

УДК 624.012.25: 539.319.00.24

Клюка О. М., к. т. н., доц., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**СКОРЕГОВАНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕРІЗІВ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПРОФІЛЮ З ОДИНОЧНОЮ АРМАТУРОЮ ПРИ ЗГІНІ З КРУЧЕННЯМ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ**

Особливістю нових українських нормативних документів щодо розрахунку залізобетонних елементів при згині з крученням є заміна форми епюри напружень в стиснутій зоні бетону з прямокутної на криволінійну. Це відповідає фактичному напруженому стану поперечного перерізу. В попередніх роботах автора запропонована методика розрахунку вищезазначених елементів з урахуванням поздовжньої арматури і трьох стрижнів поперечної. В даній роботі запропоновано скорегований метод розрахунку міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при сумісній дії крутного та згинаючого моментів на основі нелінійної деформаційної моделі розрахунку.

**Ключові слова:** згин з крученням, прямокутний профіль, одиночне армування, деформаційна модель.

**Постановка проблеми.** Як правило, в несучих згинальних залізобетонних елементах у процесі довготривалої експлуатації з часом виникають додаткові зусилля крутного характеру, викликані неспівпадінням вертикальної площини симетрії поперечного перерізу елемента з вертикальною площиною дії зовнішнього навантаження або зміною умов експлуатації конструкції. Внаслідок цього в конструкції, розрахованій на сприйняття згинаючого моменту, виникає більш складний напружений стан – згин з крученням. До

недавнього часу розрахунок таких елементів здійснювався за скорегованим в свій час радянським нормативним документом і зводився до перевірки їх несучої здатності при відомих розмірах поперечного перерізу, класі бетону і армуванні.

**Аналіз останніх досліджень.** В національних нормативних документах, що з'явилися з часом в Білорусії, Росії та Україні, була автоматично збережена схема розташування стиснутої зони бетону по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування на протилежних гранях. У той же час в національних нормах була прийнята деформаційна модель розрахунку, коли напруження за висотою стиснутої зони бетону розподіляються не за прямокутною формою, а за криволінійною, що відповідає фактичному напруженому стану поперечного перерізу [1].

Автор роботи [2], що займався дослідженням роботи попередньо напружених залізобетонних балок прямокутного перерізу при косому згині з крученням, доказав, що стиснута зона бетону розташовується не по лінії, що з'єднує кінці похилої тріщини руйнування на протилежних гранях елемента (пряма залежність від форми і розмірів поперечного перерізу), а під певним кутом до поздовжньої вісі елемента і не залежить від форми і розмірів поперечного перерізу, а залежить тільки від співвідношення діючих крутного і згинаючого моментів. Величина цього кута не може бути меншою 45°, що відповідає «чистому» крученню, і не може бути більшою 90°, що відповідає «чистому» згину. Для визначення кута нахилу  $\alpha$  стиснутої зони бетону до поздовжньої вісі елементів прямокутного поперечного перерізу він запропонував залежність у вигляді

$$\alpha = \arctg(1+1/5\psi), \quad (1)$$

де  $\psi = T : M_d$  – співвідношення між діючими крутним  $T$  та згинаючим  $M_d$  моментами. Автор роботи [3] експериментально підтвердив придатність залежності (1) і для елементів таврового та двотаврового поперечних перерізів.

У роботі [4] запропонована методика визначення несучої здатності звичайно армованих елементів прямокутного профілю

з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. В основу розрахунку покладена власна методика визначення критичної деформації бетону  $\varepsilon_{cl}$  в граничній стадії, розроблена на основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень.

У роботі [5] запропонована власна методика розрахунку несучої здатності попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу з урахуванням тільки трьох стрижнів поперечної арматури, перетнутих похилою тріщиною руйнування, а в роботі [6] – те ж саме, але з урахуванням усіх чотирьох стрижнів поперечної арматури при сумісній дії крутного та згинаючого моментів. У роботі [7] запропонована методика розрахунку несучої здатності тих же елементів з урахуванням тільки трьох стрижнів поперечної арматури, перетнутих похилою тріщиною руйнування, але з урахуванням визначення величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню у вигляді:

$$\sigma_c = f_{cd} \sum_{i=1}^5 \alpha_k \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \quad (2)$$

**Постановка завдання.** Скорегувати методику розрахунку міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури та визначенням величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеня у вигляді (2).

