

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ В СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ ПРИ ОДНОВІСНОМУ ТА ДВОВІСНОМУ ОБТИСКУ

© Горобець А.М., Журавський О.Д., 2007

Досліджено сучасні норми, за якими виконується розрахунок втрат попереднього напруження при одновісному і двовісному обтиску. Встановлено, що норми недостатньо описують двовісний обтиск як залізобетонних, так і сталевібробетонних елементів. Тому були запропоновані коефіцієнти, які уточнюють нормативні формули і дають змогу точніше визначити втрати попереднього напруження для двовісно обтиснутих сталевібробетонних елементів.

In this work executed a study of the contemporary standards, which are used with the calculation of the losses of preliminary stress with the axial and biaxial compression. It was established that the standards do not sufficiently accurately describe the biaxial compression both of ferroconcrete and a steel fiber concrete elements. Therefore were proposed the coefficients, which to make more exact normative formulas make it possible to obtain the more precise exact values of the losses of preliminary stress for the biaxial compressed a steel fiber concrete elements.

**Постановка проблеми.** Сучасне будівництво потребує використання ефективних матеріалів, які мають підвищені міцнісні та деформативні характеристики порівняно з традиційними. Одним з таких матеріалів є сталевібробетон. Сталевібробетон – це бетон, армований тонкими сталевими фібрами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження сталевібробетону почалось у ХХ столітті. Вивченням властивостей сталевібробетону займалося багато вітчизняних та іноземних науковців, зокрема Д.С. Аболинш, В.Б. Арончик, А.Я. Барашиков, И.В. Волков, В.П. Вилегжанін, Г.В. Гетун, В.И. Григорьев, О.П. Кричевський, С.О. Кричевський, Б.И. Крилов, Л.Г. Курбатов, Ф.Н. Рабинович, К.В. Талантова, Е.А. Шабловский та інші. Дослідження довели перспективність використання сталевібробетону в будівельній галузі. Більшість робіт [2–4, 11, 12] присвячено вивченню таких основних проблем: вплив виду, кількості, орієнтації, міцності і форми сталевих фібр, а також структури і міцності бетонної матриці на міцність, деформативність, морозостійкість, водонепроникність, тріщиностійкість та інші характеристики сталевібробетону і конструкції з нього. Але водночас робіт, в яких досліджено попередньо обтиснутий сталевібробетон, не досить багато [1, 5]. Хоча попередньо напружені конструкції в наш час не є такими поширеними, як монолітні, але за такими конструкціями, на наш погляд, майбутнє і поява нових технологій, які дадуть змогу виконувати попереднє напруження безпосередньо на будівельному майданчику дасть значний поштовх до широкого використання в будівництві.

Актуальність проведеної роботи полягає у тому, щоб дослідити втрати попереднього напруження в сталевібробетонних зразках при двовісному стиску.

**Мета роботи.** Мета роботи – дослідження втрат попереднього напруження при одновісному та двовісному стиску сталевібробетонних елементів.

**Експериментально-теоретичні дослідження.** Дослідження втрат попереднього напруження від усадки і повзучості сталевібробетону при двовісному напруженні стані виконувалися на плитах розміром 40×800×800 мм з попередньо напруженою арматурою Ø5 Вр-II у двох напрямках. Виготовлено дві серії плит з різним рівнем попереднього напруження. Характеристики сталевібробетону серії I та II наведено у роботах [6, 7]. Механічні характеристики сталі: межа міцності  $\sigma_u = 1811$  МПа, умовна межа плинності  $\sigma_{0,2} = 1400$  МПа, модуль пружності  $E_s = 2,0 \times 10^5$  МПа.

У результаті проведених досліджень отримано сумарні пружно-миттєві деформації і деформації повзучості попередньо напружених сталевібробетонних плит в одному та двох напрямках, а також усадкові деформації сталевібробетонних плит без попереднього напруження.

Зміну сумарних втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості підраховували за формулою:

$$\sigma_{sfc,el} + \sigma_{sfc,c} = (\varepsilon_{el} + \varepsilon_{crp}) E_s, \quad (1)$$

де  $\sigma_{sfc,el}$  – втрати попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій сталевібробетону;  $\sigma_{sfc,c}$  – те саме, від повзучості сталевібробетону;  $E_s$  – модуль пружності арматури.

