

УДК 624.012.25

**АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА РІЗНИМИ МЕТОДИКАМИ**

**АНАЛИЗ РАСЧЕТА ПРОГИБОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАЗНЫМ МЕТОДИКАМ**

**THE ANALYSIS OF CALCULATION OF DEFLECTION OF
REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENTS BY DIFFERENT
METHODS.**

**Бабич В. Є., к.т.н., доцент, Поляновська О. Є., к. т. н. асистент,
Борейчук Л. М., студентка (Національний університет водного
господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Бабич В. Е., к.т.н., доцент, Поляновская Е. Е., к. т. н., асистент,
Борейчук Л. Н., студентка (Национальный университет водного хозяйства и
природопользования, г. Ровно)**

**Babich V. Ye., Candidate of technical sciences, associate professor, Polianovska
O. Ye., Candidate of technical sciences, Boreichuk L.N., student (National
University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

Висвітлено аналіз результатів розрахунку прогинів залізобетонних балок за методикою національних норм, рекомендацій європейського стандарту, норм, які втратили чинність, в порівнянні з результатами експериментальних досліджень. Доведено, що задовільну збіжність з експериментальними даними мають значення прогинів, визначених за національним та європейським стандартами.

Приведен анализ результатов расчета прогибов железобетонных балок по методике национальных норм, рекомендаций европейского стандарта, норм, которые отменены, в сравнении с результатами экспериментальных исследований. Показано, что удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными имеют значение прогибов, определенных по национальным и европейским стандартам.

Results analysis calculation of deflection of reinforced concrete beams due to method of national standards, European standards recommendations, standards that have lost validity in comparison with results of experimental investigations are presented. It is proved, that meaning of deflections is

satisfactory when they are determining due to national and European standards.

Ключові слова.

Залізобетонні згинальні елементи, розрахунок прогинів, аналіз результатів.
Железобетонные изгибаемых элементов, расчет прогибов, анализ результатов.

Reinforced concrete bending elements, deflection calculation, results analysis.

Стан питання та мета досліджень. В чинних нормативних документах з проектування залізобетонних конструкцій [1, 2] досягнута гармонія методики їх розрахунку з європейськими стандартами [3], що сприяє усуненню перешкод в обміні між країнами технічними рішеннями і торгівлі будівельною продукцією. Але можливість використання в розрахунках різних методик повинно бути обґрунтовано відповідністю результатів розрахунків експериментальним даним.

Наразі, не дивлячи на те, що норми [1, 2] вже чинні декілька років, навчальної і довідкової літератури, в якій би в повній мірі були розроблені практичні методики реалізації положень норм, практично відсутні. В роботах [6, 7, 8, 9] розроблені окремі питання розрахунків несучої здатності нормальних і похилих перерізів згинальних елементів з використанням різних діаграм механічного стану матеріалів та доведено, що несуча здатність, визначена за нормами [1, 2], відрізняється від несучої здатності за нормами, які відмінені [5], в межах 10%. Порівняння з експериментальними даними відсутні.

Щодо порівняння результатів розрахунків згинальних елементів за граничними станами другої групи з використанням різних методик як між собою, так і з експериментальними даними в наукових публікаціях не висвітлені. Тому в цій статті поставлено за мету виконати порівняння результатів розрахунку прогинів балок згідно норм [1, 2, 3, 4, 5] з експериментальними даними.

Прогини визначалися за відомою формулою будівельної механіки

$$f = k_m \chi l_d^2, \quad (1)$$

де k_m – коефіцієнт, який залежить від розрахункової схеми балки;

χ – кривизна елемента;

l_d – розрахунковий проліт балки.

Результати експериментальних досліджень. В комплексі досліджень напружено-деформованого стану згинальних елементів залежно від довжини анкерування арматури випробувані три зразки-близнюки балок (балки Б-1, Б-2, Б-3) при одноразовому навантаженні до руйнування [11]. Балки мали

номінальний розмір поперечного перерізу 200×100 мм та довжину 200 см. Для виготовлення зразків використані бетон класу C25/30 та робоча поздовжня арматура класу A500С, а монтажна і поперечна арматура – класу A240 (рис. 1). Докладно виготовлення балок описано в роботі [11].

