

П. І. Вегера, Р. О. Ткач, З. З. Бліхарський, Р. Є. Хміль
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра будівельних конструкцій та мостів

ЗАСТОСУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

© Вегера П. І., Ткач Р. О., Бліхарський З. З., Хміль Р. Є., 2016

Пріоритетною задачею для дослідників будівельних конструкцій є вдосконалення методів розрахунку, які б підвищували точність розрахунку, з збереженням надійності конструкції. Особливо це стосується розрахунку похилих перерізів залізобетонних балок, зважаючи на їх різке, раптове і крихке руйнування та складний напружено-деформований стан. Результатами вдосконалення методів розрахунку будуть економія матеріалів при проектуванні залізобетонних конструкцій та ефективніше використання усіх елементів, з яких складається конструкції. Запропоновано вдосконалену методику розрахунку похилих перерізів залізобетонних конструкцій, в яких наявне та відсутнє поперечне армування, а також їх апробація на аналогічних експериментальних зразках інших дослідників. Статистична апробація цих залежностей розрахунку покаже їх збіжність з експериментальними даними та надасть передумови для їх використання у разі проектування чи оцінювання напружено-деформованого стану похилих перерізів залізобетонних конструкцій. Така перевірка показала вищу збіжність ніж методика розрахунку за чинними нормами. Було вибрано 16 дослідних зразків, руйнування в яких відбувалось за схемою руйнування по поперечні силі. За результатами теоретичних досліджень встановлено що розбіжність між розрахунком за чинними нормами і експериментом становить понад 49,4 % у бік заниження теоретичних результатів, що є значною розбіжністю. Вдосконалена методика розрахунку показала значно кращу збіжність. Заниження теоретичних результатів не більше ніж 23 %, лише в одному випадку воно становило 33 %.

Ключові слова: залізобетонна балка, похилі перерізи, методика.

The priority task for researchers of building structures is developing methods of calculation, which would allow performing constructions calculations with higher accuracy, preserving the reliability of the design. This especially concerns of calculation inclined cross sections of reinforced concrete beams given their sharp, sudden and brittle fracture and difficult stress strain state. Improving methods for calculating will provide the lower expense of materials when designing reinforced concrete structures and allow more efficient using all elements that make the construction. In this paper an improved methodology for calculating inclined cross sections of concrete structures where transverse reinforcement existent or no, and its testing on similar experimental samples of other researchers is proposed. Statistical testing data of calculation relationships shows their convergence with experimental data and provides conditions for their application at designing or assessment of stress-strain state of inclined cross sections of reinforced concrete constructions. Such verification is showed higher convergence than method of calculation according to current norms. It was selected 16 test samples, which destruction was according to the scheme for shear force. According to the results of theoretical researches it was determined that the discrepancy between the calculations for existing norms and the experiment is over 49,4 %, aside lowering the theoretical results, which is a significant divergence. Improved calculation method showed significantly better convergence. Underreporting theoretical results is not more than 23 %, only one case is 33 %

Key words: reinforced concrete beam, inclined cross sections, methodology.

Вступ. Дослідження несучої здатності залізобетонних балок на поперечну силу є важливим питанням через складний напружено-деформований стан. У нормах [1, 2] розраховано такі конструкції із значними запасом міцності, що призводить до зайвої перевитрати матеріалів.. Розроблення та впровадження залежностей, які б реально оцінювали несучу здатність залізобетонних балок на дію поперечної сили, вважаємо, є важливим завданням для науковців. В основу поданих експериментально-теоретичних досліджень покладено існуючу методику розрахунку чинних норм [2].

Огляд наукових джерел і публікацій. З розвитком методів розрахунку та введенням в дію деформаційної моделі розрахунку залізобетонних елементів [1–2] дослідження несучої здатності набули нової актуальності. Дуже мало проведено досліджень несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених різними композитними матеріалами. В одній з таких робіт [4] викладено дослідження несучої здатності залізобетонних балок прямокутного перерізу на дію поперечної сили з та без зовнішнього армування. Загалом в роботі представлено результати експериментальних досліджень 16 балок, з яких 1 контрольна – випробувана без підсилення. Геометричні характеристики дослідних зразків наведено на рис. 1.