Для опису залежності напружень і деформацій при одновісному і двовісному стиску сталевібробетону за основу прийнято алгоритм, запропонований в [8].

Напруження в арматурі в двовісно обтиснутих плитах перед відпуском визначають за формулами:

$$\sigma_{sp,x}^0 = \varepsilon_{s,x}^0 \cdot E_{s,x}; \quad \sigma_{sp,y}^0 = \varepsilon_{s,y}^0 \cdot E_{s,y}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{s,x}^0$ ;  $\varepsilon_{s,y}^0$  – відносні деформації попередньо напруженої арматури, розміщеної відповідно вздовж осей X та Y перед відпуском;  $E_{s,x}$ ;  $E_{s,y}$  – модулі пружності арматури відповідно вздовж осей X та Y.

У момент передачі зусилля з упорів на бетон напруження у бетоні відповідає:

$$\sigma_{fb,x} = \frac{\sigma_{sp,x}^0 \cdot A_{s,x1}}{l_x \cdot h}; \quad \sigma_{fb,y} = \frac{\sigma_{sp,y}^0 \cdot A_{s,y1}}{l_y \cdot h}, \quad (3)$$

де  $A_{s,x1}$  та  $A_{s,y1}$  – площа поперечного перерізу одного арматурного стрижня, розміщеного відповідно вздовж осей X та Y;  $l_x$  та  $l_y$  – крок арматурних стрижнів, спрямованих вздовж відповідних осей;  $h$  – товщина плити.

Визначивши напруження  $\sigma_{fb,x}$  і  $\sigma_{fb,y}$ , на базі моделі про ортотропне тіло за формулами визначаємо значення відносних деформацій сталевібробетону при двовісному стиску.

Відносні деформації арматури у двовісно обтиснутих сталевібробетонних елементах визначаємо за рівняннями сумісності деформацій:

$$\varepsilon_{2s,x} = \varepsilon_{s,x}^0 - \varepsilon_{2fb,x}; \quad \varepsilon_{2s,y} = \varepsilon_{s,y}^0 - \varepsilon_{2fb,y}. \quad (4)$$

Зміну тривалих деформацій двовісно напружених сталевібробетонних зразків описуємо за допомогою відношень, отриманих для двовісно стиснутих сталевібробетонних зразків з урахуванням того, що напруження в попередньо напружених елементах з часом зменшуються. Тому повзучість попередньо напружених елементів з часом зменшується швидше ніж в елементів під постійним навантаженням.

Для побудови графіка деформацій повзучості приймаємо кусково-лінійну апроксимацію зменшення напружень у часі, вважаючи, що в межах інтервалу часу  $[t_{n-1}; t_n]$  напруження залишаються постійними. Тоді напруження у арматурі на кожній ділянці можна визначити за співвідношенням:

$$\sigma_{sp,x}(t_n) = \varepsilon_{2s,x}(t_{n-1}) \cdot E_{s,x}; \quad \sigma_{sp,y}(t_n) = \varepsilon_{2s,y}(t_{n-1}) \cdot E_{s,y}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{2s,x}(t_{n-1})$  та  $\varepsilon_{2s,y}(t_{n-1})$  – відносні деформації арматури, розміщеної відповідно вздовж осей X та Y на ділянці  $[t_{n-1}; t_n]$ .

Напруження у сталевібробетоні на ділянці  $[t_{n-1}; t_n]$  становитиме:

$$\sigma_{fb,x}(t_n) = \frac{\sigma_{sp,x}(t_n) \cdot A_{s,x1}}{l_x \cdot h}; \quad \sigma_{fb,y}(t_n) = \frac{\sigma_{sp,y}(t_n) \cdot A_{s,y1}}{l_y \cdot h}. \quad (6)$$

Значення відносних деформацій повзучості  $\varepsilon_{crp,2x}(t_{n-1})$ ,  $\varepsilon_{crp,2y}(t_{n-1})$ ,  $\varepsilon_{crp,2x}(t_n)$  та  $\varepsilon_{crp,2y}(t_n)$  визначаються при постійних напруженнях  $\sigma_{fb,x}(t_n)$  і  $\sigma_{fb,y}(t_n)$ .