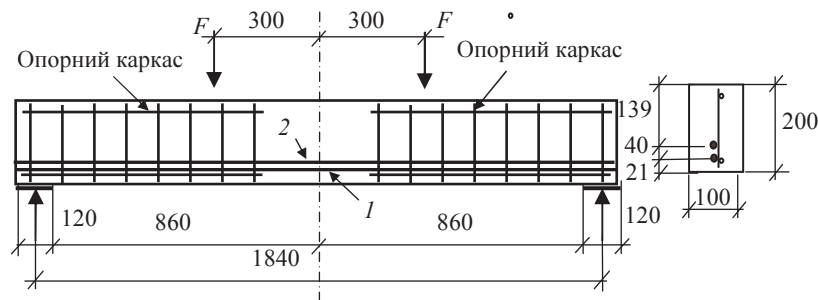


Рис. 1. Конструктивна схема армування дослідних балок Б – 1,2,3:
1, 2 – поздовжні робочі стержні діаметром 12 мм класу А500С

На час початку випробування балок кубикова міцність бетону складала $f_{cm,cube} = 43,0$, а середня призматична міцність - $f_{cm,prism} = 31,8$ МПа. Якщо визначити характеристичне значення призматичної міцності, то воно виявиться близьким до значення для бетону класу C25/30. Визначена за стандартною методикою межа текучості арматури виявилася рівною $f_{ym} = 524,7$ МПа, а модуль пружності $E_s = 210000$ МПа.

Випробування балок здійснювали в металевих рамах з навантаженням двома зосередженими силами за допомогою гідравлічного домкрата і вимірюванням навантаження тарованими динамометрами. В процесі навантаження вимірювали деформації бетону стиснутої зони, деформації арматури, прогини балок, для чого використовували тензорезистори, індикатори годинникового типу, тензометри Гугенберґера та прогиноміри.

Балки навантажувалися ступенями, величина яких складала (0,07 – 0,10) від руйнівного, до втрати несучої здатності. Середнє руйнуюче зусилля для балок складало $F_u = 31,2$ кН (окремо по балкам 31,9; 31,5; 30,3). Критерієм руйнування було роздроблення бетону стиснутої зони, коли деформації в крайній стиснутій фібрі бетону досягли значень $\varepsilon_{cu} = 224,1 \times 10^{-5}$, а в нижньому розтягнутому стержні - відповідно $-\varepsilon_{su} = 189,5 \times 10^{-5}$. Середня величина руйнуючого моменту складала $M_u = 19,34$ кНм. Значення руйнуючих навантажень свідчать про високу однорідність зразків-близнюків.

Експериментальні значення прогинів в процесі визначалися безпосередньо вимірюваннями прогиномірами та за виміряними деформаціями крайньої стиснутої фібри бетону ε_c і деформаціями нижнього розтягнутого стержня ε_s . Прогини визначали за формулою (1) з використанням кривизни за формулою

$$\chi = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}, \quad (2)$$

де d – віддаль від центра ваги нижнього стержня до крайньої стиснутої фібри бетону.

Результати експериментальних випробувань балок наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Результати експериментальних досліджень дослідних балок

Навантаж. F , кН	Згинальн. момент M , кНм	Прогин (заміря- ний), мм	Деформації, $\times 10^5$		Кривизна, $\chi \times 10^5$ 1/см	Прогин (за χ), мм
			бетону, ε_c	арматури, ε_s		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,86	0,17	13,83	7,33	1,18	0,49
6	3,72	0,64	26,83	15,67	2,37	0,99
9	5,58	1,18	44,17	38,67	4,63	1,92
12	7,44	1,94	68,83	58,67	7,12	2,96
15	9,30	2,69	87,83	77,00	9,21	3,83
18	11,16	3,63	110,17	106,67	12,11	5,04
21	13,02	4,55	132,83	127,17	14,53	6,05
24	14,88	5,54	157,33	144,17	16,84	7,01
27	16,74	6,51	175,67	158,67	18,68	7,77
30	18,60	7,75	206,50	183,00	21,76	9,06