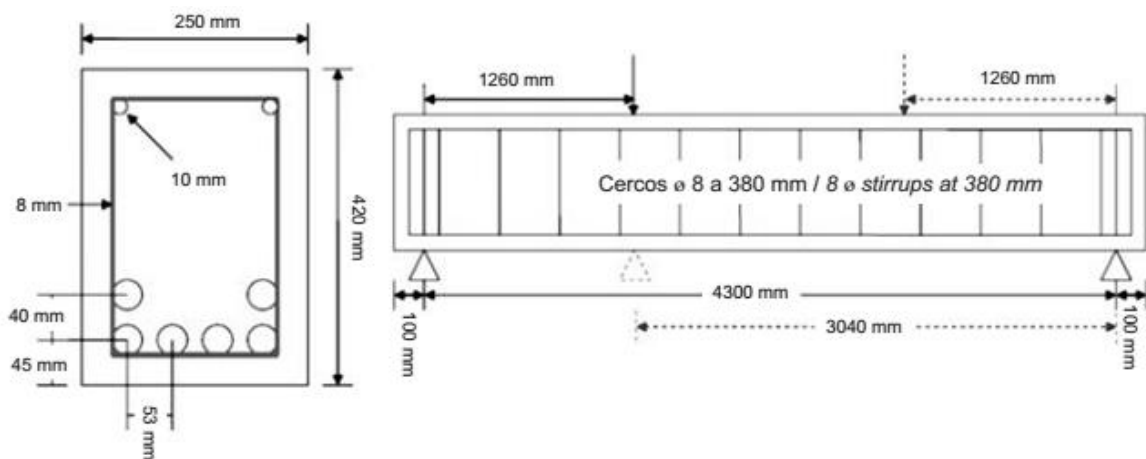


Рис. 1. Армування та розміри дослідного зразка [4]

Балки досліджували на несучу здатність похилих перерізів при руйнуванні за пріоритетної дії поперечної сили. Аналогічні дослідження виконано для залізобетонних балок таврового поперечного перерізу [6]. Балки досліджували на несучу здатність похилих перерізів за відносного прольоту зрізу 2,5 та 3. Результати показали високу незбіжність між експериментальними та теоретичними даними – понад 35 %. Результати дослідження таврових балок без поперечної арматури наведено в статті [7]. Загалом провели 6 випробувань, в яких змінним параметром був відносний проліт зрізу a/d , який приймався 1.5, 2.5, 3.5. Геометричні характеристики та робоче армування наведено на рис. 2. Таким чином визначали вплив геометричних розмірів таврового елемента на несучу здатність похилого перерізу за різного прольоту зрізу.

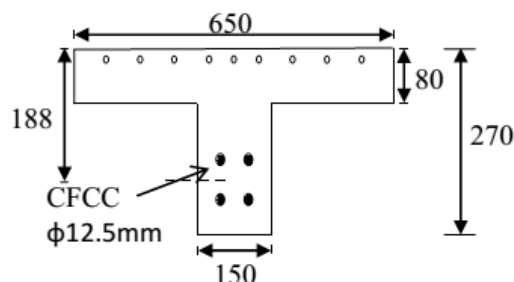


Рис.2. Геометричні характеристики дослідних зразків [7]

Окремі дослідження балок прямокутного перерізу проводили також за різного робочого армування та відносного прольоту зрізу [8]. Поперечна арматура була наявна, проте з великим кроком, оскільки подальші дослідження передбачали підсилення балок зовнішньою арматурою. Навантаження прикладались в 1/4 прольоту (рис. 3).