Приріст деформацій на ділянці  $[t_{n-1}; t_n]$  дорівнюватиме:

$$\Delta\varepsilon_{crp,2x}(t_n) = \varepsilon_{crp,2x}(t_n) - \varepsilon_{crp,2x}(t_{n-1}); \quad \Delta\varepsilon_{crp,2y}(t_n) = \varepsilon_{crp,2y}(t_n) - \varepsilon_{crp,2y}(t_{n-1}). \quad (7)$$

Відносні деформації арматури в кінці цієї ділянки знаходять з рівнянь:

$$\varepsilon_{2s,x}(t_n) = \varepsilon_{2s,x}(t_{n-1}) - \Delta\varepsilon_{crp,2x}(t_n); \quad \varepsilon_{2s,y}(t_n) = \varepsilon_{2s,y}(t_{n-1}) - \Delta\varepsilon_{crp,2y}(t_n). \quad (8)$$

Відносні деформації повзучості на кінці ділянки  $[t_{n-1}; t_n]$  дорівнюють:

$$\varepsilon_{crp,2x}(t_n) = \varepsilon_{crp,2x}(t_{n-1}) + \Delta\varepsilon_{crp,2x}(t_n); \quad \varepsilon_{crp,2y}(t_n) = \varepsilon_{crp,2y}(t_{n-1}) + \Delta\varepsilon_{crp,2y}(t_n). \quad (9)$$

Отримані відношення (9) дають точки деформацій повзучості з координатами  $(t_n; \varepsilon_{crp,2x}(t_n))$  та  $(t_n; \varepsilon_{crp,2y}(t_n))$ .

Запропонований спосіб визначення пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості сталевібробетону можна подати у вигляді блок-схеми (рис. 1, 2).

Як вхідні дані приймаємо такі величини:  $R_{fb}$  – призмova міцність сталевібробетону у віці 28 діб;  $R_{fb,\tau}$  – те саме в момент передачі зусиль попереднього напруження на елемент;  $E_{fb,\tau}$  – модуль пружності сталевібробетону для часу  $\tau$ ;  $E_{s,x}$ ,  $E_{s,y}$ ,  $A_{s,x1}$ ,  $A_{s,y1}$  – відповідно модулі пружності та площі поперечного перерізу арматури, розміщених у напрямку осей X та Y;  $B$  – витрати води у бетонній суміші ( $\text{л}/\text{м}^3$ );  $\tau$  – вік сталевібробетону у момент відпуску арматури з упорів на сталевібробетон;  $l_x$ ,  $l_y$  – крок арматурних стрижнів, розміщених відповідно вздовж осей X та Y;  $h$  – товщина плити;  $\zeta_F$ ,  $\zeta_w$  – коефіцієнти, які враховують масштабний фактор і відносну вологість зовнішнього повітря;  $\varepsilon_{s,x}^0$ ;  $\varepsilon_{s,y}^0$  – відносні деформації арматури перед відпуском, розміщеної вздовж осей X та Y.

У першій частині блок-схеми (див. рис. 1) розраховують пружно-миттєві деформації попередньо напружених у двох напрямках сталевібробетонних плит  $\varepsilon_{2fb,x}$  та  $\varepsilon_{2fb,y}$ , а також деформації арматури після обтиску  $\varepsilon_{2s,x}$  та  $\varepsilon_{2s,y}$ . Потім визначаються відносні деформації повзучості попередньо напружених сталевібробетонних плит  $\varepsilon_{2fb,x}(t_n)$ ,  $\varepsilon_{2fb,y}(t_n)$  і відповідні їм деформації арматури  $\varepsilon_{2s,x}(t_n)$ ,  $\varepsilon_{2s,y}(t_n)$ . Розрахунок виконується покроково.

За запропонованою методикою розрахунку було визначено теоретичні дані втрат попереднього напруження та повзучості сталевібробетону при попередньому напруженні в двох напрямках. Порівняння експериментальних та теоретичних втрат для різних рівнів обтиску показало, що теоретичні криві з достатнім ступенем точності відповідають експериментальним кривим.

Розходження становить 10–12% і є результатом приблизного врахування вологісних умов лабораторії. У розрахунках прийнято постійне значення вологості повітря  $W=60\%$ .

Тобто можна стверджувати, що розроблена числова модель забезпечує достатню точність визначення втрат попереднього напруження.

