

УДК 624.012.25:539.431

**Д.Я. Кислюк***Луцький національний технічний університет***ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ ЗАТЯЖКИ НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ В ДВОХШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*Наведено методику розрахунку двошарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях. Наведені результати дослідження роботи арок при різних режимах одноразового та малоциклового навантаження з натягом затяжки.*

*Ключові слова:* залізобетон, двошарнірна арка, попереднє напруження, напружено-деформований стан, несуча здатність.

*Рис. 5. Табл. 2. Форм. 4. Літ. 8.*

**Д.Я. Кислюк****ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫДУЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗАТЯЖКИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ДВУХШАРНИРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРКАХ ПРИ ПОВТОРНЫХ НАГРУЗКАХ**

*Приведена методика расчета двухшарнирных железобетонных арок с учетом перераспределения усилий при повторных нагрузках. Приведены результаты исследования работы арок при разных режимах одноразовой и малоциклового нагрузки с натягом затяжки.*

*Ключевые слова:* железобетон, двухшарнирная арка, предварительное напряжение, напряженно-деформированное состояние, несущая способность.

**D. Ya. Kyslyuk****INFLUENCE OF PRE-STRESSING TIGHTENING THE TWO-HINGED REINFORCED ARCHES AT THE REPEATED LOADINGS**

*Concrete arches are widely used in the construction of various buildings. There are fixed arches, two-hinged arches, and three-hinged arches. The horizontal arch thrust is perceived with the tie, but also it can be transmitted on the other constructions such as frames and foundations. Arches which are used in industrial and civil building coverings and also in structures can be subjected to repeated loadings and sometimes to over-loadings which significantly influence on stress-deformation state of the arch sections and ties. There can be the redistribution of efforts between the upper zone arch and tie in two-hinged arches and it affects its hardness and strength. The influence of repeated loadings and possible redistribution of efforts in the arches calculations are not considered as current regulations. And the methodology of arches calculation with redistribution of efforts between the upper zone arch and tie is not developed yet.*

*The method of calculation the hinge two reinforced-concrete archs is resulted taking into account the redistribution of efforts at the repeated loadings. The of results of research of work of archs are at the different modes of the permanent and the repeated loadings stress with prestressing of efforts. There are new experimental data of two-hinged reinforced arches by the action of short-time and repeated loadings which perfected the methods of its calculation. Pre-stressing tightening reduces the maximal bending moment by 30% in the arch sections, which helps to reduce deflection and increase fracture arch.*

*Keywords:* reinforced concrete, tied arch, preliminary tension bearing ability, cycle of loading, stress-deformation state.

**Вступ.** Залізобетонні арки широко використовуються в складі поперечних рам виробничих будівель, в різних спеціальних спорудах. Під час експлуатації арки, як і інші будівельні конструкції можуть піддаватися повторним малоцикловим навантаженням, які можуть впливати на зміну механічних характеристик матеріалів, перерозподіл зусиль між елементами арок тощо [1, 2]. В останні тридцять років дослідженням роботи арок увага не приділялася, а як показали експериментальні дослідження двошарнірних та замкнутих залізобетонних рам, повторні навантаження суттєво впливають на прогини ригелів, ширину розкриття тріщин, внутрішній напружено-деформований стан тощо [3, 4, 5].

З огляду на наведене поставлено задачу експериментально встановити особливості роботи двошарнірних арок при дії на них повторних малоциклових навантажень з регулюванням зусиль і без, та порівняти їх з розрахунковими результатами.

Залізобетонні двошарнірні (статично невизначені) арки розраховують як пружні системи, приймаючи, що бетон і арматура під навантаженням працюють як абсолютно пружні матеріали, а в самих арках у розтягнутих зонах тріщини не утворюються. Розрахунок виконують методом сил (рис. 1):

