

УДК 624.046.5: 69.059.2: 699.88

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261021.41.799

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ВУДА В ПК «ЛІРА САПР»

ДМИТРЕНКО Є. А.^{1*}, канд. техн. наук, ст. виклад., наук. співроб.,

ГЕНЗЕРСЬКИЙ Ю. В.², канд. техн. наук,

ЯКОВЕНКО І. А.³, докт. техн. наук, доц.,

БАКУЛІН Є. А.⁴, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра будівництва, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, 03041, Київ, Україна, +38 (095) 874-73-68, e-mail: zdmirenko26@gmail.com; ТОВ «ЛІРА САПР», пров. Киянівський, 7-а, 04053, Київ, Україна, +38 (044) 590-58-86, ORCID ID: 0000-0001-9737-943X

² ТОВ «ЛІРА САПР», пров. Киянівський, 7-а, 04053, Київ, Україна, +38 (095) 280-53-15, e-mail: yvg@liraland.com.ua, ORCID ID: 0000-0001-6834-4203

³ Кафедра будівництва, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, 03041, Київ, Україна, +38 (067) 328-75-16, e-mail: i2103@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4256-9855

⁴ Кафедра будівництва, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, 03041, Київ, Україна, +38 (067) 328-75-16, e-mail: bakulin959@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0238-5384

Анотація. Постановка проблеми. Розглянуто проблему реалізації методики розрахунку міцності залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами за дії плоского згину, яка встановлена у діючих нормативних документах України. Основну увагу приділено нетиповим і практично не розглянутим розрахунковим випадкам, характерним для автоматизованих алгоритмів у середовищі ПК «ЛІРА САПР». **Мета роботи** – аналіз доцільності використання методики діючих нормативних документів із подальшим розробленням рекомендацій, виходячи із специфіки комп'ютеризованих розрахунків. **Методика.** У межах виконаного дослідження розглянуто прямокутні перерізи залізобетонних конструкцій з одиночним та подвійним армуванням (за умови значного збільшення площі арматури стиснутої зони перерізу) із варіюванням класів бетону, коефіцієнта армування та співвідношення площ армування. Діаграми «напруження-деформації» бетону та арматури прийняті дволінійні із характерними значеннями, встановленими для граничних станів першої групи. Досліджено характер зміни діаграм стану перерізів « $M - \varepsilon_{c1}$ ». **Результати досліджень.** Виявлено, що для одиночно армованих перерізів за зменшення площі армування характерне зменшення значення деформації стиснутої грані бетону, яке використовується для пошуку розв'язання систем нелінійних рівнянь рівноваги деформаційного методу. Це викликає збільшення часу виконання розрахунків армування площинних елементів методом Вуда. Встановлено, що для перерізів із подвійним армуванням за відносно великих значень співвідношень площ армування рівновага перерізу знаходиться при максимальних деформаціях стиснутої фібри бетону. **Висновки.** Запропонований підхід, спрямований на прискорення розрахунку перерізів з одиночним армуванням, який базується на використанні залежності між відсотком (площею) армування і деформацією найбільш стиснутої грані залізобетонної конструкції. Особливості аналітичних алгоритмів розрахунку обраних перерізів враховані шляхом реалізації цієї методики у ПК «ЛІРА САПР», оптимізації та прискорення автоматизованих алгоритмів розрахунку залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: залізобетонні конструкції; нелінійна-деформаційна модель; плоский згин; нормальний переріз; метод Вуда; білінійна діаграма «напруження-деформації»; ітераційні методи

DETAILS OF NORMAL SECTIONS STRENGTH CALCULATION OF FLEXIBLE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY THE WOOD'S METHOD IN PC "LIRA SAPR"

DMYTRENKO Ye.A.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Sen. Lect., Scient. Employee,

HENZERSKYI Yu.V.², Cand. Sc. (Tech.),

YAKOVENKO I.A.³, Doct. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

BAKULIN Ye.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oboroni Str., 03041, Kyiv, Ukraine, +38 (095) 874-73-68, e-mail: zdmittrenko26@gmail.com; LLC "LIRA SAPR", 7-a, Kiyaniivskiy Str., 04053, Kyiv, Ukraine, +38 (044) 590-58-86, ORCID ID: 0000-0001-9737-943X

² LLC "LIRA SAPR", 7-a, Kiyaniivskiy Str., 04053, Kyiv, Ukraine, +38 (095) 280-53-15, e-mail: yvg@liraland.com.ua, ORCID ID: 0000-0001-6834-4203

³ Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oboroni Str., 03041, Kyiv, Ukraine, +38 (067) 328-75-16, e-mail: i2103@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4256-9855