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Слід зазначити, що в згинальних елементах, при наявності крутних моментів, обов'язково необхідно влаштовувати закриті хомути для утворення внутрішнього крутного моменту для сприйняття розтягуючих напружень від крутного моменту, викликаного зовнішнім навантаженням. Внутрішній крутний момент повинен складатися із двох пар зусиль у стрижнях як вертикальних, так і горизонтальних гілок поперечної арматури, симетрично розташованих відносно центра

кручення, який у прямокутному перерізі співпадає з його геометричним центром. Виходячи з цих міркувань, метою даної роботи є корекція розрахункових формул, запропонованих у роботі [7] для визначення несучої здатності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням, що зазнають згину з крученням, на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури. Ця методика розрахунку базується на розрахунковій схемі (рис. 1, 2), в якій криволінійна епюра напружень в стиснутій зоні бетону висотою  $z_f$  замінюється прямокутною епюрою з умовною висотою  $z \leq z_f \leq z_{fl}$ , де  $z_{fl}$  – гранична висота стиснутої частини перерізу з рівномірно розподіленим напруженням в бетоні  $f_{cd}$ .

Для прямокутного перерізу з одиночною попередньо напруженою арматурою, розташованою тільки в розтягнутій зоні бетону (рис. 1), умови рівноваги зусиль в просторовому, нормальному до площини стиснутої зони бетону, перерізі запишуться таким чином:

$$\Sigma M_{O-O} = 0; \quad (3)$$

$$\Sigma X = 0, \quad (4)$$

де  $\Sigma M_{O-O}$  – сума моментів усіх внутрішніх і зовнішніх зусиль відносно нейтральної лінії O-O, що проходить через нижню межу стиснутої зони бетону і лежить в її площині:

$$M_d \sin \alpha + T \cos \alpha = N_{sp} \sin \alpha (d - z) + N_{swb} + \cos \alpha (h - a_z - z) + N_{swh} h \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha + 0,5 N_b z \quad (5)$$

У цій формулі:

$$N_{swb} = \bar{q}_{ywd} b \operatorname{ctg} \varphi; \quad (6)$$

$$N_{swh} = \bar{q}_{ywd} h \operatorname{ctg} \varphi; \quad (7)$$

де:  $\bar{q}_{ywd} = f_{ywd} A_{sw} / s$  – погонне зусилля в поперечних стрижнях (рис. 2), віднесене до одиниці довжини елемента; на початковому етапі розрахунку крок поперечної арматури  $s$  та її діаметр  $d$  приймаються конструктивно залежно від розмірів поперечного перерізу згинального елемента при поки що невідомому діаметрі поздовжньої робочої арматури, які потім уточнюються при перевірці несучої здатності елемента на дію крутного моменту;

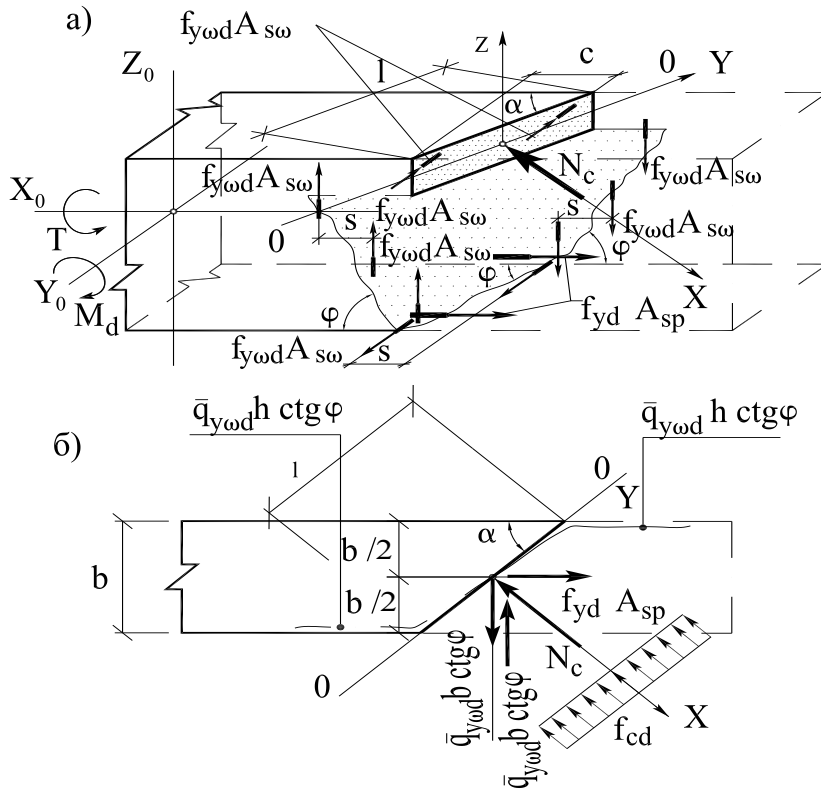


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного перерізу з одиночною арматурою при згині з крученням з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури на основі деформаційної моделі: а – аксонометричний вигляд розрахункової схеми; б – горизонтальна проекція залізобетонного елемента.

