

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ

© Бабич Є.М., Філіпчук С.В., Ільчук Н.І., 2010

Встановлено особливості перерозподілу зусиль та зміни напружено-деформованого стану нормальних перерізів ригеля і стійок на циклах повторних малоциклових навантажень, а також визначення прогинів та ширини розкриття тріщин залізобетонних елементів, що зазнають дії повторних малоциклових навантажень.

Ключові слова: залізобетонна рама, напружено-деформований стан, перерозподіл зусиль, ширина розкриття тріщин, методика розрахунку.

Features of redistribution of efforts and changes is intense - deformed conditions of normal sections of a crossbar and racks on cycles of repeated few cycles of are established and also the definition of the deflection and the broadness of the openings of the fractures of the reinforced concrete elements, which undergo the influence of the repeated low-cycled loadings.

Keywords: reinforced concrete frame, stressed-deformed a state, redistribution of efforts, breadth of cracks opening, method of analysis.

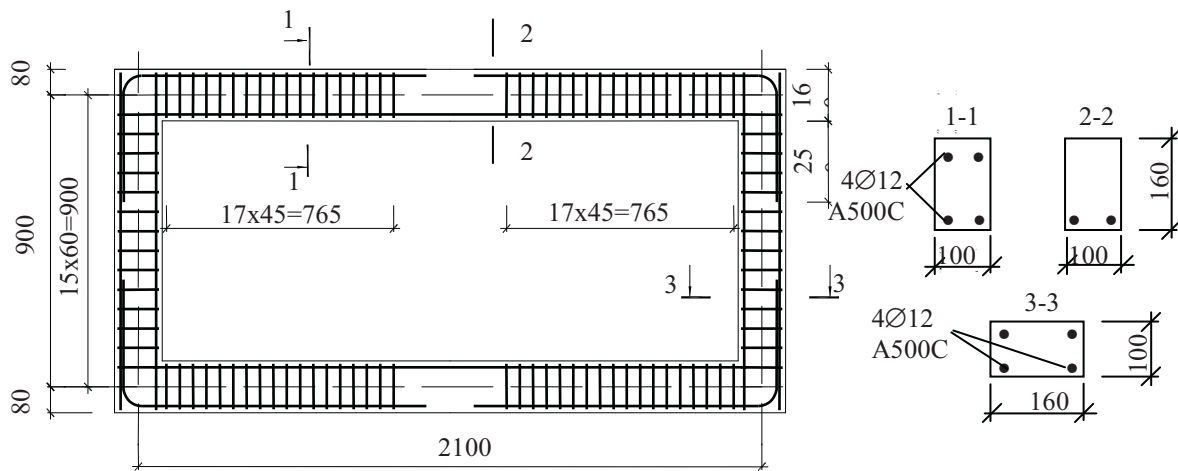
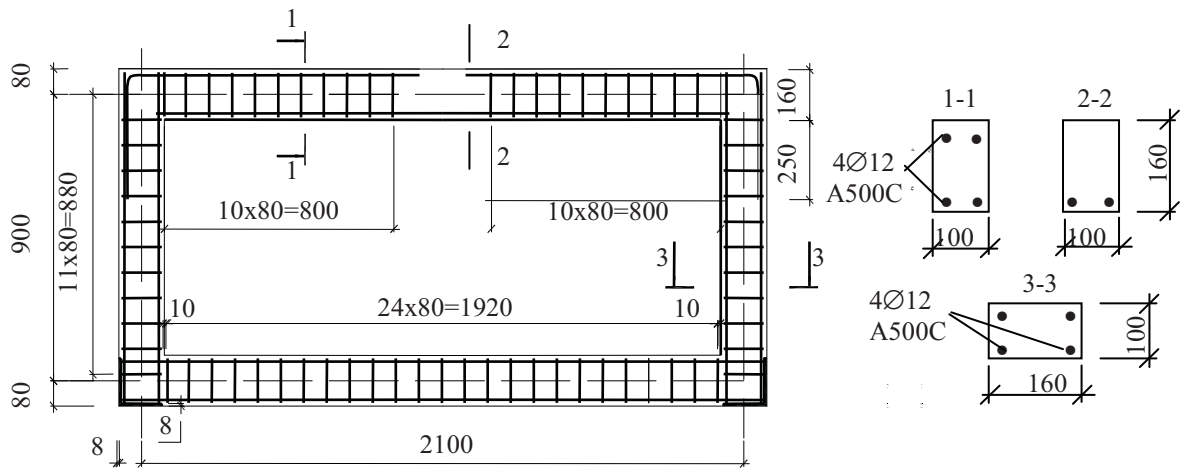
Вступ. У сучасних умовах під час проектування і зведення будівель та споруд розширюється використання статично невизначених залізобетонних конструкцій. Надання конструкціям статичної невизначеності дає змогу підвищити жорсткість, зменшити переміщення і забезпечити надійність систем.