$$X_1 \cdot \delta_{11} + \Delta_{1F} = 0, \quad (1)$$

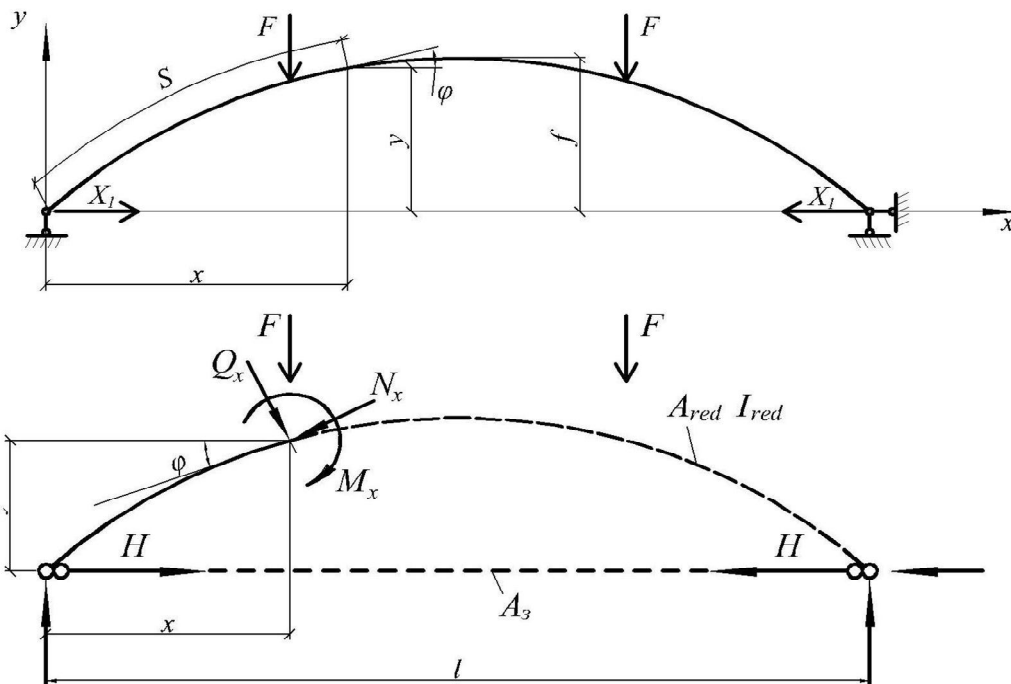


Рис. 1. Розрахункові схеми двохарнірної арки

Розрахунок розпору залізобетонних арок виконується з урахуванням деформацій елементів конструкції та впливу пружного обтискування арки.

$$k = l / \left[ l + \frac{15}{8f^2} \left( \frac{l}{A_{red}} + \frac{E_c I_{red}}{E_3 A_3} \right) \right] < 1. \quad (2)$$

Розпір в затяжці:

$$H = k \cdot X_1. \quad (3)$$

В дійсності бетон і залізобетон не є пружними матеріалами. В залізобетонних конструкціях у міру збільшення навантаження відбувається низка суттєвих змін. До деякої межі конструкції із залізобетону працюють без тріщин. При певному рівні навантаження в бетоні виникають пластичні (непружні) деформації (лінійні), а в розтягнутій зоні виникають і розвиваються тріщини. При наближенні до моменту вичерпання несучої здатності в найбільш напружених ділянках конструкції розвиваються нелінійні деформації бетону, на незначних або суттєвих ділянках порушується зчеплення арматури з бетоном, спостерігається текучість арматури. Всі ці процеси спричиняють перерозподіл зусиль у перерізах конструкцій.

Перерозподіл зусиль в статично невизначених залізобетонних конструкціях враховують на основі методу граничної рівноваги, в якому конструкцію розглядають як складену з окремих жорстких дисків, з'єднаних між собою пластичними шарнірами. Зусилля в арці можна перерозподілити таким чином, щоб отримати найбільший техніко-економічний ефект. З точки зору статичного розрахунку це рівноцінно множенню епюр згинальних моментів від зайвих невідомих на довільний коефіцієнт або додаванню до епюри моментів від зовнішнього навантаження, визначених за пружною роботою арок, додаткових епюр перерозподілу (рис. 2).

В двохарнірних арках перерозподіл зусиль відбувається в перерізах верхнього поясу арки і затяжці. Штучне регулювання зусиль, відбувається шляхом попереднього напруження затяжки, що дає змогу вплинути на перерозподіл зусиль.

Розрахунок зусилля попереднього натягу затяжки:

$$\Delta H = \frac{M_{s1} - M_{s2}}{y_1 + y_2} \quad (4)$$

Внаслідок перерозподілу зусиль максимальні значення згинальних моментів під зосередженими силами та протилежні значення моментів виявились однаковими. Це дає змогу більш економічно використати симетричне армування по всьому перерізу, знизити трудомісткість виготовлення конструкцій, покращити якість конструкцій.