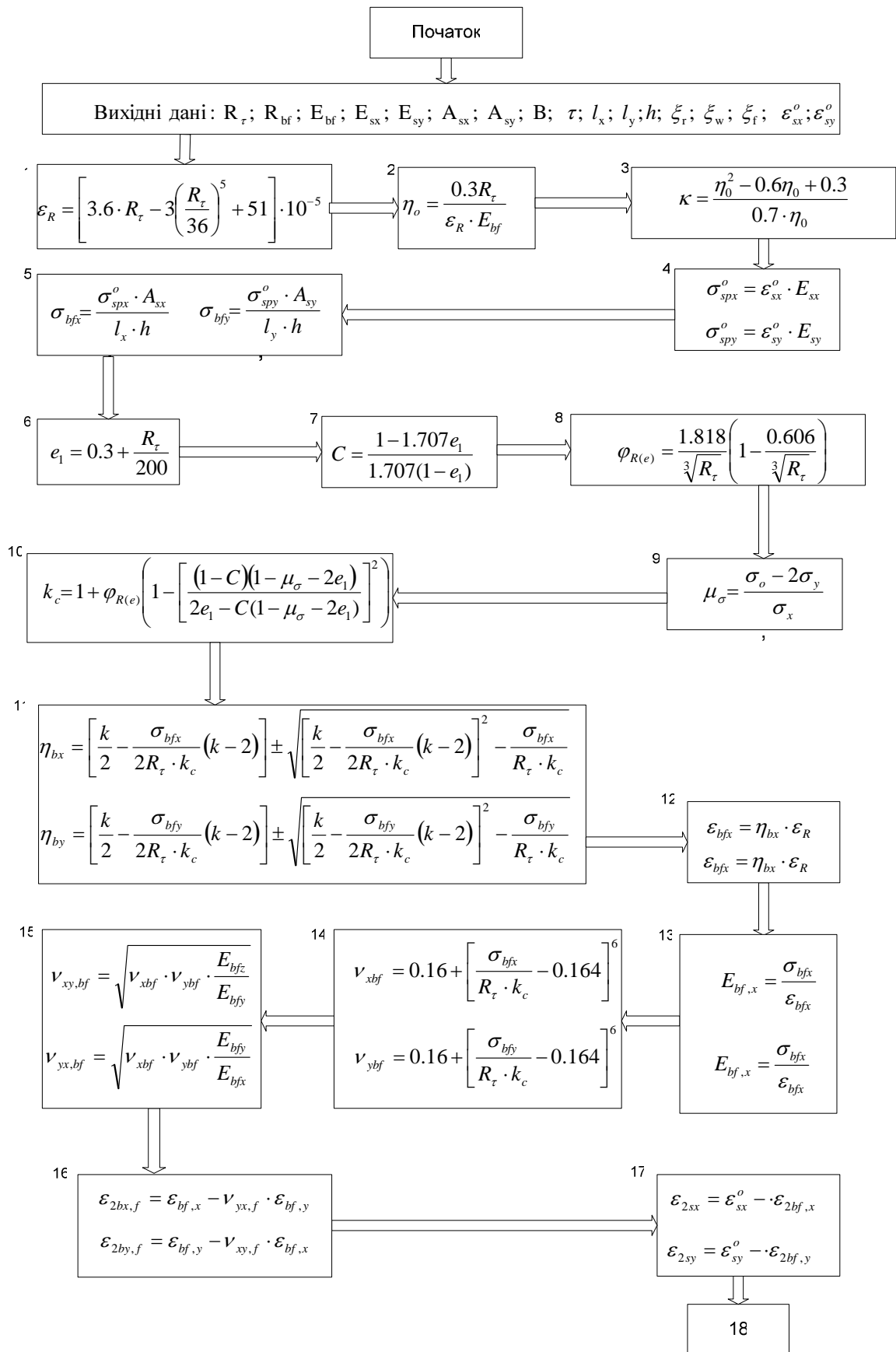


Рис. 1. Блок-схема визначення пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості двовісно попередньо напружених сталевіробетонних плит