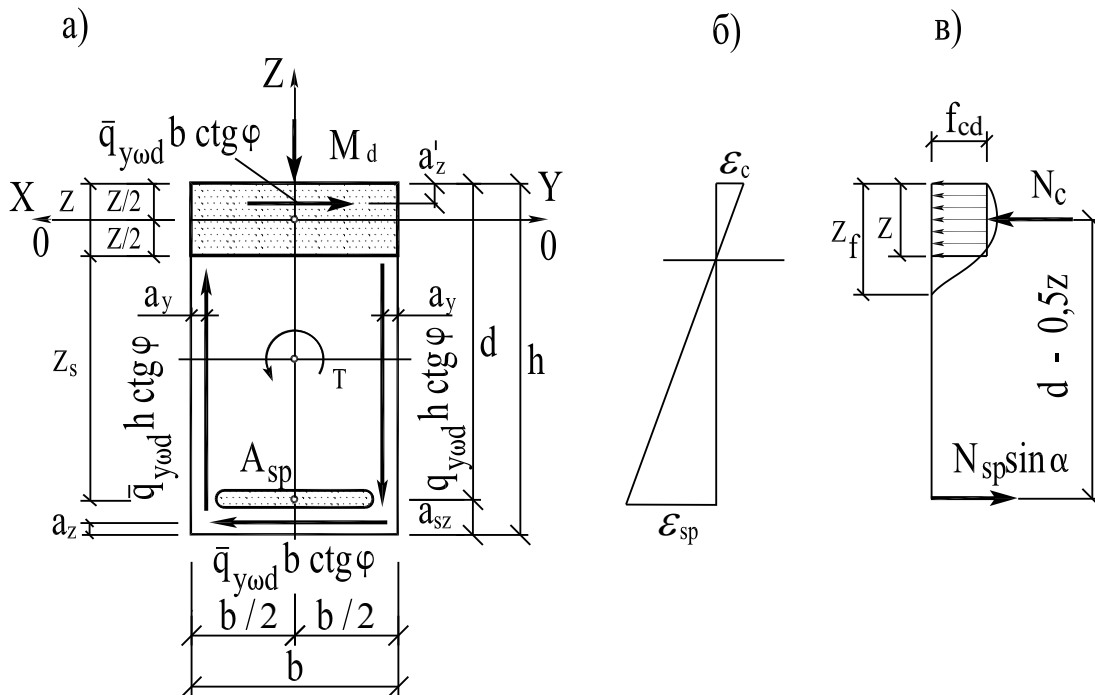


Рис. 2. До розрахункової схеми для визначення несучої здатності попередньо напруженого залізобетонного елемента прямокутного перерізу з одиночною арматурою при згині з крученням з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури на основі деформаційної моделі: а – поперечний переріз залізобетонного елемента; б – епюра деформацій; в – епюра внутрішніх зусиль в поперечному перерізі

$N_b$  – нормальне до площини стиснутої зони бетону зусилля, що сприймається бетоном стиснутої зони просторового перерізу. Величина цього зусилля (рис. 2) визначається за формулою:

$$N_c = \int_0^z \sigma_c dA = b \int_0^z \sigma_c dz = b \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c, \quad (8)$$

де  $\varepsilon_c$  – відносна деформація крайнього верхнього стиснутого волокна бетону;

$\Sigma X$  – сума проєкцій усіх внутрішніх зусиль на вісь, що проходить через точку перетину вертикальної осьової лінії  $Z$  із нейтральною лінією  $O-O$  перпендикулярно площині стиснутої зони бетону:

$$\Sigma X = N_{sp} \sin \alpha + N_{swb} \cos \alpha - N_c = 0, \quad (9)$$

де

$$N_{sp} = \sigma_{sp} A_{sp} = E_s \varepsilon_{sp} A_{sp}; \quad (10)$$

$\varepsilon_{sp}$  – відносна деформація крайнього волокна поздовжньої напруженої арматури.