⁴ Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oboroni Str., 03041, Kyiv, Ukraine, +38 (067) 328-75-16, e-mail: bakulin959@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0238-5384

Abstract. Problem statement. The problem of realization of the calculation method of normal cross-sections strength of reinforced concrete constructions under flat bending, which is established in the current building codes of Ukraine, is considered. The main attention is paid to atypical and practically not considered calculation cases, typical for automated algorithms in the environment of SP "LIRA SAPR". **The purpose of the article.** Analysis of the feasibility of using the calculation method of current building codes with further development of recommendations, based on the specifics of computerized calculations. **Methodology.** Within the framework of the performed research, rectangular cross-sections of reinforced concrete structures with single and double reinforcement (provided a significant increase in the area of reinforcement of the compressed cross-sectional area) with variation of concrete classes, reinforcement coefficient and ratio of reinforcement areas were considered. The stress-strain diagrams of concrete and reinforcement are bilinear with characteristic values set for the first group of limit states. The character of change of cross-sections' status diagrams " $M - \varepsilon_{c(1)}$ " is investigated. **Research results.** It is found that for single-reinforced sections with decreasing reinforcement area there is a decrease of the value of deformation of the compressed fiber of concrete, which is used to find solutions for systems of nonlinear equilibrium equations of the deformation method. This leads to an increase of the execution time of calculations of the flat elements' reinforcement by the Wood method. It is established that for sections with double reinforcement at relatively large values of the ratios of the reinforcement areas, the equilibrium of the section is at the maximum deformations of the compressed concrete fiber. **Conclusions.** An approach aimed at accelerating the calculation of sections with single reinforcement, which is based on the use of the relationship between the percentage (area) of reinforcement and the deformation of the most compressed fiber of the reinforced concrete element. Features of analytical algorithms for calculating the selected sections are taken into account by implementing this technique in the PC "LIRA SAPR", optimization and acceleration of automated algorithms for calculating reinforced concrete structures.

Keywords: wood method; nonlinear deformation model; flat bending; normal cross-section; bilinear stress-strain diagram; iterative methods; reinforced concrete

Постановка проблеми. Відповідно до діючих будівельних норм України у сфері проектування залізобетонних конструкцій [1; 2] нормальні перерізи розраховуються за граничними станами першої і другої групи із застосуванням деформаційного методу. З одного боку, у цих нормах чітко наведені вихідні передумови, загальна методика вирішення систем нелінійних рівнянь рівноваги із використанням персональних комп'ютерів, що є характерною особливістю даного методу. Але, з іншого боку, недостатньо повно розкриті особливості застосування цієї методики та деформаційного методу у ряді розрахункових випадків, які невідворотно зустрічаються за їх комп'ютерної реалізації у складі сучасних програмних комплексів, зокрема, у ПК «ЛІРА САПР» [3].

Це стосується як реалізації розрахунків нормальних перерізів стрижневих елементів (при плоскому НДС), так і площинних

елементів методом Вуда [4]. Так, практично не розглянуті випадки напружено-деформованого стану (НДС) нормальних перерізів за позацентрового розтягу, зокрема, у випадку дії малих ексцентриситетів [5; 6]. Те саме стосується НДС плоского згину для одиночно армованих нормальних перерізів із відносно невеликою площею розтягнутої арматури і перерізів із подвійною арматурою за умови значного перебільшення площі стиснутої арматури над розтягнутою.

Аналіз публікацій. У практичних посібниках до діючих норм, зокрема, в [7; 8], вищезазначені питання також недостатньо висвітлені, переважно через те, що в них розглядаються розрахунки відносно типових випадків армування конструкцій, які зустрічаються у практиці проектування і характеризуються інженерною доцільністю та дотриманням конструктивних вимог. Досить цікавий

підхід до визначення параметрів НДС залізобетонних конструкцій, який базується на теорії складених стрижнів [9].

Необхідно також враховувати ефект порушення суцільності [10; 11], який виникає в залізобетонних конструкціях після появи тріщин. Тому числові дослідження, направлені на створення та удосконалення комп'ютеризованих алгоритмів, мають працювати та видавати коректний результат не лише у таких випадках [12], а й у випадках частіше нетипових і навіть нераціональних з інженерної точки зору.

Наприклад, позначені ситуації виникають під час багаторазового оцінювання несної здатності перерізу із проміжним армуванням на етапі розрахунку n -ї комбінації розрахункових сполучень навантажень (РСН) чи зусиль (РСЗ), які мають місце за конструювання перерізів залізобетонних елементів багаторазово статично невизначених розрахункових схем у ПК «ЛІРА САПР» [3].