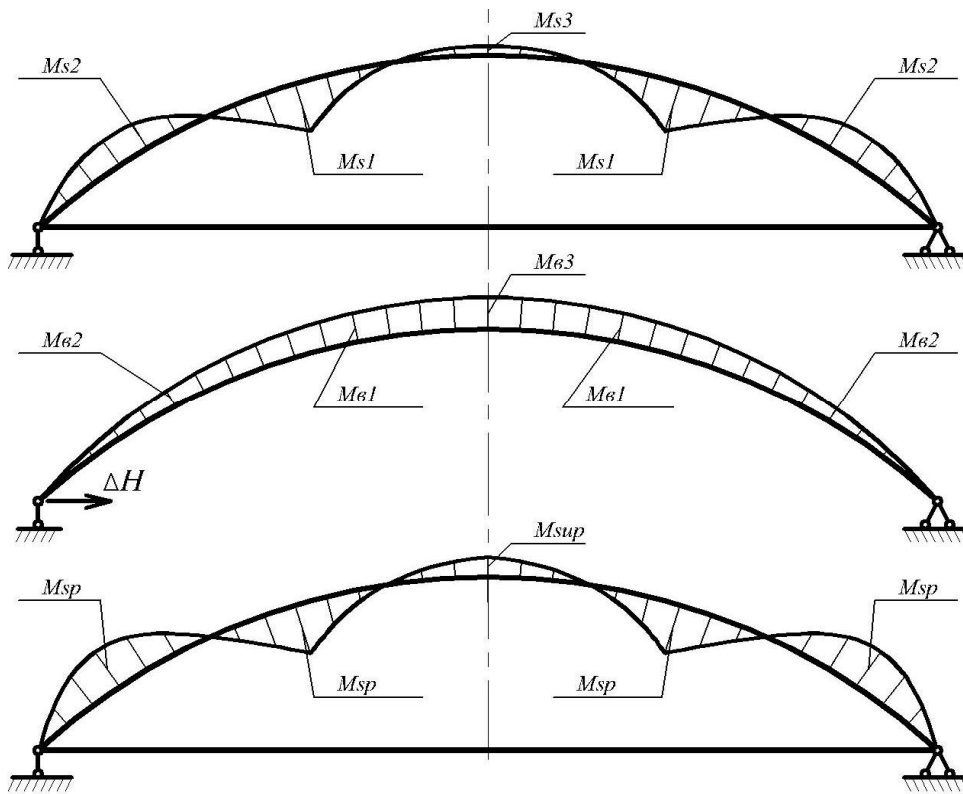


Рис. 2. Перерозподіл згинальних моментів в перерізах двошарнірної арки

На основі досліджень в будівельній лабораторії ЛуцькогоНТУ дійсної роботи двошарнірної залізобетонної арки із затяжкою при дії повторного навантаження було вирішено детальніше дослідити вплив попереднього натягу затяжки на зусилля які виникають в арці. Було випробувано залізобетонні двошарнірні арки, які мали загальну довжину 2160 мм зі стрілою підйому 40 см та поперечний переріз  $100 \times 140$  мм [6,7].

Робота арок вивчається в гідравлічному пресі, обладнаному спеціальними траверсами. Арки випробовувалися як вільно оперті з розрахунковим прольотом  $l=200$  см. Навантаження прикладувалося у вигляді зосереджених сил на відстані 40 см від осі симетрії арки через траверсу гідравлічним пресом (рис. 3) [6,7].