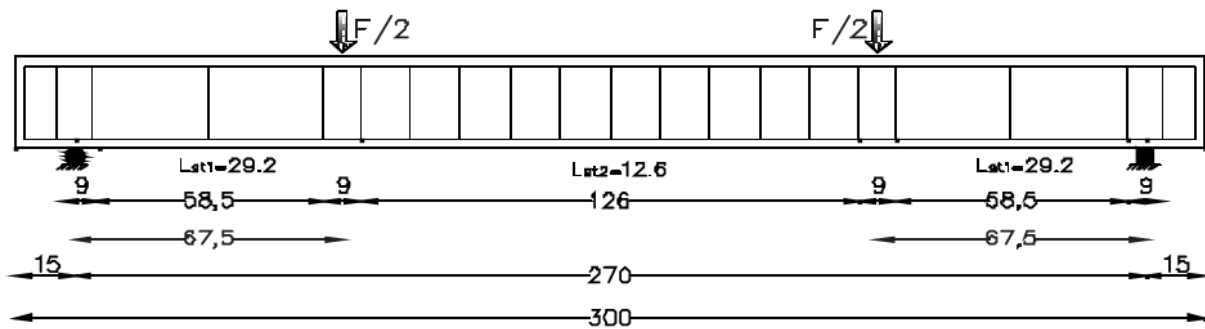


Рис. 3. Геометричні характеристики залізобетонної балки T01 [8]

Автори [9] досліджували несучу здатність залізобетонних балок на поперечну силу, коли навантаження прикладали у вигляді однієї сили, прикладеної по центру балки (рис. 4).

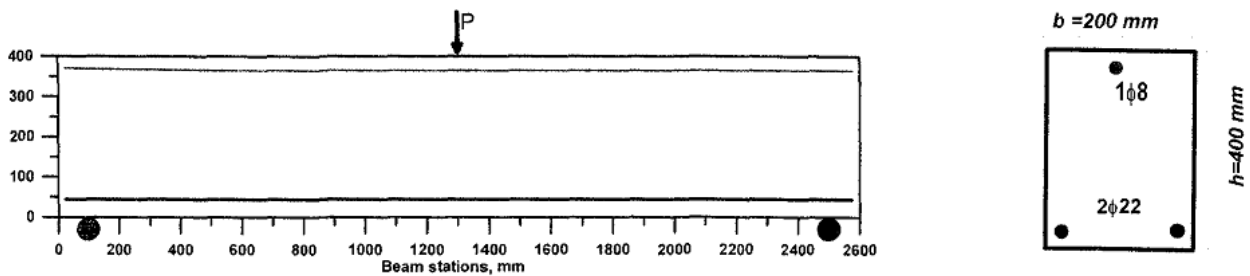


Рис. 4. Геометричні характеристики та армування дослідного візця UB [9]

Матеріали та армування підібрали так, щоб отримати руйнування балок за поперечною силою (повністю відсутнє поперечне армування). Експериментальні результати, наведені в [10], показують руйнування дослідних візців за поперечною силою при прикладанні сили в 1/3 прольоту – збільшився відносний проліт зрізу. Характер руйнування такого візця наведено на рис. 5.



Рис. 5. Характер руйнування залізобетонної балки за поперечною силою [10]

Отже, для усіх вищеперелічених випадків було характерне руйнування за похилим перерізом за пріоритетної дії поперечної сили. Про це свідчать високі значення несучої здатності, наявне значне робоче армування балок. Характер руйнування у всіх випадках був раптовим, крихким.

Мета та завдання дослідження полягає в апробуванні запропонованої залежності для розрахунку несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, котрі руйнуються за пріоритетної дії поперечної сили, зокрема за експериментальними даними інших дослідників.