Мета статті – аналіз доцільності використання розрахункової методики ДБН/ДСТУ [1; 2] при плоскому згині у вищезазначених розрахункових ситуаціях та схемах армування шляхом розроблення практичних рекомендацій, виходячи із специфіки автоматизованих розрахунків.

Виклад матеріалу. Дослідження здійснювалося на прямокутному залізобетонному нормальному перерізі фрагмента плити, яка містить одиночне та подвійне армування стрижневою арматурою

(рис. 1). Бетон конструкції – важкий, клас повздовжньої робочої арматури – А400С. При цьому змінними виступали такі параметри: відсоток армування ρ , класи важкого бетону C , співвідношення між площами армування (актуально для перерізів із подвійним армуванням).

Наведений тип перерізу обрано через широке застосування в моделюванні як стрижневих, так і плитних (оболончастих) типів скінчених елементів. Із таких типів скінчених елементів складаються розрахункові моделі будівель та споруд для виконання їх розрахунку у сучасних програмних комплексах (наприклад, сімейства ПК «ЛІРА САПР»).

Система нелінійних рівнянь рівноваги, яка описує роботу нормального залізобетонного перерізу при навантаженні (при трапецієвидній епюрі стиснутої зони) має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{b \cdot f_{cd}}{2 \cdot \chi} \cdot (2 \cdot \varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c3,cd}) + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{si} - N = 0, \\ \frac{b \cdot f_{cd}}{2 \cdot \chi^2} \cdot (3 \cdot \varepsilon_{c(1)} \cdot \varepsilon_{c3,cd} - 2 \cdot \varepsilon_{c3,cd}^2) + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{si} \cdot \frac{\varepsilon_{c(1)} - \chi \cdot z_{si}}{\chi} - M = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Позначення змінних, що входять у систему рівнянь (1), представлені у діючих нормах [2].

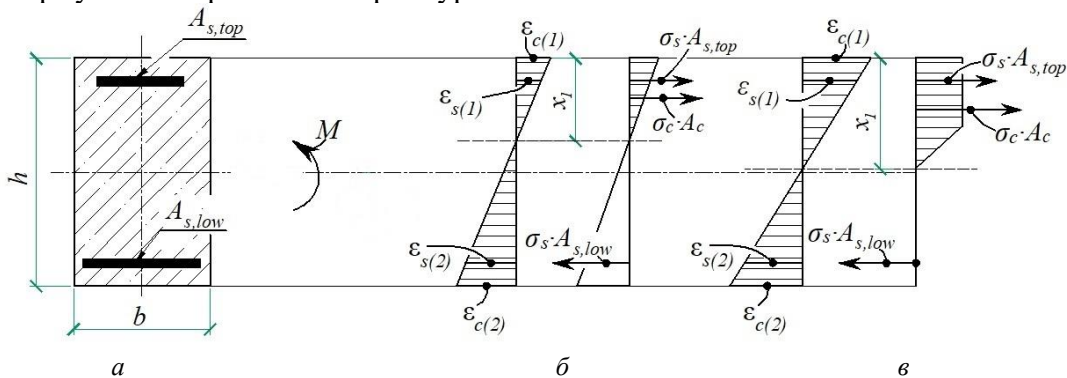


Рис. 1. Схема зусиль і розрахункові схеми напружень та деформацій у нормальному перерізі залізобетонної конструкції з подвійним армуванням при плоскому згині: а) поперечний переріз конструкції; б) при трикутній епюрі стиснутої зони бетону, в) при трапецієвидній епюрі стиснутої зони бетону

Розрахункові діаграми для бетону (рис. 2 а) та арматури (рис. 2 б) прийняті

білінійними з відповідними параметрами, вказаними у діючих нормах [1].

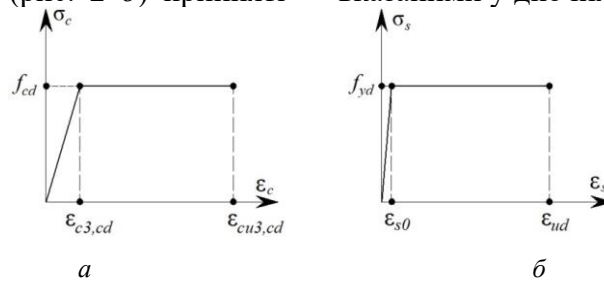


Рис. 2. Розрахункові діаграми стану матеріалів: а) для бетону; б) для арматури

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики та вихідні дані для розрахунку залізобетонного перерізу

