

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ П-ПОДІБНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ З УРАХУВАННЯМ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ

PECULIARITIES OF CALCULATION OF U-SHAPED REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH REDISTRIBUTION OF MOMENTS

Ковальчук Ю. Т., аспірант, ORCID 0000-0002-7199-1978. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Kovalchuk Y. T., postgraduate, ORCID 0000-0002-7199-1978 (National University of Water Management and Nature Resources Use. Rivne)

Розроблена методика розрахунку П-подібних рам з урахуванням перерозподілу зусиль між перерізами елементів внаслідок появи пластичного деформування матеріалів. Доведено, що доцільно проектувати П-подібні рами, в яких колони жорстко з'єднані з ригелем та шарнірно з фундаментом, а відношення жорсткості перерізу колони до жорсткості поперечного перерізу ригеля приймати близько 0,5. Розрахунками рами прольотом 6 м показано, що врахування перерозподілу зусиль дає можливість зекономити до 12% арматури, зменшити її номенклатуру та спростити армування елементів рами.

Reinforced concrete frames are used for the construction of both single-storey and multi-storey industrial and civil buildings and structures, as well as in hydraulic and transport construction. The frame systems are widely used in the engineering due to their high reliability while having vertical and horizontal loads of different nature. The use of the reinforced concrete frame systems is especially important now in the construction of new civil and industrial buildings with underground floors, which provide for the installation of built-in dual-use premises with protective characteristics of storage facilities. Therefore, the method of calculating the frames needs to be further improved.

The modern practice of designing of reinforced concrete frames contains a contradiction, in which the static calculation is based on the use of structural mechanics for homogeneous elastic systems, but the bearing capacity of cross-sections of frame elements is performed by deformation technique based on elastic-plastic properties of the materials. Based on this, the article improves the method of calculation of U-shaped reinforced concrete frames with the redistribution of moments due to elastic-plastic deformation of materials.

As a result of the researches it was discovered which types of frames are recommended to be calculated with redistribution of moments, the method of calculation of moments in frame elements is developed, influence of a parity of rigidity of a column and a crossbar on moment redistribution is established. It

is proved that the calculation of U-shaped reinforced concrete frames with the redistribution of forces makes it possible to reduce the cost of reinforcement to 12% and simplify the reinforcement of frame elements.

Ключові слова:

Залізобетонні рами, перерозподіл зусиль, розрахунок, ефективність.
Reinforced concrete frames, moment redistribution, calculation, efficiency.

Вступ. Залізобетонні рами представляють собою стержневу конструкцію, геометрична незмінність якої досягається жорстким з'єднанням елементів у вузлах. В сучасному будівництві рамні конструкції являються одним із основних несущих елементів будівель і споруд. Залізобетонні рами застосовуються для зведення як одноповерхових, так і багатоповерхових промислових і цивільних будівель та споруд, а також в гідротехнічному та транспортному будівництві. Широке використання в будівництві рамних систем пояснюється їх високою надійністю при сприйманні вертикальних і горизонтальних навантажень різного характеру, в тому числі і динамічних.

Особливе значення використання рамних залізобетонних систем набуває наразі при зведенні нових цивільних і промислових будівель з підземними поверхами, в яких передбачається влаштування вбудованих приміщень подвійного призначення з захисними характеристиками сховищ. В таких будівлях доцільно підземну частину виконувати каркасною з використанням монолітних П-подібних залізобетонних рам. Такі рами можуть також використовуватися і при зведенні окремо розташованих будівель цивільного захисту.

Сучасну методика розрахунку залізобетонних рам не можна вважати досконалою. Одним із протиріч в цих методиках є те, що статичний розрахунок залізобетонних рам базується на використанні положень будівельної механіки для однорідних пружних систем, а безпосередньо несучу здатність поперечних перерізів елементів рам виконують за деформаційною методикою, яка базується на пружно-пластичних властивостях матеріалів. Виникнення непружних деформацій в бетоні та арматурі в статично невизначених залізобетонних конструкціях призводить до зміни напружено-деформованого стану перерізів, а також до перерозподілу в них внутрішніх зусиль. На думку багатьох дослідників перерозподіл зусиль може бути використаним для регулювання несучої здатності окремих елементів конструкції, досягаючи цим найбільш оптимальних конструктивних, технологічних та економічних рішень.

З наведеного випливає, що удосконалення розрахунку статично невизначених залізобетонних рам з урахуванням перерозподілу зусиль є актуальною задачею. В цій статті на прикладі П-подібної залізобетонної рами розглянуто процес перерозподілу зусиль, спосіб його застосування для покращення техніко-економічних показників рам.

Стан питання та задачі дослідження. Визначення зусиль від зовнішнього навантаження в статично невизначених залізобетонних конструкціях

традиційно виконується за допомогою методів будівельної механіки, в яких передбачається, що матеріали і конструкції ідеально пружні, їх жорсткість не залежить від величини й тривалості дії навантаження, а незначні деформації, які виникають, дозволяють вважати незмінними геометричні характеристики.

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, 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, напруження в арматурі можуть досягати межі текучості. В таких перерізах виникають пластичні шарніри, які характеризуються постійним значенням згинального моменту при збільшенні зовнішнього навантаження.

