

УДК 624.012.45.001

*О.А. Шкурупій, к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Виконано експериментальні та теоретичні дослідження розрахунку несучої здатності залізобетонних нерозрізних балок на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм із застосуванням оптимізаційних і чисельних методів, а також методу граничної рівноваги. Результати наведених вище теоретичних розрахунків таких конструкцій зіставлені з експериментальними даними, одержаними автором статті та наведеними в роботах інших дослідників.

Ключові слова: бетон, арматура, міцність, несуча здатність, нерозрізна балка, деформація, напруження, модуль пружності, клас бетону.

УДК 624.012.45.001

*А.А. Шкурупій, к.т.н., доцент
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Выполнены экспериментальные и теоретические исследования расчета несущей способности железобетонных неразрезных балок на основе деформационной модели с экстремальным критерием с применением оптимизационных и численных методов, а также метода предельного равновесия. Результаты приведенных выше теоретических расчетов таких конструкций сопоставлены с экспериментальными данными, полученными автором статьи и приведенными в работах других исследователей.

Ключевые слова: бетон, арматура, прочность, несущая способность, неразрезная балка, деформация, напряжение, модуль упругости, класс бетона.

UDC 624.012.45.001

*O.A. Shkurupiy, PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF BEARING CAPACITY OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS

Experimental and theoretical studies of bearing capacity calculation of reinforced concrete continuous beams has been carried out on the basis of deformation model with extreme criterion and application of optimization and numerical methods and the method of maximum equilibrium. The results of the given above theoretical calculations of such designs have been compared with the experimental data obtained by the author of the article and given in the works of other researchers.

Keywords: concrete, armature, strength, load bearing capacity, continuous beams, deformation, tension, module modulus of elasticity, concrete class.

Вступ. Специфічні особливості залізобетону висувають додаткові вимоги до методів розрахунку міцності, жорсткості та стійкості залізобетонних конструкцій (ЗБК) і їх залізобетонних елементів (ЗБЕ), у яких необхідно враховувати й деформації матеріалу, тобто використовувати деформаційні моделі (ДМ).

На сьогодні одним із головних завдань при проектуванні ЗБК є уточнення існуючих та розроблення нових методик розрахунку, в тому числі й на основі ДМ, що запропоновано і в нових нормативних документах [1, 2].

Нерозрізні балки досить широко застосовуються в різних будівлях та спорудах як несучі конструкції. Тому дослідження їх роботи з урахуванням високоміцних бетонів і вдосконалення методики розрахунку таких конструкцій є важливим питанням.

Використання ДМ дає можливість досить точно врахувати напружено-деформований стан (НДС) на різних стадіях роботи ЗБК, у тому числі й у граничному стані. Як відмічено в роботах [3 – 5], ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ) має значні переваги над існуючими ДМ, особливо для розрахунку статично невизначуваних ЗБК, а також є суттєво новим підходом щодо розрахунку їх несучої здатності.

ДМ з ЕКМ обумовлює необхідність ретельного контролю значень усіх граничних параметрів НДС елементів ЗБК, особливо напруження в розтягнутій та стиснутій арматурі, оскільки їх розрахункові залежності суттєво різняться в діапазонах пружної та непружної роботи перш за все в переармованих конструкціях, а обмежений контроль параметрів НДС може призвести до результатів, які не відповідають дійсності. На основі розробленої оптимізаційної методики [4, 5] можна розв'язувати широке коло задач при розрахунку ЗБК (балок, колон, рам тощо) із застосуванням широкого спектра класів бетону, в тому числі й високоміцних [6]. Тому проведення теоретичних і експериментальних досліджень для вивчення роботи нерозрізних балок з урахуванням перерозподілу зусиль (при утворенні в характерних перерізах умовних пластичних шарнірів [7]) і визначення граничних значень згинальних моментів та граничного навантаження з використанням методу граничної рівноваги [8] є актуальним завданням.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Розрахункам несучої здатності ЗБК і їх елементів на основі ДМ присвячено низку літературних джерел [4, 5, 6, 9, 10, 11 та ін.]. Зокрема, більш детально розрахунку несучої здатності ЗБЕ на основі ДМ з ЕКМ приділено увагу в роботах [3, 4, 5].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Нові норми України для проектування ЗБК та їх елементів [1] містять низку принципово нових підходів до розрахунку їх несучої здатності. За основу розрахунків бетонних і залізобетонних елементів на дію згинальних