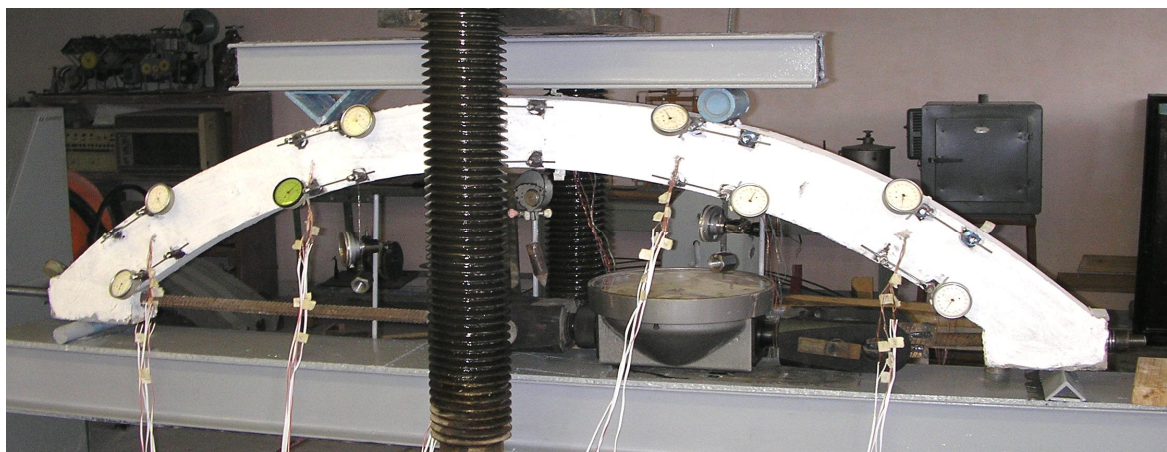


Рис. 3. Схема випробування арки

**Результати експериментальних досліджень.** Арка 2А-1 випробовувалась одноразовим монотонним навантаженням до руйнування, яке відбулося внаслідок роздроблення бетону на ділянці прикладання навантаження, рівного склала  $F_u = 106,5$  кН. Арка 2А-2 також випробовувалась одноразовим навантаженням до руйнування, однак на відміну від першої в роботу арки включали попереднє напруження затяжки. Значення додаткового зусилля визначали

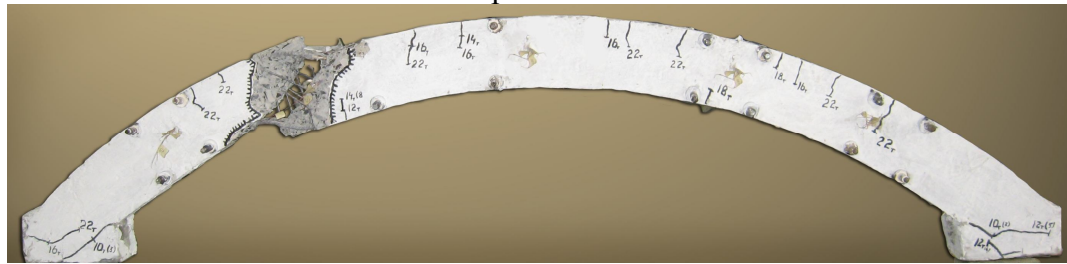
за допомогою розрахунку із врахуванням перерозподілу зусиль, яке становило  $\Delta H = 8$  кН. Руйнівне навантаження в арці 2А-2 склало  $F_u = 98,0$  кН. Арки 2А-3 і 2А-4 піддавали десятикратному мало цикловому навантаженню, також з попереднім напруженням затяжки. Для арки 2А-3 руйнівне навантаження склало  $F_u = 100,8$  кН, а для арки 2А-4 –  $F_u = 109,5$  кН. Арки руйнувалися в зоні дії максимального згинального моменту внаслідок роздроблення та зрізу стиснутого бетону (рис. 4) [7].



Арка 2А-1



Арка 2А-2



Арка 2А-4

Рис. 4. Характер руйнування арок другої серії

За допомогою розрахунку в ПК ЛИРА ставиться за мету змодельовати роботу двохарнірних залізобетонних арок та визначити числові значення зусиль, що виникають у перерізах арки та порівняти з результати дійсної роботи арок. Моделювання арки проводимо виходячи з дійсних характеристик матеріалів, в розрахунках враховуються закони нелінійного деформування матеріалів, а навантаження та результати обчислень відповідають кожному ступеню навантаження експериментального дослідження [8].

Для відтворення напружено-деформівного стану арок 2А-2, 2А-3, 2А-4, які випробовувались з попереднім напруженням затяжки, натяг задавали шляхом переміщення правого торця затяжки на шарнірно рухомій опорі. Попередній натяг затяжки складав  $\Delta H = 8,0$  кН, для співставлення результатів додатково розраховуємо  $\Delta H = 4,0$  кН та  $\Delta H = 12,0$  кН. В таблицях представлено результати розрахунків при монотонному та після дії повторних навантажень.

З отриманих результатів видно, що максимальний згинальний момент, при попередньому напруженні затяжки на 4кН зменшився на 6,1 %, при 8кН на 16,8 %, і при 12 кН на 31,3 % після врахування дії повторних навантажень. Аналізуючи результати обчислень, можна виділити, що зменшуються прогини арки, відбувається зменшення розтягнутої зони, але збільшується значення поздовжньої сили  $N$ . За рахунок попереднього натягу зменшилось значення згинальних моментів  $M$ , а дія повторних навантажень зменшила поздовжню силу  $N$ , що збігається з експериментальними даними (див. табл. 2).