Теоретичні дослідження. Роботу виконано з дотриманням вказівок чинних норм для проектування залізобетонних конструкцій [1,2]. Згідно з нормами [2] приймають, що поперечна

сила сприймається лише бетоном. Розраховують міцність залізобетонних балок на зріз без поперечної арматури за такою залежністю:

$$V_{Rd,ci} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot r_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot s_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Проте за значення, не меншого ніж:

$$V_{Rd,c2} = (V_{min} + k_1 \cdot s_{cp}) \cdot b_w \cdot d, \quad (2)$$

де $C_{Rd,c} = 0,18 / g_c$ – мінімальне значення міцності бетону на зріз, МПа; $k = 1 + \sqrt{200 / d}$ – коефіцієнт впливу висоти балки; $k_1 = 0,15$ – коефіцієнт, який враховує вплив діаметра розтягнутої арматури; r_1 – коефіцієнт, який враховує вплив розтягнутої арматури на міцність поперечного перерізу; f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск у віці 28 діб, МПа; s_{cp} – середнє напруження від обтиску перерізу поздовжньою силою від зовнішніх навантажень, або силою натягу попередньо напруженою арматурою, МПа; b_w, d – відповідно найменша ширина перерізу у розтягнутій зоні та робоча висота перерізу, мм.; $V_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ – коефіцієнт, який враховує роботу бетону, МПа.

Враховуючи правила розрахунку [2], пропонується удосконалити методику розрахунку, щоб внести параметр до залежності, коли беруть до уваги відносний проліт зрізу. Із збільшенням відстані до точки прикладання сили несуча здатність балок на зріз зменшується, тому пропонується ввести до формули (1) коефіцієнт, який враховує співвідношення a/d у вигляді:

$$V_{Rd,ci} = \left[\left(\frac{4 \cdot d}{a} \right) \cdot C_{Rd,c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

У випадку, коли цього недостатньо, підбирають поперечну арматуру і розрахунок проводять за умови, що поперечну силу сприймає лише поперечне армування. Розраховують поперечну силу, яку може сприйняти поперечна арматура, за залежністю (4), наведеною в нормах [2]:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot q, \quad (4)$$

де q – кут між стиснутим бетонним умовним елементом і віссю балки, перпендикулярної до поперечної сили (величина кута q обмежується, граничні значення $\cot q$ приймаються в межах $1 \leq \cot q \leq 2,5$); z – плече внутрішньої пари для елемента з постійною висотою перерізу, яке відповідає згинальному моменту в елементі, що розглядається (розраховуючи на зсув залізобетонні елементи за відсутності осової сили зазвичай можна приблизно приймати значення $z = 0,9 \cdot d$), см; A_{sw} – площа поперечного перерізу поперечної арматури, см²; s_w – крок поперечних стрижнів, мм; f_{ywd} – розрахунковий опір текучості поперечної арматури, МПа.

У випадку, коли руйнування йде за схемою за поперечною силою (робоча арматура є надійно заанкерована, а руйнування відбувається внаслідок зрізу двох країв похилої тріщини, однієї відносно іншої), залежність (4) показує високу незбіжність, що призводить до перевитрати матеріалів. Пропонується використовувати залежність, беручи до уваги роботу бетону:

$$V_{Rd,i} = V_{Rd,s} + V_{Rd,ci} \cdot \gamma_M, \quad (5)$$

де $V_{Rd,s}$ – несуча здатність поперечної арматури на зріз (4); $V_{Rd,ci}$ – несуча здатність бетону в зоні дії поперечної сили (3); $\gamma_M = 0,8$ – коефіцієнт, за якого беруть до уваги зменшення поперечного перерізу бетону арматурою в зоні дії поперечної сили.

Власні експериментальні дослідження. Для реалізації мети досліджень запроектовано шість дослідних зразків – залізобетонних балок завдовжки 2100 мм, завширшки 100 мм та висотою 200 мм. Балки поділяють на дві серії: 1-ша серія без поперечної арматури (3 шт.) та 2-га серія з поперечною арматурою (3 шт.) Для армування балок без поперечної арматури прийнято робочу

арматуру Ø18 мм класу А400С, арматуру в стиснутій зоні бетону Ø10 мм класу А400С, конструктивна Ø8 мм А240С розміщена в зоні, де відсутня поперечна сила (рис. 6, а). Армування поперечною арматурою в зоні дії поперечної сили відсутнє. Також було запроєктовано три балки аналогічних геометричних розмірів, проте з армуванням у вигляді робочої арматури класу А400С Ø22 мм.; А400С Ø12 мм прийнято як стиснуте армування. Поперечне армування - А240С Ø 8 мм розташоване в приопорній зоні з кроком 100 мм (рис. 6, б).