Характеристики залізобетонного перерізу	Значення				
– висота перерізу – h , см	20				
– ширина перерізу – b , см	100				
– відстань від верхньої грані плити до осі арматури у верхній частині перерізу – $a_{s,top}$, см	3				
– відстань від нижньої грані плити до осі арматури у нижній частині перерізу – $a_{s,low}$, см	3				
– коефіцієнт приведення армування до бетону – α_s	7,407				
– класи важкого бетону	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	
<i>Переріз з одиночним армуванням</i>					
– площа повздовжньої робочої арматури у нижній частині перерізу – $A_{s,low}$, см ²	9,0	6,0	3,0	1,5	0,75
– відсоток армування, ρ , %	0,53	0,35	0,18	0,09	0,044
<i>Переріз з подвійним армуванням</i>					
– площа повздовжньої арматури у верхній частині перерізу – $A_{s,top}$, см ²	30	30	30	30	30
– площа повздовжньої арматури у нижній частині перерізу – $A_{s,low}$, см ²	5	3	2	1	0,5
– співвідношення площ арматур, $A_{s,top} / A_{s,low}$	6	10	15	30	60
– відсоток армування, ρ , %	2,06	1,94	1,89	1,82	1,79

Вихідні дані задачі наведені в таблиці 1.

Розв'язання системи рівнянь рівноваги виконувалось за методикою, представленою в додатку А, ДСТУ [2] для одного перерізу багаторазово шляхом пошуку рівноваги між зовнішніми зусиллями M та N і зусиллями, що виникають у бетоні та арматурі [5; 6]. Програмування та налагодження розрахункового алгоритму, аналіз та отримання результатів виконувалися у програмному комплексі «MathCAD 15».

Результати досліджень

Розглянуто два типи нормальних перерізів при плоскому згині:

- з одиночним армуванням;
- із подвійним армуванням (із концентрацією більшості площі арматури у стиснутій зоні).

Як вже зазначено вище, ці розрахункові випадки не типові й були обрані з точки зору перевірки надійності алгоритму

розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги при плоскому згині, запропонованого у додатку А, ДСТУ [2] у ситуаціях, що виникають за розрахунку в ПК «ЛІРА САПР».

Таким чином, досліджено ефект зменшення висоти стиснутої зони x_l прямокутного перерізу при зменшенні площі арматури розтягнутої зони $A_{s,low}$. На рисунку 3 показано діаграми стану « $M - \varepsilon_c(l)$ » для одиночно армованого нормального перерізу із змінюваними значеннями площі розтягнутої арматури.

На цих графіках відображена тенденція зменшення значення несної здатності перерізу при зменшенні площі армування. При цьому також виникає зменшення значення максимальної відносної деформації стиснутої фібри бетону $\varepsilon_{c(l)}$, за якої знаходиться рівновага між внутрішніми та зовнішніми зусиллями.

За деяких значень коефіцієнта армування ρ (менших за мінімальний, встановлений в нормах [1; 2]) рівновагу вже

не можна знайти при кроку $0,1 \cdot \epsilon_{cu}$ і для знаходження розв'язку системи (1) крок ітерацій потрібно зменшувати.

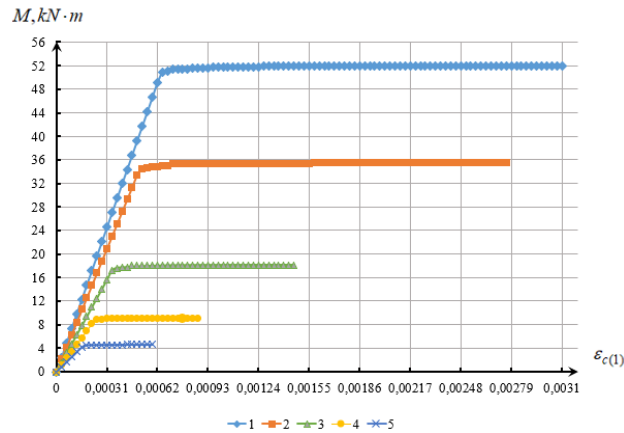


Рис. 3. Діаграми стану « $M - \epsilon_{c(1)}$ » дослідного одиночно армованого залізобетонного перерізу із площею нижньої арматури $A_{s,low}$, клас важкого бетону C20/25:
1 – 9 см²; 2 – 6 см²; 3 – 3 см²; 4 – 1,5 см²; 5 – 0,75 см²

НДС перерізу при цьому збігається з таким, що виникає за позacentрового розтягу з малими ексцентриситетами

(рис. 4), дослідження якого описані у праці [3].