З використанням залежності « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » у вигляді (2) формула (8) набуває вигляду:

$$N_c = f_{cd} b z \times \left( \alpha_1 \frac{\varepsilon_c}{2\varepsilon_{cl}} + \alpha_2 \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{cl}^2} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_c^3}{4\varepsilon_{cl}^3} + \alpha_4 \frac{\varepsilon_c^4}{5\varepsilon_{cl}^4} + \alpha_5 \frac{\varepsilon_c^5}{6\varepsilon_{cl}^5} \right), \quad (11)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти, що визначаються згідно з рекомендаціями [7].

З урахуванням (10) і (11) складові рівняння (9) набувають вигляду:

$$N_{sp} = E_s A_{sp} \times \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z); \quad (12)$$

$$N_c = f_{cd} b z \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \quad (13)$$

Моменти, які сприймаються поздовжньою напруженою ( $M_{sp}$ ) і поперечною ( $M_{swb}$  і  $M_{swh}$ ) арматурою та стиснутою зоною бетону  $M_c$  відносно нейтральної осі  $O - O$  просторового перерізу, визначаються за формулами:

$$M_{sp} = \sigma_{sp} A_{sp} z_{sp} = E_s \varepsilon_{sp} A_{sp} z_{sp} = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2; \quad (14)$$

$$M_{swb} = N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - z); \quad (15)$$

$$M_{swh} = N_{swh} h \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha; \quad (16)$$

$$M_c = \int_0^z \sigma_c z dA_c = b \int_0^z \sigma_c dz = b \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon \quad (17)$$

З урахуванням виразу (2) формула (17), за якою визначається згинаючий

момент, що сприймає стиснута зона бетону, набуває вигляду:

$$M_c = f_{cd} b z^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k. \quad (18)$$

Сумарний згинаючий момент, що сприймається поздовжньою напруженою і поперечною арматурою, визначається за формулою:

$$M_{sp} + M_{swb} - M_{swh} = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + \quad (19)$$

$$+ N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - z) - N_{swh} h \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha.$$

Підставляючи вирази (18) і (19) у (5), отримуємо

$$M_d \sin \alpha + T \cos \alpha = E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - z) - N_{swh} h \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha + \quad (20)$$

$$+ f_{cd} b z^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно  $M_d$  з урахуванням того, що  $\psi = T : M_d$ , отримуємо розрахункову формулу для визначення міцності просторових перерізів попередньо напружених елементів прямокутного профілю з одиночною арматурою з урахуванням усіх чотирьох стрижнів поперечної арматури при згині з крученням

$$M_d = \frac{1}{\sin \alpha + \psi \cos \alpha} \times \left\{ E_s A_{sp} \frac{\varepsilon_c}{z} (d - z)^2 + N_{swb} \cos \alpha (h - a_z - z) - \quad (21)$$

$$- N_{swh} h \operatorname{ctg} \varphi \sin \alpha + f_{cd} b z^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}} \right)^k \right\}$$

в якій критична деформація бетону  $\varepsilon_{cl}$  визначається за запропонованою в роботі [5] формулою:

$$\varepsilon_{cl} = 0,00074 f_{cd}^{0,31}, \quad (22)$$

отриманою на підставі виконаних власних експериментально-теоретичних досліджень.

У формулі (21) параметр  $z$  визначається методом поступового наближення до досягнення достатньої точності не нижче 5 %.

Після цього за формулою:

$$T = \psi M_d \quad (23)$$

визначають величину крутного моменту  $T$ , що сприймається просторовим перерізом елемента прямокутного перерізу з одиночною поздовжньою напруженою арматурою з урахуванням усіх чотирьох стрижнів поперечної арматури при згині з крученням.

**Висновки:** 1. В роботі аргументована необхідність влаштування закритих хомутів в поперечному перерізі попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу з одиночним армуванням, що працюють в умовах сумісної дії крутного та згинаючого моментів.

2. Запропонована методика дозволяє виконувати розрахунок міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного перерізу з одиночним армуванням при сумісній дії згинаючого та крутного моментів на основі деформаційної моделі з урахуванням усіх чотирьох гілок поперечної арматури та визначенням величини напружень за висотою стиснутої зони бетону поліномом п'ятого ступеню у вигляді (2).