Бетон балки прийнято класу С32/40. Залізобетонну балку спроектовано з розрахунку забезпечення несучої здатності лише нормальних перерізів згідно з чинними нормами [1, 2].

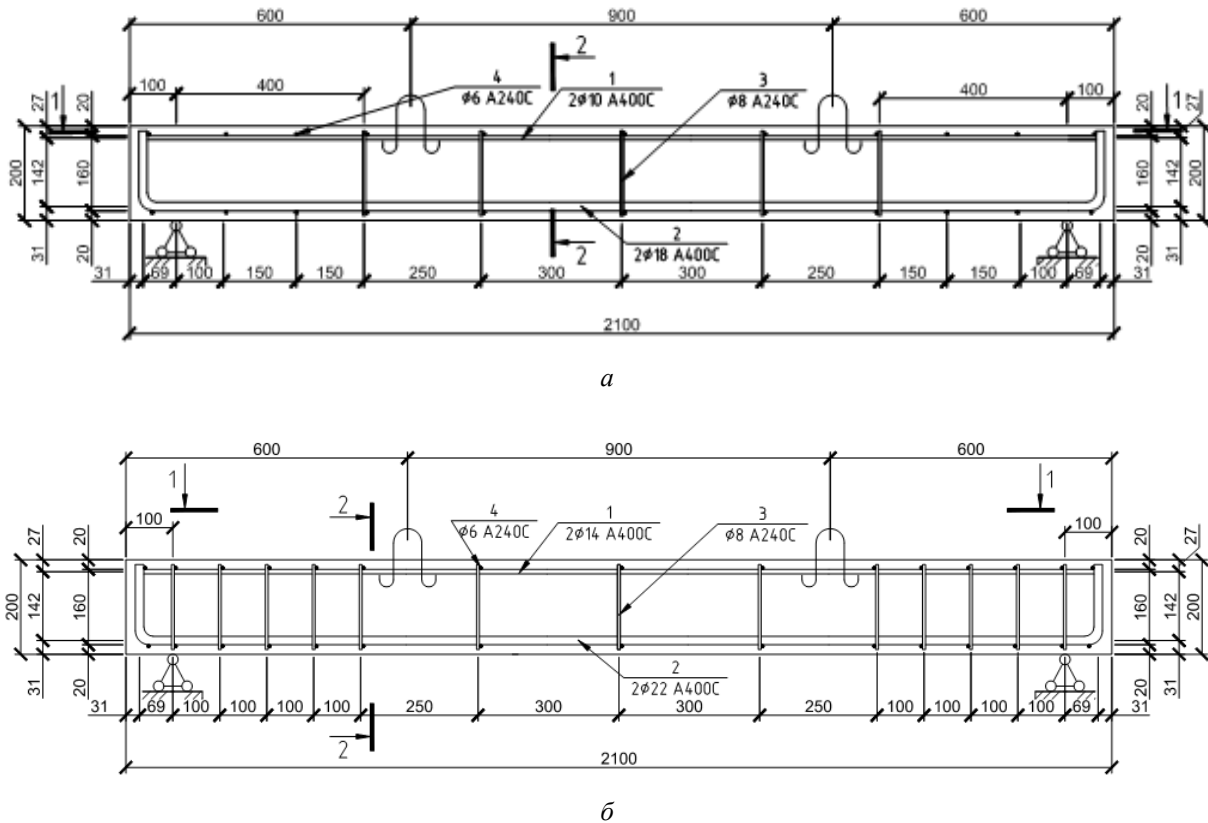


Рис. 6. Армування та розміри дослідних балки: а – балка без поперечного армування;
б – балка з поперечним армуванням