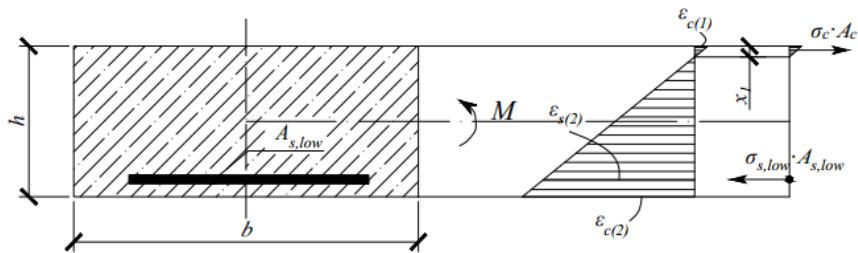


Рис. 4. Схема зусиль та форма рівноваги перерізу залізобетонної конструкції з одиночним армуванням

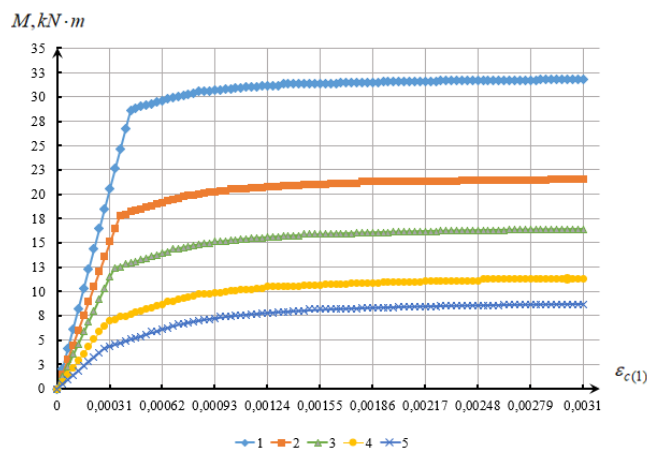


Рис. 5. Діаграми стану « $M - \epsilon_{c(1)}$ » дослідного залізобетонного перерізу з подвійним армуванням і площею верхньої та нижньої арматури $A_{s,top} / A_{s,low}$, клас бетону C20/25: 1 – 30/5 см²; 2 – 30/3 см²; 3 – 30/2 см²; 4 – 30/1 см²; 5 – 30/0,5 см²

Для залізобетонних перерізів із подвійним армуванням (за умови значного збільшення площі стиснутої арматури, ніж

розтягнутої), незважаючи на тенденцію зменшення висоти стиснутої зони і загальну подібність НДС перерізу порівняно з

попереднім, необхідність зменшення кроку ітерацій не була встановлена. Рівновага між внутрішніми та зовнішніми зусиллями знаходиться за значень $\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu}$ навіть за максимального співвідношення площ стиснутої арматури до розтягнутої (рис. 5).

При цьому відносно великий відсоток армування нормального перерізу плити (ρ_{max} склав 2,05 %) обраний з міркувань можливості задавання користувачем у ПК

«ЛІРА САПР» значень відсотка армування ρ , що значно перебільшують встановлені за [1; 2].

Розглянуті розрахункові випадки виникають під час визначення несної здатності перерізу або підбору арматури з метою визначення її найбільш оптимальної кількості. Отримані дані наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати числових розрахунків дослідних залізобетонних перерізів