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:**

1. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. // К.: Держбуд України, – 2009. – 71 с.
2. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения при косом изгибе с кручением: дис. ... канд. техн. наук. : 05.23.01 / Кузьменко А. М. – Полтава, 1972. – 230 стр.
3. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов таврового и двутаврового поперечных сечений на косоугольном изгибе с кручением: дис. ... канд. техн. наук.: 05.23.01 / Жорняк Н. С. – Полтава, 1973. – 170 стр.
4. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів при згині з крученням на основі нелінійної деформаційної моделі.: дис. ... канд. техн. наук за спец. 05.23.01 / Ключка О.М. – Полтава: Полтавський НТУ ім. Ю. Кондратюка, 2010. – 163 с.
5. Жорняк Н. С., Ключка Е. Н. Расчет несущей способности преднапряженных

железобетонных элементов прямоугольного сечения с одиночной арматурой при изгибе с кручением на основе деформационной модели // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць, Випуск 17 – Рівне, 2008. – С. 156-162.

6. Ключка О. М., Жорняк М. С. Уточнений метод розрахунку міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі // Науково-технічний збірник «Містобудування та територіальне планування». Київ – КНУБА, 2014. – Вип. 54. – С. 193 – 200.

7. Ключка О. М., Жорняк М. С. До визначення міцності просторових перерізів попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночною арматурою при згині з крученням на основі деформаційної моделі // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. К., 14-15 червня 2012 р. У семи томах. Том 5 «Точні науки» С. 68 – 73.

#### **АННОТАЦІЯ**

*Особенностью новых украинских нормативных документов по расчету железобетонных элементов при изгибе с кручением является замена формы эпюры напряжений в сжатой зоне бетона с прямоугольной на криволинейную. Это соответствует фактическому напряженному состоянию поперечного сечения. В предыдущих работах автором была предложена методика расчета вышеуказанных элементов с учетом продольной арматуры и трех стержней поперечной. В данной работе предложен скорректированный метод расчета прочности пространственных сечений предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного профиля с одиночным армированием при совместном действии крутящего и изгибающего моментов на основе нелинейной деформационной модели расчета.*

*Ключевые слова: изгиб с кручением, прямоугольное сечение, одиночное армирование, деформационная модель.*

## ANNOTATION

*In accordance with the regulations of Belarus, Russia and Ukraine in the calculation of concrete elements in bending with twisting layout of the concreted compressed zone is proposed according with recomends of Soviet standards. A speciality of these standards is a replace of the rectangular diagrams of stresses in the compressed area of concrete on curved, corresponding to the actual state of intense cross-section. In previous works the author proposed method of calculating the above mentioned items in view of the longitudinal and three transverse reinforcement rods. In this paper the method for calculating the adjusted strength spatial sections of prestressed concrete elements of rectangular profile with a single reinforcement in the joint action of twisting and bending moments based on nonlinear deformation model calculation.*

*Keywords: bend with twisting, rectangular profile, single re-enforcement, deformation model*

УДК 624.012.3/4:693.955

*Довженко О.О., к.т.н., доц., ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, м. Полтава  
Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с., ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, м. Полтава  
Шостак І.В., асп., ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, м. Полтава*

**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЇ ЗБІРНО-МОНОЛІТНОГО  
КАРКАСУ В БАГАТОПОВЕРХОВОМУ  
БУДІВНИЦТВІ УКРАЇНИ**

*Обґрунтовано вибір каркасної збірно-монолітної конструктивної системи для широкого застосування в Україні. Розглянуті з'єднання несучих збірно-монолітних елементів каркасу з підвищеним опором зрізу. Розроблені пропозиції щодо розрахунку несучої здатності шпонкових стиків на основі варіаційного методу в теорії пластичності бетону. Достовірність методики розрахунку підтверджена експериментальними дослідженнями зразків із важкого бетону, керамзитобетону та фібробетону. Оцінена несуча здатність вузла з'єднання ригеля з колоною системи SAPET із врахуванням специфіки його конструктивного рішення.*

*Ключові слова: елементи каркасу, шпонкові з'єднання, несуча здатність, варіаційний метод, енергозберігаюча технологія.*

**Вступ.** Загальновідомо, що ступінь розвитку будівельної галузі визначається рівнем енергетичних витрат на реалізацію будівельних об'єктів. Найбільш ефективний спосіб їх зниження – застосування виробів, виготовлених із використанням сучасних заводських технологій. При цьому менш енергоємною, а отже, більш економічною та прогресивною для багатоповерхових будівель є каркасна конструктивна система.

**Постановка проблеми.** У масовій забудові пріоритетним та стратегічно правильним вважається розвиток і вдосконалення каркасних систем із підвищеною надійністю та безпекою для