.67	12	43.69	49.94	12.5
Рис. 2, б	669.7	609.83	9.8	169.65	167.92	10
Рис. 2, в	40.95	49.94	18	20.18	24.92	19

Таблиця 2

Результати розрахунків за ДБН

Параметр	Колони довжиною 3 м			Колони довжиною 6 м		
	Рис. 2, а	Рис. 2, б	Рис. 2, в	Рис. 2, а	Рис. 2, б	Рис. 2, в
1	2	3	4	5	6	7
γ_n	1	1	1	1	1	1
φ_e	0.363	0.4	0.22	0.22	0.304	0.08
$A, \text{м}^2$	$11.6 \cdot 10^{-4}$	$11.6 \cdot 10^{-4}$	$11.6 \cdot 10^{-4}$	$11.6 \cdot 10^{-4}$	$11.6 \cdot 10^{-4}$	$11.6 \cdot 10^{-4}$

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
$W_c, \text{ м}^3$	$36.5 \cdot 10^{-6}$	$36.5 \cdot 10^{-6}$	$36.5 \cdot 10^{-6}$	$36.5 \cdot 10^{-6}$	$36.5 \cdot 10^{-6}$	$36.5 \cdot 10^{-6}$
$R_y, \text{ МПа}$	245	245	245	245	245	245
γ_c	1	1	1	1	1	1
c	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
$\bar{\lambda}$	2.585	1.81	5.17	5.17	3.62	10.35
λ	75.76	53.03	151.52	151.52	106.06	303.03
$i, \text{ м}$	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396
$l_{пр}, \text{ м}$	3	2.1	6	6	4.2	12
$l, \text{ м}$	3	3	3	6	6	6
μ	1	0.7	2	1	0.7	2
$I, \text{ м}^4$	$18.3 \cdot 10^{-7}$	$18.3 \cdot 10^{-7}$	$18.3 \cdot 10^{-7}$	$18.3 \cdot 10^{-7}$	$18.3 \cdot 10^{-7}$	$18.3 \cdot 10^{-7}$
η	1.45	1.52	1.3	1.3	1.366	1.3
m	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
$e, \text{ м}$	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
m_{ef}	1.15	1.2	1.027	1.027	1.08	1.027
$F, \text{ кН}$	310.67	609.83	49.94	49.94	167.92	24.92

Висновки. Проаналізувавши результати розрахунків та отримавши похибку, яка не перевищує 19 %, можна вважати можливим використання запропонованих

формул для розрахунку граничної позacentрової сили, оскільки вони можуть дозволити автоматизувати процес і скоротити час розрахунку.

Список використаних джерел

1. Чихладзе, Э. Д. Расчёт сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при внецентренном сжатии и изгибе [Текст] / Э. Д. Чихладзе // Тр. ХИИТа. – 1993. – Вып. 21. – С. 23–25.
2. Чихладзе, Э. Д. Расчёт сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при внецентренном сжатии и изгибе [Текст] / Э. Д. Чихладзе, А. Д. Арсланханов // Строительство : Известия вузов. – 1992. – № 1. – С. 6–10.
3. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций [Текст] / Э. Д. Чихладзе, Г. Л. Ватуля, Ю. П. Китов [и др.]; под ред Э. Д. Чихладзе. – К. : Транспорт Украины, 2006. – 136 с.
4. Особенности расчета критической силы для внецентренно-сжатых колонн [Текст] / Е. И. Галагурия, М. А. Ковалёв, Л. Б. Кравцив // Вісник ОДАБА. – Одеса : Атлант, 2016. – Вип. 63. – С. 32–37.
5. Determination of the critical load of eccentrically compressed columns by the second group of limit states [Text] / E. Galagurya, M. Kovalov, L. Kravtsiv, I. Bychenok // Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND'2017. - Volume 107, 00050 (2017).
6. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст] : ДБН В.2.6-198:2014. – Офіц. вид. – К. : Мікрореґіон України, 2014. – 205 с.

7. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування [Текст] : ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – Офіц. вид. – К.: МІНБУД УКРАЇНИ, 2006. – 9 с.

8. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] : ДБН В.1.2-14-2009. – Офіц. вид. – К.: МІНРЕГІОНбуд України, 2009. – 24 с.

Галагура Євгеній Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.
Ковальов Максим Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)6335081. E-mail: maks_kov@ukr.net.
Кравців Лариса Богданівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)1606224. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.
Биченок Ігор Володимирович, студент будівельного факультету Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (063)7060722. E-mail: igor-buchenok2111@yandex.ru.

Галагура Евгений Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики и гидравлики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.
Ковалёв Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики и гидравлики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (050)6335081. E-mail: maks_kov@ukr.net.
Кравцев Лариса Богдановна, канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики и гидравлики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (050)1606224. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.
Быченко Игорь Владимирович, студент строительного факультета Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (063)7060722. E-mail: igor-buchenok2111@yandex.ru.

Galagurya Evgeniy, PhD in Technical Sciences, associate professor Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.
Kovalov Maksym, PhD in Technical Sciences, associate professor Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (050)6335081. E-mail: maks_kov@ukr.net.
Kravtsiv Larisa, PhD in Technical Sciences, associate professor Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (050)1606224. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.
Bychenok Igor, student Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (063)7060722. E-mail: igor-buchenok2111@yandex.ru.

Статтю прийнято 24.04.2018 р.