Монолітні залізобетонні рами використовуються для підземних переходів, вбудованих приміщень на перших поверхах житлових будинків, при будівництві спортивних комплексів, виставкових павільйонів і залів, тунелів для прокладання комунікацій, при зведенні естакад, підсилювальних галерей тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здебільшого залізобетонні рами зазнають в процесі експлуатації дії повторних навантажень, які можуть впливати на зміну механічних характеристик матеріалів, процеси тріщиноутворення, деформації і загалом на напружено-деформований стан елементів рами. На жаль, дослідженням роботи рам, вивченню зміни перерозподілу зусиль в їх елементах при повторних навантаженнях приділялось недостатньо уваги. В цьому напрямі відомі роботи, виконані під керівництвом А.Я. Барашикова [2], та деякі інші [6].

З огляду на наведене експериментальні дослідження роботи залізобетонних рам при дії повторних навантажень є актуальним завданням, вирішенням якого частково можуть слугувати результати дослідів, наведені нижче.

Конструкція дослідних рам та методика їх випробовувань. У комплексі експериментальних досліджень виконано досліди, в яких монолітні рами були замкнуті і П-подібні (рис. 1, 2). Армування поперечних перерізів ригеля в прольоті і у вузлах прийнято однаковим, тобто передбачалась можливість перерозподілу зусиль під час навантаження рам. Верхні стержні у вузлах ригеля заокруглені і заведені в стійки за нижню грань ригеля. Поперечна арматура в стійках і ригелі виконані у вигляді замкнених зварених рамок зі стержнів $\varnothing 4Bp-I$.



a

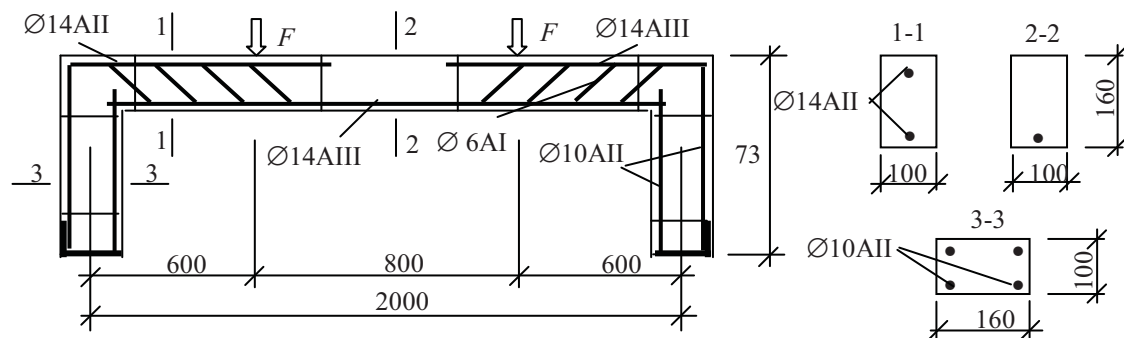
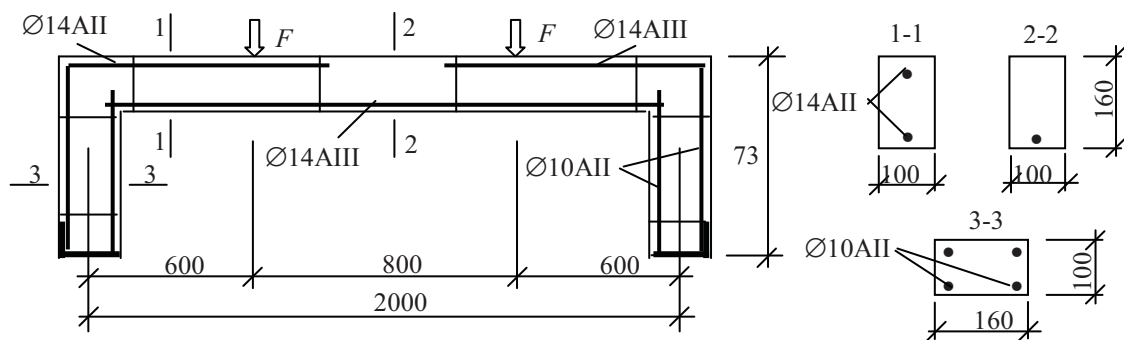