Клас важкого бетону	Кривизна χ , $см^{-1}$	Деформації $\varepsilon_{c(1)}$ (рівновага)	Висота стиснутої зони перерізу, x , $см$	Напруження у верхньому армуванні, $\sigma_{s,top}$, $МПа$	Напруження у нижньому армуванні, $\sigma_{s,low}$, $МПа$	Несна здатність перерізу M_{int} , $кНм$	Площа арматури		ρ , %
							верхньої $A_{s,top}$, $см^2$	нижньої $A_{s,low}$, $см^2$	
Одиночне армування нормального залізобетонного перерізу									
C12/15	7,97E-04	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	4,18	—	-364,0	49,36	—	9,0	0,53
	1,19E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,79			34,32		6,0	0,35
	1,59E-03	$0,69 \cdot \varepsilon_{cu}$	1,45			17,86		3,0	0,18
	1,51E-03	$0,37 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,81			9,10		1,5	0,09
	1,47E-03	$0,22 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,5			4,59		0,75	0,044
C16/20	1,03E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	3,13	—	-364,0	51,01	—	9,0	0,53
	1,55E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,09			35,05		6,0	0,35
	1,53E-03	$0,54 \cdot \varepsilon_{cu}$	1,14			18,04		3,0	0,18
	1,50E-03	$0,31 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,67			9,14		1,5	0,09
	1,50E-03	$0,2 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,43			4,60		0,75	0,044
C20/25	1,23E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,52	—	-364,0	51,98	—	9,0	0,53
	1,62E-03	$0,89 \cdot \varepsilon_{cu}$	1,70			35,47		6,0	0,35
	1,52E-03	$0,47 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,96			18,14		3,0	0,18
	1,47E-03	$0,28 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,59			9,17		1,5	0,09
	1,46E-03	$0,19 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,40			4,60		0,75	0,044
C25/30	1,38E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,17	—	-364,0	52,52	—	9,0	0,53
	1,60E-03	$0,8 \cdot \varepsilon_{cu}$	1,5			35,71		6,0	0,35
	1,53E-03	$0,44 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,87			18,2		3,0	0,18
	1,46E-03	$0,27 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,55			9,18		1,5	0,09
	1,49E-03	$0,19 \cdot \varepsilon_{cu}$	0,38			4,60		0,75	0,044
Подвійне армування нормального залізобетонного перерізу									
C12/15	1,14E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,93	-15,82	-364,0	29,26	30	5	2,06
	1,17E-03		2,84	-37,80		19,04		3	1,94
	1,19E-03		2,78	-48,79		13,93		2	1,89
	1,21E-03		2,75	-59,77		8,82		1	1,82
	1,22E-03		2,73	-65,33		6,27		0,5	1,79
C16/20	1,14E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,83	-38,11	-364,0	30,54	30	5	2,06
	1,18E-03		2,74	-59,43		20,31		3	1,94
	1,19E-03		2,71	-70,09		15,19		2	1,89
	1,21E-03		2,67	-80,87		10,07		1	1,82
	1,22E-03		2,64	-86,32		7,51		0,5	1,79
C20/25	1,13E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,74	-58,44	-364,0	31,78	30	5	2,06
	1,17E-03		2,66	-79,13		21,53		3	1,94
	1,18E-03		2,62	-89,59		16,40		2	1,89
	1,20E-03		2,58	-100,05		11,27		1	1,82
	1,21E-03		2,57	-105,28		8,71		0,5	1,79
C25/30	1,12E-03	$1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$	2,67	-73,7	-364,0	32,77	30	5	2,06
	1,16E-03		2,59	-94,01		22,50		3	1,94
	1,16E-03		2,56	-104,3		17,36		2	1,89
	1,19E-03		2,52	-114,4		12,22		1	1,82
	1,2E-03		2,5	-119,6		9,65		0,5	1,79

Обрані розрахункові ситуації зумовлюють збільшення кількості ітерацій при підході, що передбачає пошук рівноваги за допомогою методу послідовних наближень, який починається із граничного значення деформації найбільш стиснутої фібри бетону ε_{cu} і направлений у бік зменшення, або якщо рівновага знаходиться за допомогою іншого ітераційного методу.

Із цих міркувань запропоновано таблицю відповідності граничних відсотків ρ і площ армування $A_{s,low}$ та відповідних їм

значень деформацій найбільш стиснутої грані $\varepsilon_{c(1)}$ для перерізу з одиночною арматурою (табл. 3).

Завдяки даним, наведеним у таблиці 3 та лінійній інтерполяції між значеннями площі $A_{s,low}$ чи відсотку нижнього армування ρ і відповідним значенням деформації найбільш стиснутої фібри бетону $\varepsilon_{c(1)}$, можна швидше встановити область пошуку рішення і таким чином прискорити процес розв'язання системи (1).

Таблиця 3

Граничні відсотки армування, площ арматури залізобетонних одиночно армованих перерізів та відповідні значення поздовжніх деформацій стиску бетону

Клас важкого бетону	Відстань від нижньої грані плити до осі арматури у нижній частині перерізу – $a_{s,low}$, см	$\varepsilon_{c(1)} = 1,0 \cdot \varepsilon_{cu}$		$\varepsilon_{c(1)} = 0,5 \cdot \varepsilon_{cu}$	
		Площа нижньої арматури $A_{s,low}$, см ²	Відсоток армування ρ , %	Площа нижньої арматури $A_{s,low}$, см ²	Відсоток армування ρ , %
C12/15	1,5	4,74	0,279	2,29	0,135
	2,0	4,59	0,27	2,24	0,132
	2,5	4,44	0,261	2,16	0,127
	3,0	4,31	0,254	2,11	0,124
C16/20	1,5	6,12	0,36	2,92	0,172
	2,0	5,93	0,349	2,86	0,168
	2,5	5,81	0,342	2,76	0,162
	3,0	5,65	0,332	2,70	0,159
C20/25	1,5	7,38	0,434	3,44	0,202
	2,0	7,16	0,421	3,36	0,198
	2,5	6,95	0,409	3,25	0,191
	3,0	6,76	0,398	3,18	0,187
C25/30	1,5	8,29	0,488	3,80	0,224
	2,0	8,05	0,474	3,71	0,218
	2,5	7,82	0,46	3,59	0,211
	3,0	7,60	0,447	3,50	0,206

Це набуває особливої актуальності у випадку розрахунку методом Вуда [4], згідно з яким виникає проблема збільшення тривалості його виконання через наявність більшої кількості розрахункових комбінацій зусиль порівняно із методикою проф. М. І. Карпенка [13].