****Визначення прогинів балок згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010.

Стандартом передбачається визначення кривизни за формулою у вигляді (2), але щодо методики визначення деформацій бетону і арматури при заданому згинальному моменту рекомендацій не наводиться. Таку задачу можна вирішити наступним чином. Використовуючи деформаційну модель, в якій приймається діаграма деформування бетону у вигляді поліному п'ятої степені [1], методом послідовних наближень, дотримуючись рівнянь рівноваги поперечного перерізу, методом поступових наближень побудувати залежність «момент-кривизна» ($M-\chi$)[2]. Оскільки розрахунки за деформаціями відносяться до розрахунків за граничними станами другої групи, в розрахунки вводяться характеристичні значення механічних властивостей бетону і арматури.

Згинальні моменти і кривизна обчислені при зміні відношень $\varepsilon_c/\varepsilon_{c1,ck}$, де $\varepsilon_{c1,ck}$ – значення відносних граничних деформацій стиску бетону (в розрахунках прийнято як для бетону класу С25/30 $\varepsilon_{c1,ck} = 176 \times 10^{-5}$). Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Значення моментів за фіксованих деформаціях стиснутого бетону не співпадають зі значеннями моментів, фіксованих при навантаженні балок, тому величину прогинів при цих моментах визначали шляхом інтерполяції даних табл.2 (табл. 3).

Таблиця 2

Значення моментів внутрішніх сил $M_{гр}$, деформацій матеріалів, напружень в арматурі та кривизни залежно від деформацій крайньої фібри стиснутого бетону

$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,ck}}$	$\varepsilon_c \times 10^5$	$\varepsilon_s \times 10^5$	$\chi \times 10^5$, 1/см	σ_s , МПа	f , мм	$M_{гр}$, кН×м
0,1	17,6	44,2	3,45	92,7	1,43	3,05
0,2	35,2	86,0	6,77	180,5	2,82	5,90
0,3	52,8	125,5	9,96	263,6	4,14	8,56
0,4	70,4	158,7	12,80	333,3	5,33	10,82
0,5	88,0	193,3	15,71	405,9	6,54	13,08
0,6	105,6	226,0	18,52	474,4	7,71	15,16
0,7	123,2	250,2	20,85	525,4	8,68	16,77
0,8	140,8	250,2	21,83	525,4	9,09	17,98
0,9	158,4	250,2	22,81	525,4	9,49	19,01
1,0	176,0	250,2	23,80	525,4	9,91	19,99
1,1	193,6	250,2	24,78	525,4	10,32	20,94
1,2	211,2	250,2	25,77	525,4	10,73	17,22

Визначення прогинів балок згідно з Єврокод-2. Методика Єврокод-2 [3] повністю використана в нормах Республіки Білорусь [4]. За цією методикою кривизна елементів визначається за формулою

$$\chi = \xi \chi_{II} + (1 - \xi) \chi_I, \quad (3)$$

де χ_I і χ_{II} – значення кривизни, яка визначається відповідно для перерізу без тріщин та з тріщинами;

ξ – коефіцієнт, який визначається за формулою

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{gr}}{\sigma_s} \right)^2, \quad (4)$$

де β – коефіцієнт, який враховує вплив тривалості навантаження на середню деформацію ($\beta = 1,0$ – при нетривалій дії навантаження);

σ_{gr} – напруження в розтягнутій арматурі в перерізі з тріщиною при навантаженні, за дії якого утворилася перша тріщина.

В формулі (4) відношення $\frac{\sigma_{gr}}{\sigma_s}$ можна замінити відношенням $M_{gr}/M_{грк}$

де M_{gr} – згинальний момент, за якого утворюється перша тріщина.