Рис. 1. Конструктивна схема дослідних рам: а – замкнута; б – П-подібна

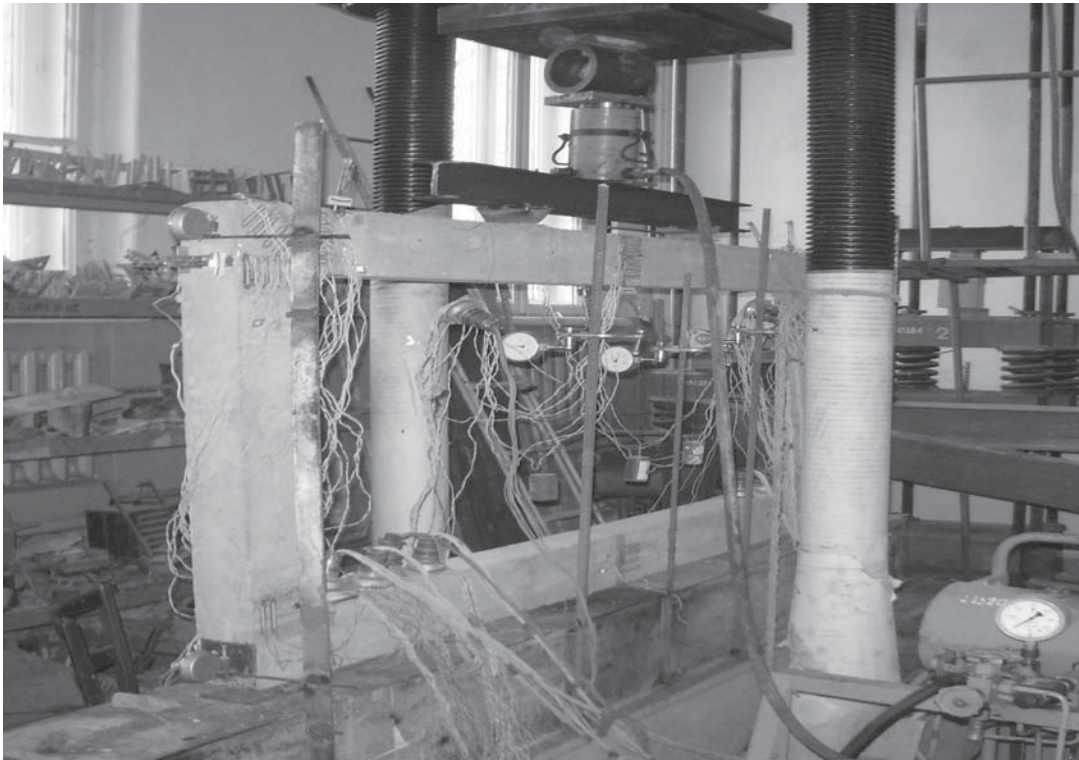


Рис. 2. Загальний вигляд випробовування дослідних рам

Загалом виготовлено і досліджено 19 залізобетонних рам.

Для виготовлення зразків замкнутих рам використовували важкий бетон класів В25, В20 і В15 й арматуру класу А500С діаметром 12 мм. У П-подібних рамах використовувався бетон класу В15 і повздовжня арматура класу А-III діаметрами 10 та 14 мм.

Випробовування рам виконували за схемою двошарнірної системи в спеціальній установці, завантажуючи двома зосередженими силами ригель. Зусилля створювали гідравлічним домкратом, а силу вимірювали протарованим кільцевим динамометром та контролювали показники манометрів насосної станції.