моментів та поздовжніх сил прийнята ДМ з емпіричним критерієм міцності, яка, крім рівнянь рівноваги, використовує умову деформування у вигляді гіпотези плоских перерізів і повні діаграми стану бетону.

ДМ з ЕКМ є альтернативною моделлю по відношенню до існуючих ДМ з емпіричним критерієм міцності [1, 2, 9 та ін.]. На сьогодні жодна з існуючих ДМ, крім ДМ з ЕКМ, не дає можливості розраховувати несучу здатність ЗБК і їх елементів, що працюють на різні види деформування (згин, центральний та позacentровий стиск чи розтяг тощо) без наперед заданого значення найбільш стиснутої фібри бетону нормального перерізу ε_{cul} . Вони потребують даних експериментальних досліджень для визначення ε_{cul} , і їх значення приймаються постійними для конкретного класу бетону. У дійсності ε_{cul} залежить від багатьох факторів, основними з яких є: клас міцності бетону на стиск, форма поперечного перерізу, клас арматурної сталі та її розташування тощо. Лише ДМ з ЕКМ дає можливість аналітично одержати величину ε_{cul} в результаті розрахунку за методикою, наведеною в роботах [3, 4, 5]. Уточнення існуючих методик розрахунку ЗБК дозволяє виявити резерви економії матеріалів і є актуальним завданням.

Метою роботи є розрахунок несучої здатності нерозрізних залізобетонних балок на основі ДМ з ЕКМ з використанням високоміцних бетонів при різних класах стержневої арматури та процентах армування, завантажених зосередженими силами в прогонах, і порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, одержаними автором та наведеними в роботах інших дослідників.

Основний матеріал і результати. Теоретичні дослідження обмежувались задачею розрахунку несучої здатності залізобетонних нерозрізних балок із застосуванням ДМ з ЕКМ, оптимізаційних і чисельних методів [4, 5] та методу граничної рівноваги [8].

Розрахункові положення й фізичні залежності наведено в роботах [4, 5, 6]. Стан руйнування нормального перерізу описується розрахунковими схемами зусиль і деформацій, що наведені на рис. 1.

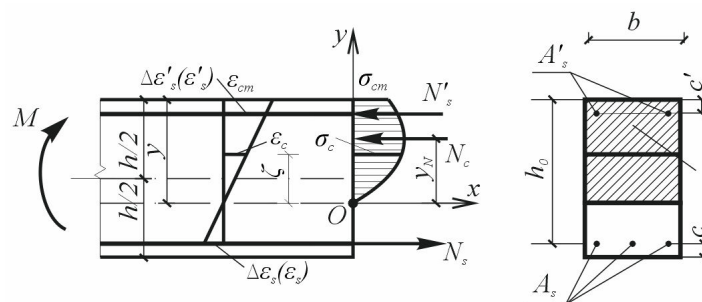


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення граничних значень згинальних моментів у характерних нормальних перерізах нерозрізних балок

За методикою, наведеною в роботах [4, 5, 12], виконані аналітичні розрахунки несучої здатності нерозрізних залізобетонних балок із високоміцних бетонів з використанням чисельних і оптимізаційних методів та методу граничної рівноваги. Алгоритм розрахунку таких конструкцій за цією методикою реалізований у спеціально розробленому програмному комплексі для ПЕОМ на базі операційної системи Windows (рис. 2).