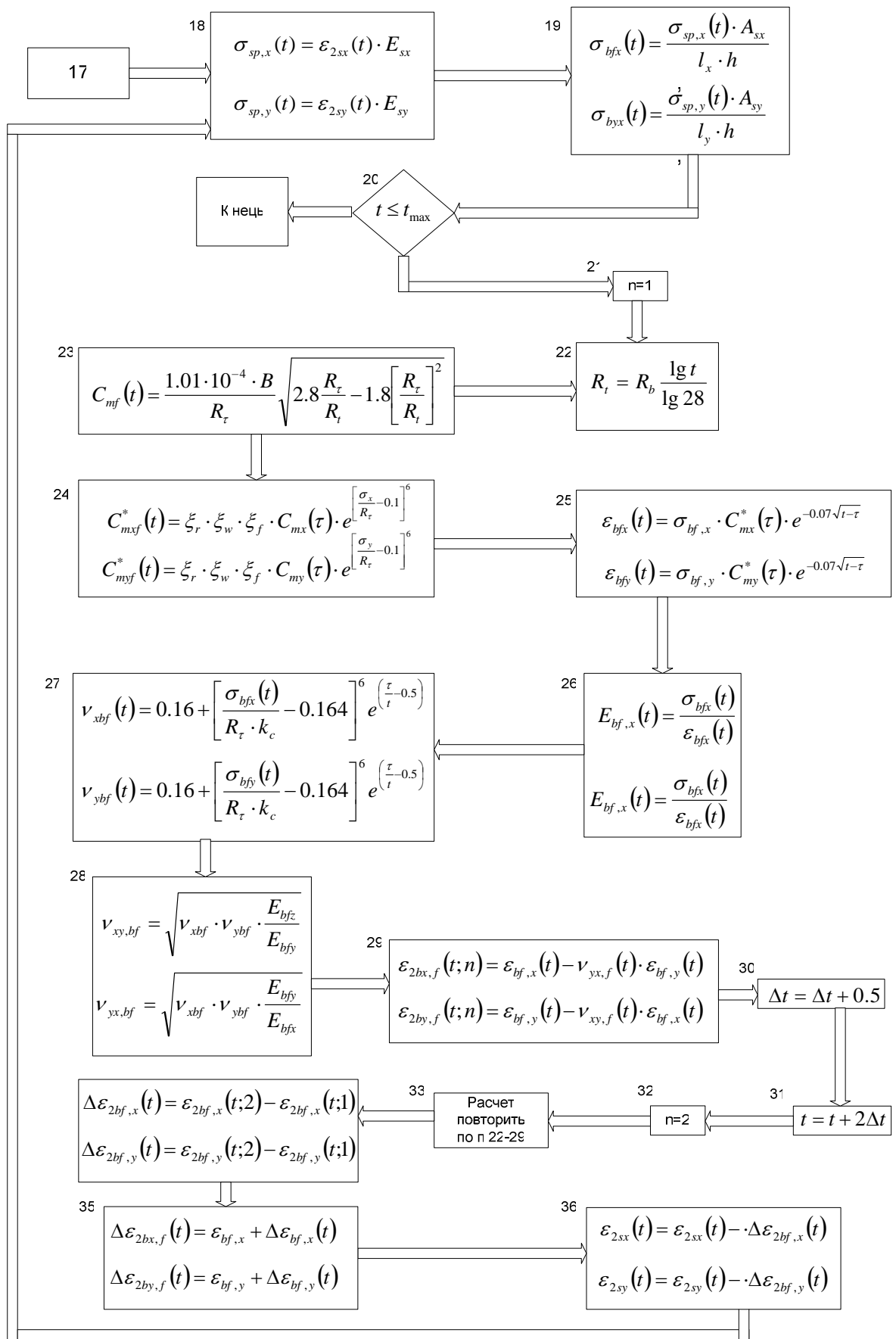


Рис. 2. Продолжения блок-схемы

Згідно із СНиП [9] втрати попереднього напруження від швидкоплинної повзучості бетону визначають:

$$\sigma_6 = 40 \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} \leq \alpha, \quad (10)$$

$$\sigma_6 = 40\alpha + 85\beta \left( \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} - \alpha \right) \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} > \alpha, \quad (11)$$

де  $R_{bp}$  – передавальна міцність бетону;  $\sigma_{bp}$  – стискувальні напруження у бетоні у стадії попереднього напруження;  $\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти, які визначають за формулами:

$$\alpha = 0.25 + 0.25R_{bp}, \quad \alpha \leq 0.8 \quad (12)$$

$$\beta = 5.25 - 0.185R_{bp} \quad 1.1 \leq \beta \leq 2.5 \quad (13)$$

$\sigma_{c,c}$ , МПа

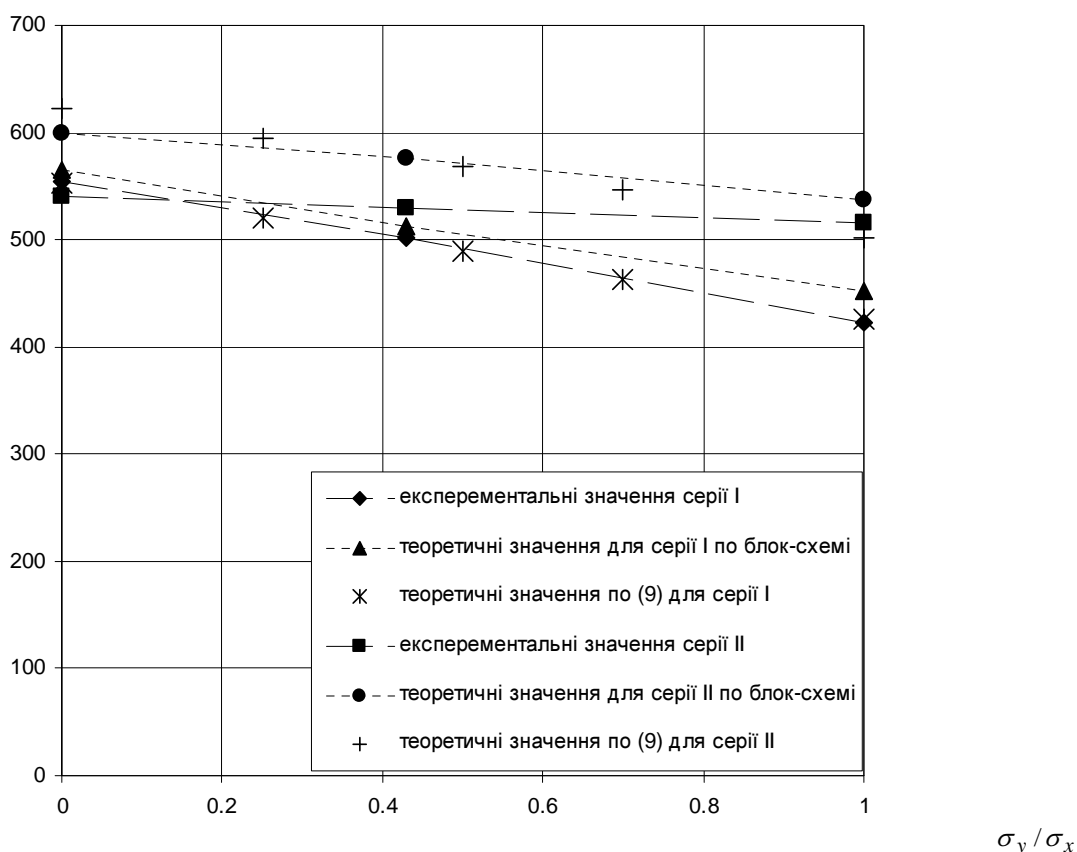


Рис. 3. Зміни втрат попереднього напруження у двовісно попередньо напружених сталевібробетонних плитах

Інші втрати попереднього напруження від повзучості бетону згідно з [14] :

$$\sigma_9 = 150\alpha \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}}, \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} \leq 0.75; \quad (14)$$

$$\sigma_9 = 300\alpha \left( \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} - 0.375 \right), \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} > 0.75, \quad (15)$$

де  $R_{bp}$  та  $\sigma_{bp}$  – те саме, що і в (10) і (11);  $\alpha = 1$  – для бетону природного твердіння;  $\alpha = 0.85$  – для бетону, який був термічно оброблений.

Загальні втрати попереднього напруження від повзучості бетону при одновісному стиску визначають за формулою:

$$\sigma_{c,c} = \sigma_6 + \sigma_9. \quad (16)$$

У СП 52-104-2006 [10] втрати від повзучості сталевібробетону  $\sigma_6$  визначають за формулою:

$$\sigma_6 = \frac{0.8 \cdot \alpha \cdot \varphi_{b,cr} \cdot \sigma_{fbp}}{1 + \alpha \cdot \mu \left( 1 + \frac{e_{op} \cdot y_s^2 \cdot A_{red}}{I_{red}} \right) (1 + 0.8 \cdot \varphi_{b,cr})}, \quad (17)$$

де  $\varphi_{b,cr}$  – коефіцієнт повзучості бетону-матриці, який приймається за п.5.1.14 [10];  $\sigma_{fbp}$  – напруження в сталевібробетоні на рівні центра ваги поперечного перерізу арматури, яку напружують;  $e_{op}$  – ексцентриситет зусилля  $P$  відносно центра ваги приведенного поперечного перерізу;  $A_{red}$  і  $I_{red}$  – відповідно площа приведенного перерізу елемента та її момент інерції відносно центра ваги приведенного перерізу;  $\mu$  – коефіцієнт армування;  $\alpha = E_s / E_{fb}$  – коефіцієнт приведення арматури до сталевібробетону.