Під час випробувань деформації матеріалів контролювали такими вимірювальними приладами: прогини зразка – прогиномірами 6 ПАО – ЛИСИ, ширину розкриття тріщин – мікроскопом МПБ – 3, деформації бетону – індикаторами годинникового типу, деформації арматури – тензометрами Гугенбергера. Всі механічні прилади дублювали електричними тензорезисторами.

Результати дослідження рам. При однократних навантаженнях на початкових ступенях навантаження прогини ригеля, деформації в арматурі і бетоні збільшувалися практично лінійно. Надалі зі збільшенням навантаження став помітним перерозподіл зусиль внаслідок тріщиноутворення та виникнення пластичних деформацій в бетоні [3].

У результаті виконаних досліджень отримано нові експериментальні дані про перерозподіл зусиль та напружено-деформований стан перерізів замкнутих та П-подібних залізобетонних рам при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях. Підтверджено, що перерозподіл зусиль в рамах відбувається внаслідок тріщиноутворення в розтягнутій зоні бетону та розвитку пластичних деформацій в розтягнутій арматурі, а також встановлено, що пластичні шарніри в перерізах можуть виникати також внаслідок пластичного деформування бетону, коли він працює на низхідній вітці діаграми деформування.

Повторні навантаження рам виявили особливості зміни напружено-деформованого стану перерізів їх елементів. На першому циклі повторних навантажень рам характер роботи був ідентичний роботі рам за одноразового навантаження. Проте при розвантаженні виникли значні

залишкові деформації як в бетоні, так і в арматурі, що становили близько 86 % від загальних залишкових деформацій. До шостого циклу спостерігалася стабілізація напружено-деформованого стану. Так, залишкові деформації становили близько 96 %, а повні – 94 % від загальних. Аналогічна ситуація склалася з прогинами та шириною розкриття тріщин.

Стабілізація напружено-деформованого стану елементів рам відбувається залежно від рівня повторних навантажень на п'ятому–сьомому циклах. Збільшення деформацій при повторних навантаженнях порівняно з однократними становило 40,6 %, прогинів – 37,7 %, а ширини розкриття тріщин – 41,7 % (рис. 3, табл. 1, 2).

Зусилля розпору в П-подібних залізобетонних рамах практично лінійно залежать від зовнішнього навантаження, але внаслідок перерозподілу зусиль їх значення більші (до 50 %) від розпору, за умови пружної роботи рам [4]. Після повного розвантаження рам у них виникають залишкові розпори, які викликають виникнення зусиль в ригелях і стійках, але їх значення не перевищують 2 % від максимального розпору при руйнуванні і на напружено-деформований стан рам практично не впливають.

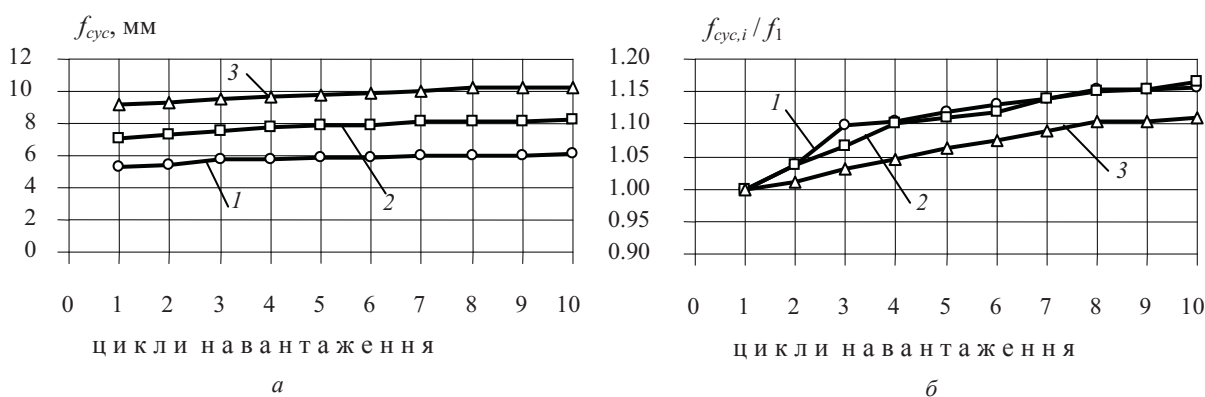


Рис. 3. Зміна прогинів середини ригелів рам по циклах навантаження за абсолютними значеннями (а) та відношення прогину на циклах навантаження до прогину на першому циклі (б)