Відповідно до [1] критерієм утворення тріщин є досягнення деформаціями крайнього розтягнутого волокна граничних значень $\epsilon_{\text{стт}}$, яке можна прийняти рівним $\epsilon_{\text{стт}} = 2f_{\text{стт}}/E_{\text{стк}}$. За експериментальними даними для використаного бетону значення $f_{\text{стт}} = 1,72$ МПа, а значення $E_{\text{стк}}$ можна

Таблиця 3

Порівняння теоретичних значень прогинів, визначених за різними методиками з експериментальними даними

Момент, кНм	Прогин $f_{\text{експ}}$, мм	Теоретичні значення, мм			Відношення		
		$f_{\text{ДВН}}$ [2]	$f_{\text{Евр}}$ [3, 4]	$f_{\text{СНІП}}$ [5]	$\frac{f_{\text{ДВН}}}{f_{\text{експ}}}$	$\frac{f_{\text{Евр}}}{f_{\text{експ}}}$	$\frac{f_{\text{СНІП}}}{f_{\text{експ}}}$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
1,86	0,49	0,87	0,78	0,40	1,78	1,59	0,82
3,72	0,99	2,01	1,78	2,28	2,03	1,80	2,30
5,58	1,92	2,66	2,50	4,07	1,39	1,30	2,12
7,44	2,96	3,58	3,45	5,86	1,21	1,17	1,98
9,30	3,83	4,53	4,42	7,52	1,18	1,15	1,96
11,16	5,04	5,51	5,41	9,09	1,09	1,07	1,80
13,02	6,05	6,51	6,42	10,61	1,08	1,06	1,75
14,88	7,01	7,55	7,47	12,12	1,08	1,07	1,73
16,74	7,77	8,62	8,55	13,64	1,11	1,10	1,76
18,60	9,06	9,33	9,27	15,15	1,03	1,02	1,67
Середні відношення					1,30	1,23	1,79
Середньоквадратичні відхилення					0,34	0,26	0,39
Коефіцієнти мінливості, %					26,2	21,2	21,7

прийняти як для бетону класу С25/30 - $E_{\text{стк}} = 29000$ МПа. За цих характеристик бетону граничне значення деформації розтягу буде рівне $\epsilon_{\text{стт}} = 11,86 \times 10^{-5}$. Враховуючи спільну роботу бетону і арматури можна прийняти, що перед утворенням тріщин деформації в арматурі складуть $\epsilon_s = 11,86 \times 10^{-5}$. Використовуючи дані табл. 2 за інтерполяцією при такій деформації арматури момент тріщиноутворення складе $M_{\text{тр}} = 1,60$ кНм. За цього значення моменту $\chi_I = 1,81 \times 10^{-5}$. Значення χ_{II} обчислювалися за формулою (2). Результати розрахунків за формулами (1) ... (4) наведені в табл. 3.

Визначення прогинів балок відповідно до СНиП 2.03.01-84*. Кривизна балок від дії окремих навантажень визначається за формулою

$$\frac{1}{r} = \chi = \frac{M\psi_s}{\alpha A_s E_s (h_0 - x)}, \quad (5)$$

де M - згинальний момент від зовнішнього навантаження;

ψ_s - коефіцієнт, який враховує роботу розтягнутого бетону на ділянках між тріщинами;

x - плече внутрішньої пари сил;
 A_s - площа розтягнутої робочої арматури;
 E_s - модуль пружності арматури;
 $h_0 = d$ - робоча висота перерізу;
 x - висота стиснутої зони бетону.

Значення величин x, χ, ψ_s знаходяться за формулами, наведеними в СНиП 2.03.01-84* зі змінами [5]. Для дослідних зразків площа поперечного перерізу арматури складає $A_s = 2,26 \text{ см}^2$, а робоча висота перерізу - $d = 15,1 \text{ см}$. За розрахунками відповідно до [5] значення $\chi = 5,2 \text{ см}$; $x = 12,5 \text{ см}$. Результати розрахунків за формулами(1) і (5) наведені в табл. 3.

Порівняння теоретичних значень прогинів з експериментальними.