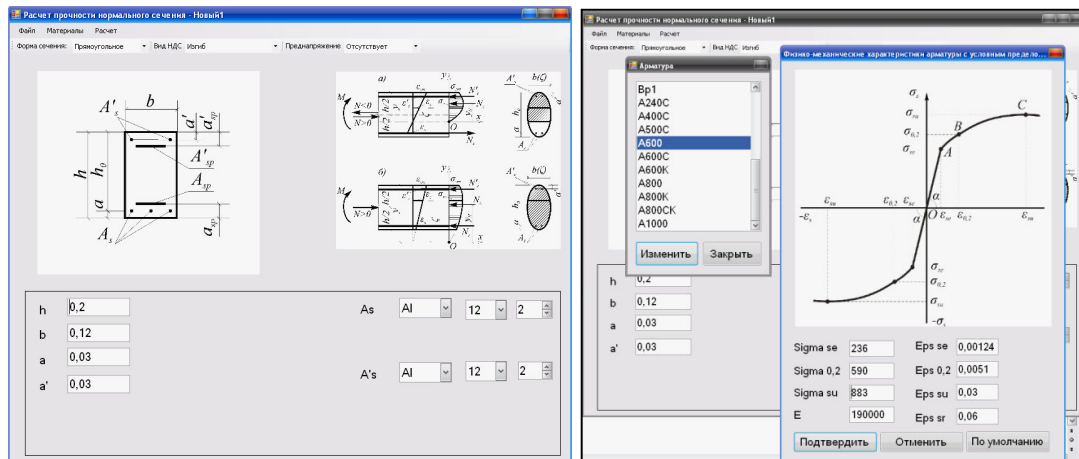


Рис. 2. Програмний комплекс CRC – 12

Експериментальні зразки за довжиною були прямокутної форми перерізу, а їх довжина дорівнювала 4000 мм. Висота та ширина їх були постійними й дорівнювали 180×120 мм. Усі експериментальні балки мали співвідношення довжини прольоту ℓ до висоти перерізу h більше 10 (рис. 3 і 4). Ця умова дає можливість нехтувати впливом поперечних сил при розрахунку їх несучої здатності. Усього випробувалось 18 зразків. Зосереджені сили прикладалися посередині прольотів – $a = b = \ell / 2$ (рис. 3 і 4).

Армування нерозрізних двопрогінних балок було постійним по довжині й виконувалося поздовжніми арматурними стержнями класу A400C діаметром 12 та 14 мм, а також звареними хомутами з арматури класу A240C діаметром 6,5 мм із кроком 50 мм в опорних зонах для запобігання виникненню похилих тріщин та з кроком 100 мм по середині прогону.

Отримані результати розрахунків порівняно з експериментальними даними, одержаними особисто автором та іншими дослідниками [13, 14, 15]. Результати експериментальних досліджень двопрогінних нерозрізних залізобетонних балок, виготовлених із високоміцних бетонів різних класів міцності на стиск, дали можливість отримати нові дані про їх міцність, деформативність та несучу здатність, а також проаналізувати одержані значення граничної деформації бетону стиснутої зони таких конструкцій у характерних нормальних перерізах. Характер розвитку тріщин та руйнування експериментальних зразків наведено на рис. 4.