Проведений розрахунок за СНиП показав істотне розходження з отриманими експериментальними даними; різниця становила більше 5 разів, за СП 52–104–2006 розходження становило 1,25...1,5 раза.

Тому пропонуємо визначати втрати від повзучості сталевібробетону при двовісному попередньому напруженні за [10] за такою формулою

$$\sigma_{c,c} = \sigma_6 \cdot k_{c,c} \cdot k_{fb}, \quad (9)$$

де  $\sigma_6$  – втрати від повзучості сталевібробетону, обчислені за формулою (8);  $k_{c,c}$  – коефіцієнт, який враховує зменшення втрат попереднього напруження від повзучості при двовісному стиску;  $k_{fb}$  – коефіцієнт, який враховує наявність у бетонній матриці фібрового армування.

На рис. 3 показано графіки зміни  $\sigma_{c,c}$  залежно від  $\sigma_y / \sigma_x$  для різних рівнів обтиску, отримані за допомогою експерименту. Як видно, цю залежність можна чітко апроксимувати сімейством прямих.

У першому наближенні аналітичне значення коефіцієнта  $k_{c,c}$  пропонується визначати (8):

$$k_{c,c} = 1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \cdot 0.23, \quad (10)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – стискувальні напруження у бетоні, які діють відповідно у напрямку осей X та Y ( $\sigma_x \geq \sigma_y$ ).

Значення  $k_{fb}$  пропонується приймати залежно від фібрового армування:

– для першої серії (0,5% STAFIB 30/0.6 та 0,5% STAFIB 50/1.0) –  $k_{fb} = 1,27$ .

– для другої серії (1,0% NOVOKON URW 50/1.0) –  $k_{fb} = 1,48$ .

Отже, використовуючи як вихідні дані рівняння втрат попереднього напруження, викладені у СП [10], та як множник коефіцієнти  $k_{c,c}$ ,  $k_{fb}$ , можна оцінювати втрати попереднього напруження за проектування конструкцій з сталевібробетону, які сприймають попередній обтиск у двох напрямках.

1. Бердичевский Г.И., Светов А.А., Курбатов Л.Г. Сталевібробетонные преднапряженные ребристые плиты размером бх3 м для покрытий // Бетон и железобетон. – 1984. – №4. – С.33–34.
2. Лысенко Е.Ф., Гетун Г.В. Проектирование сталевібробетонных конструкций: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО, 1989. – 184с.
3. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкция: Монография – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560с.
4. Сакварелидзе А.В. Прочностные и деформационные свойства сталевібробетона // Бетон и железобетон. – 1985. – №11. – С.12–13.
5. Миловидов К.И., Мишуков Н.Е. Рациональные области применения фибробетона в конструкциях // Бетон и железобетон, – 1980. – №5. – С.29–30.
6. Горобець А.М., Журавський О.Д. Методика експериментальних досліджень повзучості сталевібробетону при одноосному і двоосному стиску. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наук. праць / За ред. Й.Й. Лучка. – Львів. – 2005. – Вип.6. – С.305–310.
7. Горобець А.М., Журавський О.Д. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану сталевібробетона при одноосному і двоосному сжатии // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: Збірник наук. праць: Багаті споруди: матеріали, конструкції, технології. Макіївка, 2005. – Вип.2005-8(56). – С.137–141.
8. Журавський О.Д. Напружено-деформоване стану железобетонных плит при двоосном предварительном обжатии.: Дис. ... канд. техн. наук. Киев. 1988. – 158с.
9. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции // Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.-79с.
10. СП 52-104-2006 Сталевібробетонные конструкции. – М.,2006. – 79с.
11. Victor C. Li Large Volume, High-Performance Application of Fiber in Civil Engineering // Journal of Applied Polymer Science, Vol. 83, p.660–686 – 2002.
12. Hartman T. Steel Fiber Reinforced Concrete. Thesis. Stockholm. 1999. – 42p.