Таблиця 1

Відношення прогинів на циклах навантаження до прогинів на перших циклах $f_{cyc,i} / f_1$ у П-подібних рамах

Цикли навантаження	Рама 2Р-2	Рама 2Р-3		Рама 2Р-4		
	$F_{cyc} = 22,5$ кН	$F_{cyc} = 22,5$ кН	$F_{cyc} = 27,5$ кН	$F_{cyc} = 22,5$ кН	$F_{cyc} = 27,5$ кН	$F_{cyc} = 32,5$ кН
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,04	1,15	1,04	1,28	1,13	1,01
3	1,10	1,20	1,06	1,33	1,17	1,03
4	1,10	1,23	1,10	1,33	1,17	1,05
5	1,12	1,24	1,11	1,37	1,20	1,06
6	1,13	1,28	1,12	1,39	1,21	1,08
7	1,14	1,29	1,14	1,39	1,22	1,09
8	1,15	1,31	1,15	1,40	1,23	1,10
9	1,15	1,31	1,15	1,41	1,24	1,11
10	1,16	1,33	1,17	1,42	1,25	1,11

**Зміна відносної ширини розкриття тріщин $a_{cr,cyc,i}/a_{cr,c1}$ у ригелі рам
при повторних навантаженнях**

Цикли	2Р-2	2Р-3		2Р-4		
	$F=22,5$ кН	$F=22,5$ кН	$F=27,5$ кН	$F=22,5$ кН	$F=27,5$ кН	$F=32,5$ кН
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,17	1,06	1,05	1,04	1,03
3	1,04	1,25	1,10	1,19	1,07	1,03
4	1,13	1,42	1,23	1,43	1,26	1,16
5	1,13	1,63	1,42	1,48	1,30	1,22
6	1,17	1,75	1,48	1,52	1,33	1,28
7	1,25	1,79	1,52	1,62	1,44	1,34
8	1,25	1,79	1,52	1,62	1,44	1,38
9	1,29	1,79	1,52	1,67	1,48	1,38
10	1,29	1,79	1,55	1,76	1,56	1,44

При поступовому збільшенні рівня повторних навантажень від 0,35 до 0,8 від руйнівних на кожних наступних шести циклах заданого навантаження спостерігалася стабілізація напружено-деформованого стану рам.

Збільшення рівня навантажень, після стабілізації роботи рам, призводило до зростання як залишкових (до 66,4 %), так і повних (до 55,1 %) деформацій бетону та арматури, а також збільшення залишкових та повних прогинів ригелів рам і сприяють інтенсивнішому перерозподілу зусиль в елементах рам. Таке збільшення прогинів ригелів залежно від рівня й циклів довантаження може коливатись в межах 30 ... 60 %.

Повторні навантаження високих рівнів (80 % від руйнівних і більше) значно збільшують деформації в бетоні і арматурі, ширину розкриття тріщин, прогини ригелів рам і можуть призвести до малоциклового втомленого руйнування рами.

Поряд з вимірюванням горизонтальних переміщень в замкнених рамах вимірювалися і вертикальні зміщення вузлів рам. Горизонтальні переміщення при вертикальній дії зовнішнього навантаження виявилися незначними, і ними можна нехтувати. Натомість вертикальні переміщення вузлів рам досягли 83,4 % від прогину ригеля, що істотно впливає на визначення прогину ригелів рам.

На сучасному етапі розвитку теорії залізобетону удосконалення розрахунку міцності і деформативності нормальних перерізів залізобетонних елементів в загальному вигляді пропонується виконувати з використанням повних діаграм деформування бетону. Аналіз результатів показав, що теоретичні значення мають задовільну збіжність з експериментальними даними.

У статично невизначених залізобетонних рамах за умови їхньої пружної роботи переміщення (прогини) Δ_p під дією зовнішнього навантаження у загальному вигляді можна знайти за формулою:

$$\Delta_p = \sum \int \frac{\bar{M}_k M_p}{EI} ds + \sum \int \frac{\bar{N}_k N_p}{EA} ds + \sum \int \mu \frac{\bar{Q}_k Q_p}{GA} ds, \quad (1)$$

де $\bar{M}_k; \bar{N}_k; \bar{Q}_k$ – відповідно епюри моментів, поздовжніх та поперечних сил від дії одиничної сили $\bar{P}_k=1$, прикладеної в точці k в напрямку відшукуваного переміщення; $M_p; N_p; Q_p$ – відповідно епюри моментів, поздовжніх і поперечних сил від дії зовнішнього навантаження; I і A – момент інерції та площа поперечного перерізу елементів рам; E і G – відповідно модуль пружності і модуль зсуву матеріалу; μ – коефіцієнт форми поперечного перерізу елементів.