З метою уникнення впливу розрахункової схеми балки (точності визначення коефіцієнта K_{tm}) для порівняння прийняті експериментальні значення прогинів, визначені за формулою (1) по експериментальним значенням деформацій бетону і арматури (табл. 1). Таким чином в усіх випадках обчислення прогинів міститься коефіцієнт K_{tm} , а тому на їх співвідношення не впливає.

Як видно з табл. 3, на перших ступенях навантаження відношення $f_{ДЕН}/f_{Експ}$ і $f_{Еарг}/f_{Експ}$ мають суттєві значення (відповідно 1,78 і 1,59), а в подальшому збіжність експериментальних і теоретичних значень прогинів покращується і на останніх ступенях відповідно їх відношення склали 1,03 і 1,02.

Оскільки визначення прогинів балок відносяться до розрахунків за граничними станами другої групи, тобто, при дії експериментальних навантажень, які складають в межах 50 – 70 % від руйнуючого навантаження. Для дослідних балок можна вважати експлуатаційний рівень навантажень від $M_{SL15} = 9,30$ до $M_{SL15} = 13,02 \text{ кНм}$. В цих межах значень згинаючого моменту середні відношення прогинів складають $f_{ДЕН}/f_{Експ} = 1,12$ і $f_{Еарг}/f_{Експ} = 1,09$. Це свідчить, що при дії експлуатаційного навантаження спостерігається задовільна збіжність значень експериментальних прогинів з теоретичними значеннями, визначеними за національними нормами та Єврокод – 2.

Визначені прогини за нормами [5] мають суттєву розбіжність з експериментальними даними (табл. 3).

Висновки. 1. При дії експериментальних навантажень теоретично визначені прогини за національними нормами і Єврокод – 2 мають задовільну збіжність з експериментальними даними.

2. Визначені теоретично прогини згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010 і Єврокод – 2 для дослідних балок практично однакові.

3. Визначені прогини згідно з СНиП 2.03.01- 84* мають суттєву розбіжність з експериментальними даними.

4. Для визначення теоретичних значень деформацій бетону і арматури доцільно методом послідовних наближень будувати діаграму залежності

“момент - кривизна”, використовуючи залежність між напруженнями і деформаціями у вигляді поліному п'ятої степені.

1. ДБН В.2.6-98: 2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. 2. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 166 с. 3. EN 1992-1-1: Eurocode-2. Design of Concrete Structures.-Part I: General rules and rules for Buildings.- Final draft, December 2004. 4. БНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 140 с. 5. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции.- М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.- 80 с. 6. Бабаєв В. М. 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) / И. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова, П. А. Резнік, Є. Г. Столяров, В. С. Шмуклер // За загальною редакцією В. С. Шмуклера.- Харків: «Золоті сторінки», 2015. – 208 с. 7. Бліхарський З. Я. Розрахунок і конструювання нормальних та похилих перерізів залізобетонних елементів: Навчальний посібник / З. Я. Бліхарський, І. І. Кархут, Р. Ф. Струк. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 144 с. 8. Мурашко Л. А. Розрахунок за міцністю перерізів нормальних та похилих до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів за ДБН В.2.6-98: 2009: Навчальний посібник / Л. А. Мурашко, В. М. Колякова, Д. В. Сморгалов. - К.: КНУБА, 2012. – 62 с. 9. Павліков А. М. Розрахунок міцності нормальних перерізів балкових елементів за нелінійною деформаційною моделлю (на основі ДБН В.2.6-98: 2009): Навчальний посібник / А. М. Павліков, О. В. Бойко // За редакцією А. М. Павлікова. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 85 с. 10. Поляновська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та удосконалення методики її анкерування в згинальних залізобетонних елементах / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.23.01. – Рівне: НУВГП, 2015. – 164 с. 11. Поляновська О. Є. Вплив довжини анкерування поздовжньої арматури на прогини згинальних залізобетонних елементів / О. Є. Поляновська // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2015. - Випуск 30. – С. 233 – 240.