Досліджували залізобетонні балоки без та з поперечною арматурою. Балки маркуються БЗ – балка, перша цифра – номер серії, друга цифра – номер дослідного зразку, третя цифра – номер перерізу. Наприклад, БЗ 1.2-2 означає, що випробувано першої серії другу балку, другий переріз. Змінним параметром був відносний проліт $a/d=1; 1,5; 2,0$. Балки випробовували за схемою “чистого згину” – балку навантажували двома силами симетрично до центру балки. Навантаження прикладали ступенями по 10 кН. Кожний з похилих перерізів випробовували окремо згідно з методикою, викладеною в [3]. Результати експериментальних випробувань наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок

Тип балок	Тип похилого перерізу	Поперечний переріз $b \times h$, мм ²	Розрахункова довжина l_0 , мм	Відносний проліт, a/d	Руйнівне значення V_{Ed} , кН	Усереднене значення V_{Ed} , кН
1	2	3	4	5	6	7
БЗ 1.1	БЗ 1.1-1	201×106	1900	2	97	95
	БЗ 1.1-2		1550	2	93	

1	2	3	4	5	6	7
БЗ 1.2	БЗ 1.2-1	199×98	1900	1	192	198
	БЗ 1.2-2		1750	1	204	
БЗ 1.3	БЗ 1.3-1	202×98	1900	1,5	139	140,5
	БЗ 1.3-2		1650	1,5	142	
БЗ 2.1	БЗ 2.3-1	202×98	1900	2	150	148,5
	БЗ 2.3-2		1650	2	147	
БЗ 2.2	БЗ 2.1-1	201×106	1900	1	250	258,5
	БЗ 2.1-2		1650	1	267	
БЗ 2.3	БЗ 2.2-1	199×98	1900	1,5	186	182,5
	БЗ 2.2-2		1650	1,5	179	

Експериментальні дослідження інших авторів. Для порівняння та аналізу було взято балки з експериментів інших дослідників, де відбувалось руйнування залізобетонних балок за поперечною силою [4–9]. Маркування балок наведено як у вихідних статтях. Геометричні характеристики та армування балок наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Експериментальні дані досліджень несучої здатності
похилих перерізів залізобетонних балок**

Тип балок	Джерело	Армування		f_{ck} , МПа	Поперечний переріз $b \times h$, мм	Розрахункова довжина l_0 , мм	Відносний проліт, a/d	Руйнівне значення V_{Ed} , кН
		Робоче	Поперечне					
СВ прям.	[4]	6Ø20 A500C	Ø8 B500 крок 380 мм	36,95	420×250	4300	3	153,61
В 2-2 тавр.	[5]	2Ø20 A500C	Ø6 A240C крок 250 мм	31,4	400×200	3000	2,5	165
В7 тавр.	[5]	2Ø20 A500C	Ø8 A240C крок 120 мм	50,2	400×200	3000	3	390
PR-1 тавр	[6]	4Ø12 A500C	-	47	270×150	1016	1,5	330
PR-2 тавр	[6]	4Ø12 A500C	-	47	270×150	1394	2,5	183
PR-3 тавр	[6]	4Ø12 A500C	-	47	270×150	1770	3,5	147
T0A прям.	[7]	2Ø20 A400C	Ø8 A400C крок 292 мм	30,75	250×150	2700	2,35	150,7
T0B прям.	[7]	3Ø20 A500C	Ø8 A500C крок 210 мм	28,46	250×150	2700	3,6	137,55
UB прям.	[8]	2Ø22 A500C	-	28,4	400×200	2400	3,3	141
СВ прям.	[9]	2Ø16 A500C	-	26,4	300×150	2000	2,5	105

Апробація вдосконаленої методики розрахунку залізобетонних балок на дію поперечної сили. Розрахунок проводили за формулами (1) та (4) згідно з нормами [2] та за запропонованими залежностями (3) та (5). Результати розрахунку наведено в табл. 3

Експериментальні та теоретичні значення несучої здатності похилих перерізів балок