При визначенні переміщень в системах, які працюють переважно на згин (балки, рами, пологі арки тощо), другим і третім членом правої частини формули (1) можна нехтувати, оскільки переміщення, викликані поздовжніми і поперечними силами, дуже малі.

Необхідно враховувати вплив повторних навантажень на прогини ригеля рам, що можна здійснити введенням до формули (1) коефіцієнта умов роботи γ_{cyc} . Враховуючи сказане, формулу для визначення прогинів ригеля можна записати у вигляді

$$\Delta_p = \gamma_{cyc} \sum \int \frac{\bar{M}_k M_p}{B} ds, \quad (2)$$

де B – жорсткість елементів рами з урахуванням виникнення пластичних деформацій бетону та наявності тріщин в бетоні розтягнутих зон; γ_{cyc} – коефіцієнт умов роботи, який враховує вплив повторних короточасних навантажень на розвиток прогинів ригеля рам.

Звідси випливає, що прогин, визначений згідно зі СНиП 2.03.01-84*, також необхідно множити на коефіцієнт умов роботи $\gamma_{f,cyc}$, тобто прогин від дії згинних деформацій визначатимемо за формулою:

$$f_m = \gamma_{f,cyc} \int_0^l \bar{M}_x \left(\frac{1}{r} \right)_x dx, \quad (3)$$

де \bar{M}_x – згинальний момент у перерізі x від дії одиничної сили, яка діє у напрямі прогину, що відшукується, по довжині елементів; $\left(\frac{1}{r} \right)_x$ – кривина елемента в перерізі x від зовнішнього навантаження, визначається згідно зі СНиП 2.03.01-84*.

На підставі виконаних досліджень та порівняння експериментальних значень прогинів ригелів рам з теоретичними значення коефіцієнта умов роботи можна приймати таким, що дорівнює $\gamma_{f,cyc} = 1,20$.

Для рам, що зазнавали повторних короточасних навантажень без довантаження, в розрахунок ширини розкриття тріщин за СНиП 2.03.01-84* необхідно ввести додатковий коефіцієнт умов роботи $\gamma_{cre,cyc} = 1,3$, і формула набуде вигляду:

$$a_{cre} = \gamma_{cre,cyc} \eta \delta \lambda \frac{\sigma_s}{E_s} d, \quad (4)$$

Наведені коефіцієнти дійсні при режимах навантаження $(0,6-0,65)F_u$, а для встановлення цих коефіцієнтів при інших режимах навантаження, зокрема і довантаження рам, необхідні додаткові дослідження.

1. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. – Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999. – 119 с.
2. Мурашко Л.А., Барашиков А.Я., Кольшєнко Н.Н. Экспериментальные исследования влияния режима нагружения на деформативность железобетонных замкнутых рам // Прочность и деформативность железобетонных конструкций. – К.: Будівельник, 1978. – С. 28–33.
3. Філіпчук С.В. Робота замкнутих залізобетонних рам при повторних малоциклових навантаженнях: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / С.В. Філіпчук. – Рівне, 2009.
4. Ільчук Н.І. Особливості роботи п-подібних залізобетонних рам при короточасних малоциклових навантаженнях: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Н.І. Ільчук. – Луцьк, 2007.
5. Бабич Є.М., Філіпчук С.В. Вплив повторних навантажень на роботу замкнутих залізобетонних рам // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2007. – Випуск 7. – С. 167–172.
6. Кальшєнко Н.Н. Исследование длительных деформаций замкнутых рам: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Н.Н. Кальшєнко. – К., 1977. – 182 с.
8. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Визначення граничного навантаження на двошарнірні залізобетонні рами на основі деформаційної моделі перерізів / Сталезалізобетонні конструкції: Збірник наукових статей. – Кривий Ріг, 2004. – Випуск 6. – С. 174–180.