Таблиця 1. Деформації змодельованої арки

№ n/n	$\Delta H$ кН	H кН	$\Delta_0$ мм	$\Delta$ мм		$f_0$ мм	f мм	
				1	2		1	2
1	0,0	142,6	0,0	4,58	5,79	0,0	5,31	6,49
2	4,0	146,6	-1,45	3,17	4,39	-1,42	3,5	5,15
3	8,0	150,6	-3,64	1,12	2,34	-3,65	2,16	3,29
4	12,0	154,6	-6,34	1,41	0,16	-6,44	0,49	1,54

Таблиця 2. Значення зусиль

№ n/n	$\Delta H$ кН	$M_0$ кНм	$N_0$ кН	$Q_0$ кН	M кНм		N кН		Q кН	
					1	2	1	2	1	2
1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	11,2	-164,0	-166	-51,8	-51,8
2	4,0	-1,3	-3,8	1,2	9,13	10,52	-170,1	-166,2	-50,65	-51,87
3	8,0	-2,7	-7,6	2,4	7,77	9,31	-173,9	-169,4	-49,44	-50,28
4	12,0	-4,1	-11,0	3,6	6,4	7,69	-177,7	-175,0	-48,22	-49,37

За отриманими результатами експерименту та результатами розрахунку в ПК ЛИРА 9.4 було побудовано діаграми напруження стиснутої зони перерізів арки (рис. 5).

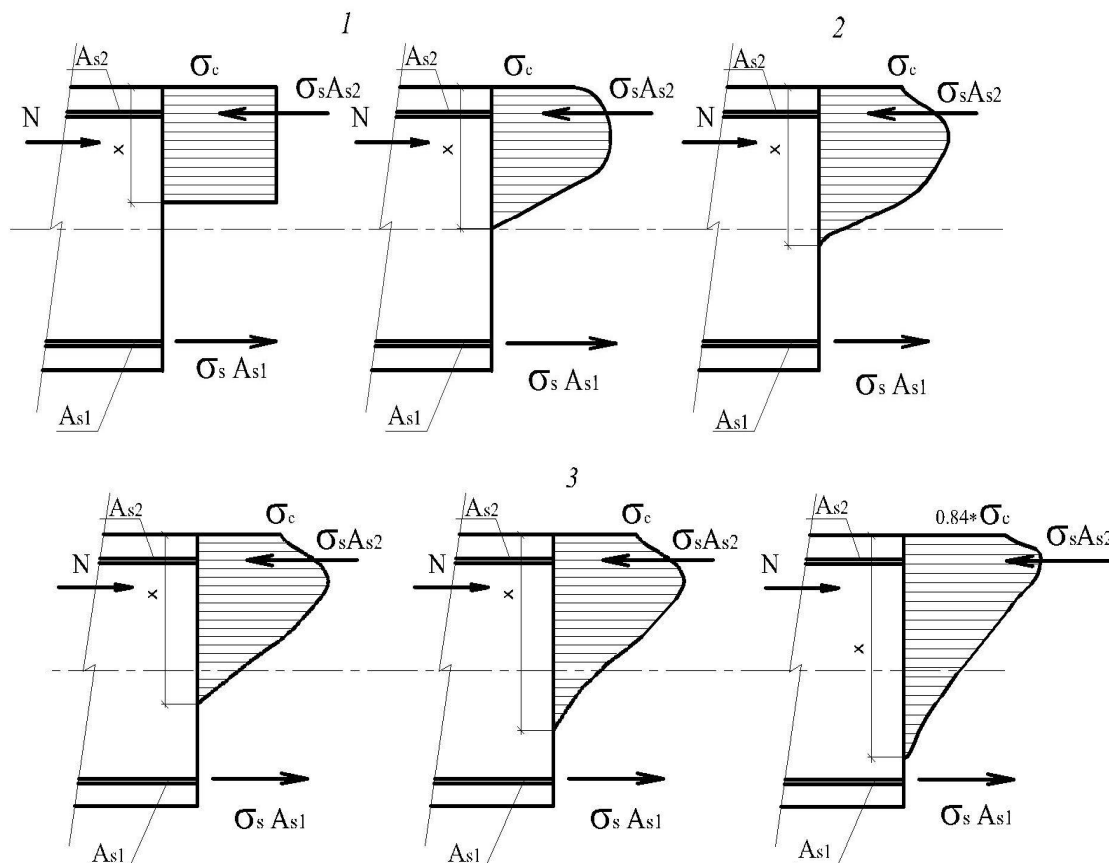


Рис. 5. Діаграми напружень стиснутої зони перерізів арки: 1 – СNiП 2.03.01-84 та ДБН В.2.6-98; 2 – без попереднього напруження; 3 – з попереднім натягом 4, 8, 12 кН