Висновки. За допомогою аналізу виконаних числових розрахунків нормальних перерізів залізобетонних елементів за методикою діючих ДБН/ДСТУ згідно з методом Вуда при плоскому згині для дослідних перерізів встановлено, що:

– для одиночно армованих залізобетонних нормальних перерізів у разі

зменшення площі армування характерне зменшення значення деформації стиснутої грані бетону $\varepsilon_{c(1)}$, за якої знаходиться рівновага між внутрішніми і зовнішніми зусиллями. Це уповільнює швидкість виконання розрахунків системи рівнянь (1) ітераційними методами. У зв'язку з цим автори пропонують підхід, направлений на прискорення виконання розрахунку шляхом використання залежності між відсотком армування ρ або його площею $A_{s,low}$ і деформацією стиснутої грані $\varepsilon_{c(1)}$;

– для залізобетонних перерізів із подвійним армуванням необхідність зменшення кроку ітерацій, пов'язана із

зменшення значення деформації стиснутої грані бетону $\varepsilon_{c(1)}$, не встановлена. Розглянута нормативна методика продемонструвала працездатність та доцільність використання.

Запропонована методика реалізована у ПК «ЛІРА САПР» щодо оптимізації та

прискорення існуючих та створення нових автоматизованих алгоритмів розрахунку залізобетонних конструкцій будівель та інженерних споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний з 2011.07.01]. Київ : Мінрегіонбуд України, ДП «Укрархбудінформ», 2011. 71 с.
2. ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний з 2011.06.01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 118 с.
3. Varabash M. S. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. № 100. Pp. 164–171.
4. Shin Myoungsu, Allan Bommer, James B. Deaton, Bulent N. Alemdar. Twisting moments in two-way slab. *Concrete International*. 2009. Vol. 78. Pp. 35–40.
5. Dmytrenko Ye. A., Yakovenko I. A., Fesenko O. A. Strength of excentrically stretched reinforced concrete structures with small eccentricities by normal sections. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie rodowiska*. 2021. Vol. 30, iss. 3 (93). Pp. 76–80.
6. Яковенко І. А., Дмитренко Є. А., Фесенко О. А. Особливості розрахунку міцності нормальних перерізів позацентрово-розтягнутих залізобетонних конструкцій із малими ексцентриситетами. *Наука та будівництво*. Київ : НДІБК, 2020. Вип. 4 (26). С. 15–25.
7. Бабаєв В. М., Бамбура А. М., Пустовойтова О. М. та ін. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) за заг. ред. В. С. Шмуклера. Харків : Золоті сторінки, 2015. 208 с.
8. Войцехівський О. В., Журавський О. Д., Байда Д. М. Розрахунок залізобетонних конструкцій з використанням спрощених діаграм деформування матеріалів (за ДСТУ Б.В.2.6-156:2010). Ч. 1. Розрахунок за І групою граничних станів. Київ : КНУБА, 2017. 168 с.
9. Колчунов В. И., Яковенко И. А. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне. *Строительство и реконструкция*. Орел : ФГБОУ ВПО «Госуниверситет УНПК», 2011. № 6 (38). С. 16–23.
10. Колчунов В. И., Яковенко И. А. Об учете эффекта нарушения сплошности в железобетоне при проектировании реконструкции предприятий текстильной промышленности. *Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 3 (363). С. 258–263.
11. Гольшев А. Б., Колчунов В. И., Яковенко И. А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях : монография. Київ : «Талком», 2015. 371 с.
12. Дмитренко Є. А., Яковенко І. А. Чисельне моделювання моменту утворення тріщин у залізобетонних конструкціях із застосуванням ПК «САПФІР». Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2021. Вип. 39. С. 74–83.
13. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. Москва : Стройиздат, 1996. 416 с.