Рис. 3. Загальний вигляд установки для випробування нерозрізних балок

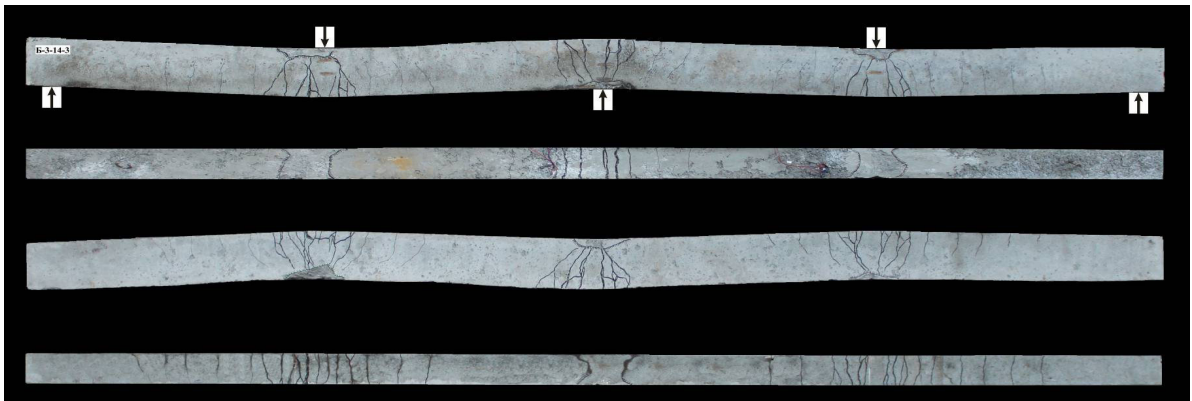


Рис. 4. Характер розвитку тріщин та руйнування експериментальних зразків

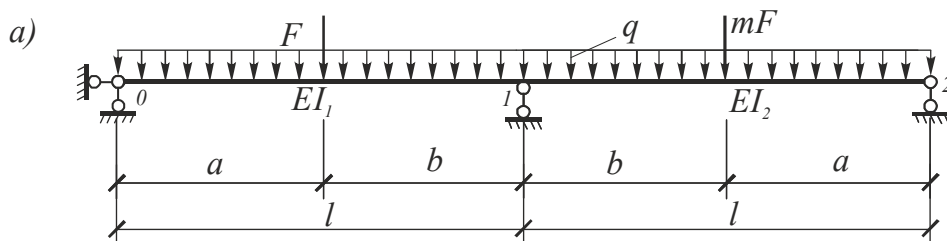


Рис. 5 Розрахункова схема балки
(m – коефіцієнт співвідношення між зосередженими силами)

Зіставлення теоретичних розрахунків несучої здатності таких балок з експериментальними даними, отриманими автором, та їх статистична обробка наведено в таблицях 1 і 2. Геометричні та механічні характеристики експериментальних зразків нерозрізних залізобетонних балок, що випробувались автором, подано в таблиці 3.

За розробленою методикою розрахунку нерозрізних залізобетонних балок на основі ЕКМ виконано також розрахунки несучої здатності аналогічних конструкцій та їх зіставлення з експериментальними даними інших дослідників (С.М. Крилова, Ю.П. Гуці, М.С. Абаканова, А.А. Оатула [13, 14, 15]). Результати їх зіставлення наведено в таблицях 1 і 2 [12].

Таблиця 1. Експериментальні та теоретичні значення деформацій нормальних перерізів нерозрізних балок у граничній стадії