З отриманих результатів видно, що в різних випадках різна висота стиснутої зони. За СNiП 2.03.01-84  $x = 64$  мм та ДБН В.2.6-98  $x = 72$  мм за розрахунком ПК ЛИРА без попереднього напруження  $x = 80$  мм, за розрахунком ПК ЛИРА з попереднім натягом 4 кН.  $x = 85$  мм, 8 кН.  $x = 99$  мм, 12 кН.  $x = 118$  мм та при 4 кН.  $x = 80$  мм, 8 кН.  $x = 90$  мм, 12 кН.  $x = 103$  мм після повторних навантажень. В експериментальних арках другої серії з попереднім натягом затяжки 8 кН висота стиснутої зони  $x = 103$  мм в арці 2А-2 та  $x = 95$  мм після повторних навантажень в

арках 2А-3 і 2А-4. Крива напружень, побудована за СНиП 2.03.01-84, є прямокутною, вона не враховує зміни напружень по висоті стиснутої зони, при  $f_{cm} \approx \sigma_c$ . Зона розтягу в місці дії максимального згинального моменту при напруженні зтяжки на 4, 8, 12 кН відповідно зменшується на 20,5%; 44%; 70%. Після дії повторних навантажень розтягнута зона збільшується, але менша від початкового стану на 5,7%, 29% та 58%. Для арок з попереднім напруженням висота стиснутої зони  $x$  збільшується, а  $\sigma_c$  частково зменшується, але після повторних навантажень відповідає розрахунковому значенню.

Результати, отримані в ПК ЛИРА показали, що найбільш раціональне значення попереднього натягу зтяжки розраховане на основі сформульованих умов граничної рівноваги. За рахунок попереднього натягу зменшилось значення згинальних моментів  $M$ , а дія повторних навантажень зменшила поздовжню силу  $N$ , що збігається з експериментальними даними.

**Висновок.** Попереднє напруження зтяжки впливає на напружено-деформований стан в нормальному перерізі арки, зменшуються напруження стиснутого бетону, але збільшується його висота, та величина поздовжньої сили. Для раціонального знаходження значення попереднього напруження зтяжки можна використовувати метод граничної рівноваги, а для визначення напружено-деформованого стану, міцності та руйнівних навантажень в двохшарнірних арках числові методи скінченних елементів з використанням ПК ЛИРА.

1. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок / Барашиков А.Я. / Киев: Будівельник, 1977. – 156 с.
2. Бабич Є.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень / Бабич Є.М., Крусь Ю.О. / : Монографія. - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999. – 119 с.
3. Бабич Є.М. Вплив повторних навантажень на роботу замкнутих залізобетонних рам / Бабич Є.М., Філіпчук С.В. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2007. – Випуск 7. – С. 167-172.
4. Ільчук Н.І. Особливості роботи П-подібних залізобетонних рам при короткочасних малоциклових навантаженнях: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01.- Луцьк, 2007. – 229 с.
5. Бабич Є.М. Опір залізобетонних рам повторним навантаженням / Бабич Є.М., Ільчук Н.І. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2005. – Випуск 6. – С. 234-242.
6. Кислюк Д.Я. „Дослідження прогинів двохшарнірних залізобетонних арок з регулюванням зусиль в зтяжці при дії повторних навантажень” // Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 18 - Рівне : НУВГП, 2009р. – С. 215-220.
7. Кислюк Д.Я. „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторному навантаженні з попереднім напруженням зтяжки” / Кислюк Д.Я. / Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник Випуск №33 – Київ: КНУБА, 2009. – С. 186-194.
8. Кислюк Д.Я. „Порівняння дійсної роботи двохшарнірних з/б арок з теоретичними значеннями та нелінійним розрахунком в ПК Ліра 9.0”. // Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 19 – Рівне: НУВГП, 2009 р. – С. 171-177.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.