Тип балок (джерело)	V_{Ed} , кН	$V_{Rd,n}$ (ДСТУ), кН	$\left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,n}} - 1\right) \times 100\%$	$V_{Rd,i}$, кН	$\left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}} - 1\right) \times 100\%$
Без поперечного армування					
БЗ 1.1	95	39,3	141.7	87,5	7,9
БЗ 1.2	198	39,3	403.8	175,0	11,6
БЗ 1.3	140,5	39,3	303.3	116,7	16,9
PR-1 [6]	330	92,5	256.8	264,2	22,2
PR-2 [6]	183	92,5	97.8	158,5	13,4
PR-3 [6]	147	92,5	58.9	113,2	23
UB [8]	141	109,4	28.9	116,0	17,7
CB[9]	105	70,3	49.4	98,33	6.6
З поперечною арматурою					
БЗ 2.1	148,5	65,0	128.5	122,8	17,5
БЗ 2.2	258,5	65,0	297.7	197,1	31,2
БЗ 2.3	182,5	65,0	180.8	142,1	19.2
CB [4]	153,61	63,4	58,8	135,3	11,9
B 2-2 [5]	165	23,2	611.2	159,8	3,1
B7 [5]	390	79,5	390.6	318,1	18,4
T0A [7]	150,7	24,8	507.7	134,2	11,0
T0B [7]	137,55	38,8	254.5	126,5	8,1

Порівнюючи несучу здатність похилих перерізів, отриману за чинними нормами, бачимо, що тут наявна велика розбіжність як для похилих перерізів без поперечної арматури, так і для армованих перерізів. Заниження реальної несучої здатності становить від 49,4 % для неармованих та від 128 % для армованих похилих перерізів залізобетонних балок. Обчислення несучої здатності за вдосконаленою методикою дає змогу точніше оцінити несучу здатність похилих перерізів – похибка становить до 23 % (в бік заниження теоретичного результату), лише в одному випадку похибка становить 33 %, що теж є задовільним, враховуючи складність діагностики реальної несучої здатності балок на поперечну силу.

Висновки. Використання вдосконаленої методики розрахунку дає змогу точніше встановити напружено-деформований стан похилих перерізів залізобетонних балок, в яких спостерігається схема руйнування за поперечною силою.

1. Такий метод розрахунку похилих перерізів залізобетонних балок надає задовільну збіжність з експериментальними даними різних авторів, яка становила в переважній більшості випадків до 23 %.

1. Бетонні та залізобетонні конструкції : ДБН В.2.6 - 98: 2009. – [Чинний від 2011-07-1]. – К.: Мінбудрегіон України, 2011. – 84 с. – (Національний стандарт України). 2. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону.: ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. - [чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с. (Національний стандарт України). 3. Вегера П. І. Оптимізація методики експериментальних досліджень похилих перерізів залізобетонних балок / П. І. Вегера, Р. Є. Хміль, З. З. Бліхарський // Теорія та практика будівництва – 2015. – № 823. – С. 38–43. 4. Alzate A. Shear strengthening of reinforced concrete members with CFRP sheets / A. Alzate, A. Arteaga, A. de Diego, D. Cisneros, R. Perera// *Materiales de Construcción*. – 2013. – P. 251–265. 5. Minelli F. Flexure and shear behavior of RC beams strengthening by external reinforcement. / F. Minelli, G. A. Plizzari, J. Cairns // *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. – 2009. – Vol. II. – P. 1047–1053. 6. Nabipay P. Shear resistance of concrete T-beams prestressed with CFRP cables. / P. Nabipay, D. Svecova // P. 1–8. 7. Ombers L. Shear capacity of concrete beam strengthened with cement based composite materials / L. Ombers // *Composite Structures*. – 2011. – № 94. – P. 143–145. 8. Shuuraim A. B. Efficacy of CFRP configurations for shear of RC beams: experimental and NLFE. / A.B. Shuuraim // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2011. – Vol. 39, № 3. – P. 361–382. 9. Jung K. Shear Strengthening Performance of Hybrid FRP-FRCM. / K. Jung, K. Hong, S. Han, J. Park // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–11.