Шифр зразка	Максимальна відносна деформація найбільш стиснутої грані бетону, ‰					
	Переріз під зосередженою силою у прольоті			Переріз на середній опорі		
	$\varepsilon_{cu1, експ}^{np}$	$\varepsilon_{cu1, теор}^{np}$	$\frac{\varepsilon_{cu1, теор}^{np}}{\varepsilon_{cu1, експ}^{np}}$	$\varepsilon_{cu1, експ}^{on}$	$\varepsilon_{cu1, теор}^{on}$	$\frac{\varepsilon_{cu1, теор}^{on}}{\varepsilon_{cu1, експ}^{on}}$
Б-1-12-1	-2,869	-3,061	1,067	-2,641	-3,061	1,159
Б-1-12-2	-2,78	-3,061	1,101	-2,669	-3,061	1,147
Б-1-12-3	-2,94	-3,061	1,041	-2,707	-3,061	1,131
Б-1-14-1	-2,962	-2,934	0,990	-2,631	-3,073	1,168
Б-1-14-2	-2,95	-2,923	0,991	-2,365	-3,073	1,299
Б-1-14-3	-2,987	-2,923	0,979	-2,661	-3,073	1,155
Б-2-12-1	-3,115	-3,261	1,047	-2,97	-3,261	1,098
Б-2-12-2	-3,043	-3,261	1,072	-2,972	-3,261	1,097
Б-2-12-3	-3,026	-3,303	1,092	-2,646	-3,261	1,232
Б-2-14-1	-2,998	-3,13	1,044	-2,919	-3,266	1,119
Б-2-14-2	-2,969	-3,116	1,049	-2,515	-3,266	1,299
Б-2-14-3	-3,056	-3,116	1,019	-2,625	-3,266	1,244
Б-3-12-1	-2,991	-3,275	1,095	-2,978	-3,261	1,095
Б-3-12-2	-3,006	-3,29	1,094	-2,472	-3,261	1,319
Б-3-12-3	-2,874	-3,317	1,154	-2,356	-3,261	1,384
Б-3-14-1	-3,088	-3,13	1,014	-3,094	-3,266	1,056
Б-3-14-2	-3,048	-3,171	1,040	-2,68	-3,266	1,219
Б-3-14-3	-2,992	-3,158	1,055	-2,452	-3,266	1,332
Середньоарифметичне значення			1,053			1,197
Середньоквадратичне відхилення			0,034			0,160
Коефіцієнт варіації			0,059			0,127

Таблиця 2. Експериментальні та теоретичні граничні значення згинальних моментів нормальних перерізів нерозрізних балок

Шифр зразка	Руйнівне навантаження, кН				Граничні значення згинальних моментів нормальних перерізів, кНм				
	Переріз під зосередженою силою у прольоті				Переріз на середній опорі				
	$H'_{и, експ}$	$H'_{и, теор}$	$\frac{G_{и, теор}}{F_{и, експ}}$	$M_{и1, експ}$	$M_{и1, теор}$	$\frac{M_{и1, теор}}{M_{и1, експ}}$	$M_{и2, експ}$	$M_{и2, теор}$	$\frac{M_{и2, теор}}{M_{и2, експ}}$
Б-1-12-1	39,00	42,085	1,079	13,150	13,327	1,0135	10,751	13,327	1,240
Б-1-12-2	38,00	42,085	1,108	13,177	13,327	1,0114	9,746	13,327	1,367
Б-1-12-3	37,25	42,085	1,130	13,211	13,327	1,0088	8,966	13,327	1,486
Б-1-14-1	49,00	51,026	1,041	17,435	17,554	1,0068	14,085	13,366	0,949
Б-1-14-2	47,00	50,746	1,080	17,180	17,421	1,0140	10,290	13,366	1,299
Б-1-14-3	46,50	50,746	1,091	17,214	17,421	1,0120	9,746	13,366	1,371
Б-2-12-1	40,50	42,999	1,062	13,244	13,616	1,0281	11,988	13,616	1,136
Б-2-12-2	39,75	42,999	1,082	13,341	13,616	1,0206	11,080	13,616	1,229
Б-2-12-3	42,00	42,999	1,024	13,817	13,616	0,9855	12,265	13,616	1,110
Б-2-14-1	48,75	52,052	1,068	17,366	17,883	1,03	11,581	13,863	1,182
Б-2-14-2	47,25	51,738	1,095	17,147	17,734	1,0342	10,594	13,683	1,292
Б-2-14-3	47,50	51,738	1,089	17,277	17,734	1,0265	10,571	13,683	1,294
Б-3-12-1	40,00	43,294	1,082	13,893	13,756	0,9901	10,214	13,616	1,333
Б-3-12-2	42,00	43,596	1,038	13,897	13,9	1,0002	12,107	13,616	1,125
Б-3-12-3	41,50	44,220	1,066	13,861	14,196	1,0242	11,703	13,616	1,163
Б-3-14-1	49,75	52,052	1,046	17,993	17,883	0,9939	11,277	13,683	1,213
Б-3-14-2	51,00	53,034	1,040	17,506	18,349	1,0482	13,439	13,683	1,018
Б-3-14-3	49,50	52,699	1,065	17,374	18,191	1,0470	12,798	13,683	1,069
Середньоарифметичне значення			1,071			1,023			1,215
Середньоквадратичне відхилення			0,012			0,009			0,315
Коефіцієнт варіації			0,035			0,030			0,178