REFERENCES

1. DBN V.2.6-98:2009. *Betonna ta zalizobetonny konstrukciyi. Osnovni polozhennya* [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. [Chynni 2011.07.01]. Kyiv : Minregionbud Ukrainy, Derjavne pidpriemstvo «Ukrarhbudinform», 2011. 71 p. (in Ukrainian).
2. DSTU B.V.2.6-156:2010. *Betonna ta zalizobetonny konstrukciyi z vajkogo betonu. Pravila proektuvanya* [Concrete and reinforced concrete structures from heavy concrete. Design rules]. [Chynni 2011.06.01]. Kyiv : Minregionbud Ukrainy, 2011, 118 p. (in Ukrainian).
3. Varabash M.S. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018, no. 100, pp. 164–171.
4. Shin Myoungsu, Allan Bommer, James B. Deaton and Bulent N. Alemdar. Twisting moments in two-way slab. *Concrete International*. 2009, no. 78, pp. 35–40.
5. Dmytrenko Ye.A., Yakovenko I.A. and Fesenko O.A. Strength of excentrically stretched reinforced concrete structures with small eccentricities by normal sections. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie rodowiska*. 2021, no. 30, iss. 3 (93), pp. 76–80.
6. Yakovenko I.A., Dmytrenko Ye.A. and Fesenko O.A. *Osoblyvosti rozrakhunku mitsnosti normalnykh pereriziv pozatsentrovo-roztiahnutykh zalizobetonnykh konstrukttsii iz malymy ekstsentrysytetamy* [Details of strength calculation of

normal cross sections of eccentrically tensioned reinforced concrete structures with small eccentricities]. *Nauka ta budivnytstvo* [Science and Construction]. Kyiv : NDIBK, 2020, no. 4 (26), pp. 15–25. (in Ukrainian)

7. Babaiev V.M., Bambura A.M., Pustovoitova O.M. and oth. *Praktychnyi rozrakhunok elementiv zalizobetonnykh konstruksii za DBN V.2.6-98:2009 u porivnianni z rozrakhunkamy za SNyP 2.03.01-84* i EN 1992-1-1 (Eurocode 2) za zah. red. V.S. Shmucklera* [Practical calculation of elements of reinforced concrete structures according to DBN V.2.6-98:2009 in comparison with calculations according to SNiP 2.03.01-84* and EN 1992-1-1 (Eurocode 2) for general ed. V.S. Schmuckler]. Kharkiv : Zoloti Storinky Publ., 2015, 208 p. (in Ukrainian).

8. Voitsekhivskiy O.V., Zhuravskiy O.D. and Baida D.M. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstruksii z vykorystanniam sproshchenykh diahram deformuvannia materialiv (za DSTU B.V.2.6-156:2010). Chastyna 1. Rozrakhunok za I hrupoiu hranychnykh staniv* [Calculation of reinforced concrete structures using simplified diagrams of deformation of materials (according to DSTU BV.2.6-156: 2010). Part 1. Calculation of the I group of limit states]. Kyiv : KNUBA, 2017, 168 p. (in Ukrainian).

9. Kolchunov V.I. and Yakovenko I.A. *Ob ispol'zovanii gipotezy ploskih sechenij v zhelezobetone* [On the use of the hypothesis of flat sections in reinforced concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija* [Construction and Reconstruction]. Orel : FGBOU VPO "Gosuniversitet UNPK", 2011, no. 6 (38), pp. 16–23. (in Russian)

10. Kolchunov V.I. and Yakovenko I.A. *Ob uchete jeffekta narusheniya sploshnosti v zhelezobetone pri proektirovanii rekonstrukcii predpriyatij tekstil'noj promyshlennosti* [Taking into account the effect of discontinuity in reinforced concrete when designing the reconstruction of textile industry enterprises]. *Izvestiya VUZov. Tehnologiya tekstil'noj promyshlennosti* [Izvestiya VUZov. Textile Technology]. 2016, no. 3 (363), pp. 258–263. (in Russian)

11. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. and Yakovenko I.A. *Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruksij, zdaniy i sooruzhenij, vozvodimyyh v slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh uslovijah : monografija* [Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in difficult engineering and geological conditions : monograph]. Kyiv : "Talkom", 2015, 371 p. (in Russian)

12. Dmytrenko Ye.A. and Yakovenko I.A. *Chyselne modelyuvannya momentu utvorenniya trishhyn u zalizobetonnykh konstruksiyah iz zastosuvannyam PK «SAPFIR»* [Numerical modeling of the moment of crack formation in reinforced concrete structures using PC "SAPPHIRE"]. *Resursoekonomni materialy, konstruksiyi, budivli ta sporudy : zb. nauk. pracz* [Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures : coll. science. wash]. Rivne : NUVGP, 2021, no. 39, pp. 74–83. (in Ukrainian)

13. Karpenko N.Yu. *Obshchye modely mekhanyky zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow : Stroiyzdat Publ., 1996, 416 p. (in Russian)

Надійшла до редакції : 05.10.2021.