Таблиця 3. Геометричні та механічні характеристики експериментальних зразків нерозрізних балок

Шифр зразка	Довжина прольоту $l_1 = l_2, \text{ мм}$										Перерізи під зосередженими силами 1 та 2 прольотів						Переріз на середній опорі						Призмова міцність бетону $f_{ck, prism}, \text{ МПа}$	Початковий модуль пружності бетону $E_{cm} \cdot 10^4, \text{ МПа}$			
	Розміри перерізу, мм		Армування		Робоча висота перерізу $h_0, \text{ мм}$	Величина захисного шару, мм		Розміри перерізу, мм		Армування		Робоча висота перерізу $h_0, \text{ мм}$	Величина захисного шару, мм														
	b	h	A_s	A'_s		a	a'	b	h	A_s	A'_s		a	a'													
Б-1-12-1	1900										180	180	2012	4400С	149	31	31	180	180	2012	4400С	149	31	31	41,03	3,9	
Б-1-12-2	1900										180	180	2012	4400С	149	31	31	180	180	2012	4400С	149	31	31			
Б-1-12-3	1900										180	180	2012	4400С	149	31	31	180	180	2012	4400С	149	31	31			
Б-1-14-1	1900										181	180	2014	4400С	148	32	32	180	180	2014	4400С	149	31	32	41,03	3,9	
Б-1-14-2	1900										180	180	2012	4400С	148	32	31	180	180	2012	4400С	149	31	32			
Б-1-14-3	1900										180	180	2012	4400С	148	32	31	180	180	2012	4400С	149	31	32			
Б-2-12-1	1900										180	181	2012	4400С	149	31	31	181	181	2012	4400С	148	32	31	46,23	4,07	
Б-2-12-2	1900										181	180	2012	4400С	149	31	32	180	180	2012	4400С	149	31	31			
Б-2-12-3	1900										182	183	2012	4400С	149	31	33	183	183	2012	4400С	146	34	31			
Б-2-14-1	1900										181	180	2014	4400С	148	32	32	120	180	180	2014	4400С	149	31	32	46,23	4,07
Б-2-14-2	1900										180	183	2012	4400С	148	32	31	183	183	2012	4400С	146	34	32			
Б-2-14-3	1900										180	182	2012	4400С	148	32	31	182	182	2012	4400С	147	33	32			
Б-3-12-1	1900										181	182	2012	4400С	149	31	32	182	182	2012	4400С	147	33	31	48,2	4,18	
Б-3-12-2	1900										182	183	2012	4400С	149	31	33	183	183	2012	4400С	146	34	31			
Б-3-12-3	1900										184	184	2012	4400С	149	31	35	184	184	2012	4400С	145	35	31			
Б-3-14-1	1900										181	181	2014	4400С	148	32	32	183	183	2014	4400С	146	34	32	48,2	4,18	
Б-3-14-2	1900										184	185	2012	4400С	148	32	35	185	185	2012	4400С	144	36	32			
Б-3-14-3	1900										183	183	2012	4400С	148	32	34	185	185	2012	4400С	144	36	32			

Висновки:

1. Виконані експериментально-теоретичні дослідження нерозрізних залізобетонних балок при різних класах бетону, включаючи і високоміцні, дозволили зробити достовірну комплексну, якісну та кількісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу на їх несучу здатність, перерозподіл зусиль і визначення граничного навантаження.

2. Установлено, що запропонована інженерна методика на основі ЕКМ з достатньою точністю дозволяє в сукупності з чисельними та оптимізаційними методами аналізувати повний комплекс граничних параметрів нормальних перерізів ЗБК у стадії їх руйнування, дає можливість обчислити значення згинальних моментів у перерізах, де утворюються умовні пластичні шарніри, та з використанням методу граничної рівноваги враховувати перерозподіл зусиль у статично невизначуваних системах і визначати граничні навантаження.

3. Оцінка достовірності одержаних результатів за розробленою інженерною методикою на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм, за результатами методів математичної статистики для зіставлення співвідношень експериментальних і теоретичних даних свідчить про їх хорошу збіжність.

Література

1. *Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. – [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с.*
2. *ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с.*
3. *Митрофанов, В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. Вып. 60. – К.: Техника, 2004. – С. 29 – 48.*
4. *Шкурупій, О.А. Міцність залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вып. 74: в 2-х кн.: Книга 1. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 605–614.*
5. *Шкурупій, О.А. Використання чисельних і оптимізаційних методів для розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Коммунальное хозяйство городов: сб. науч. тр. – Вып. 76. – К.: Техника, 2007. – С. 71–79.*
6. *Шкурупій, О.А. Аналітичне визначення фізико-механічних характеристик бетону / О.А. Шкурупій, Є.М. Бабиш // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вып. 21. – С. 401–407.*
7. *Тихий, М. Расчёт железобетонных конструкций в пластической стадии / М. Тихий, Й. Ракошник // Перераспределение усилий; пер. с чешск. – М.: Стройиздат, 1976. – 198 с.*

8. Гвоздев, А.А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А.А. Гвоздев // *Сущность метода и его обоснование*. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.
9. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
10. Бамбура, А.Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе / А.Н.Бамбура, А.Б. Гурковский // *Будівельні конструкції: зб. наук. праць*. – К.: ДП НДІБК, 2003. – Вип. 59. – С. 121–130.
11. Основні положення розрахунку несучої здатності бетонних та залізобетонних конструкцій за національним нормативним документом ДБН В.2.6 – 98: 2009 / А.М. Бамбура, Ю.І. Немчинов, О.Б. Гурківський, М.С. Безбожна, О.В. Дорогова // *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво)*. – Вип. 73. – К.: ДП НДІБК, 2010. – С. 724–736.
12. Шкурупий, А.А. Расчет несущей способности неразрезных железобетонных балок с использованием деформационной модели с экстремальным критерием прочности / А.А. Шкурупий, Е.Н. Лазарева // *Технические науки: теоретические и прикладные аспекты: материалы Международной заочной научно-практической конференции*. – Новосибирск, 2012. – С. 143–153.
13. Крылов, С.М. Несущая способность статически неопределимых железобетонных балок из бетонов прочностью до 90 МПа, армированных высокопрочной стержневой арматурой / С.М. Крылов, Ю.П. Гуца, М.С. Абаканов // *Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности* / под ред. А.А. Гвоздева, С.М. Крылова. – М.: НИИЖБ, 1980. – С. 102–119.
14. Крылов, С.М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях, армированных сталями без площадки текучести / С.М. Крылов, Ю.П. Гуца, М.С. Абаканов // *Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций*. – М.: НИИЖБ, 1979. – С. 171–186.
15. Оатул, А.А. Исследование естественного распределения усилий в неразрезных железобетонных балках с ненапрягаемой арматурой при длительном действии эксплуатационной нагрузки / А.А. Оатул, В.П. Чирков // *Исследования по бетону и железобетону: сборник трудов № 34 Челябинского политехнического института*. – Челябинск: ЧОТУП, 1965. – С. 116–135.

Надійшла до редакції 17.10.2013

© О.А. Шкурупий