Унаслідок наведених обставин напружено-деформований стан статично невизначених залізобетонних конструкцій як в умовах експлуатації, так і на межі несучої здатності може суттєво відрізнятись від стану, який визначається розрахунком пружної системи. Непружні деформації й утворення тріщин спричиняють перерозподіл зусиль, який обумовлює значний вплив на несучу здатність конструкцій, а також на їх жорсткість і тріщиностійкість. Відхилення дійсних напружень і деформацій від визначених в пружній стадії називають перерозподілом зусиль.

Про перерозподіл зусиль в статично невизначених конструкціях було відомо ще на початку минулого століття, але тільки в сорокові роки почали вивчати пластичні властивості нерозрізних залізобетонних конструкцій. Це пояснюється тим, що в ті часи розрахунок міцності елементів залізобетонних конструкцій за допустимими напруженнями (за пружною роботою бетону). Тільки з розвитком методів розрахунку міцності конструкцій з урахуванням пластичних властивостей матеріалів збільшилася кількість досліджень роботи статично невизначених конструкцій, але в основному нерозрізних балок. І на сьогодні досліджень рамних конструкцій виконано обмаль. Не дивлячись на це, в державних нормах проектування залізобетонних конструкцій [1] вказується на необхідність враховувати перерозподіл зусиль в елементах внаслідок нелінійних деформацій бетону і арматури.

Серед експериментальних досліджень П-подібних залізобетонних рам можна відмітити досліди В. Ч. Гленвіля і Ф. Д. Томаса [2], в яких вузли з'єднання ригеля з колонами були жорсткі, а обпирання колон на фундамент шарнірним. В досліді залежно від процента армування колон (від $\mu=0,6$ до $3,1\%$) встановлено, що внаслідок перерозподілу зусиль несуча здатність рам зростала на 50 – 150%. Також зазначається в роботі, що в рамах не відбувся повний перерозподіл зусиль.

Значні експериментальні дослідження замкнених і П-подібних рам виконані під керівництвом професора Барашикова А. Я. [3]. В досліді ретельно вивчалися особливості роботи рам при тривалих постійних та періодичних навантаженнях. На основі отриманих експериментальних даних теоретично обґрунтована методика розрахунку рам з урахуванням реальних властивостей матеріалів та режимів навантаження. В цих роботах безпосередньо питання перерозподілу зусиль в елементах рам не розглядалися.

Важливі результати експериментальних досліджень залізобетонних рам висвітлені в роботі [4]. Виконано випробування 8-ми двохшарнірних П-подібних рам та 11 замкнених залізобетонних рам, в процесі яких досконало досліджувався вплив на напружено-деформований стан рам повторних навантажень різних рівнів. В цих досліді відмічено, що перерозподіл зусиль в елементах рам може відбуватися внаслідок утворення пластичних шарнірів із-за пластичного деформування бетону стиснутої зони, коли він працює на низхідній ділянці повної діаграми деформування, а також внаслідок пластичного деформування поздовжньої розтягнутої арматури. Також докладно аналізується вплив тріщиноутворення на напружено-деформований стан елементів рам при короткочасному та повторному навантаження. Детального аналізу перерозподілу зусиль в дослідних рамах та його теоретичного обґрунтування не наводиться.

З аналізу наведеного для дослідження визначені такі задачі: виявити конструктивні схеми П-подібних рам, які доцільно розраховувати з урахуванням перерозподілу зусиль; розробити пропозиції щодо визначення внутрішніх зусиль в елементах рам з рахуванням перерозподілу зусиль; виконати аналіз армування рам, розрахованих як пружних систем та з урахуванням перерозподілу зусиль.

Конструктивні схеми П-подібних рам та їх особливості. В статті розглядаються одноповерхові залізобетонні рами, які можуть бути одно або багато пролітними і складаються з ригеля та колон. Конструктивна схема таких рам залежить від функціонального призначення будівлі і її архітектурно-планувального рішення, характеру та величини навантаження, гідрогеологічних умов та інших специфічних експлуатаційних вимог. Розрахункова схема рам встановлюється з урахуванням характеру з'єднання колон з ригелем та фундаментом (рис. 1).

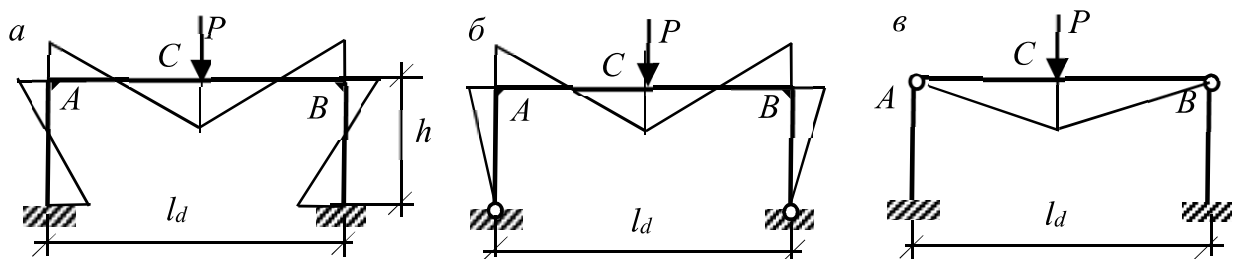


Рис. 1. Розрахункові схеми П-подібних залізобетонних рам та характер епюр згинальних моментів від дії зовнішнього навантаження P

Рами з жорстким з'єднанням колон з ригелем та фундаментом (рис. 1а) мають найбільшу просторову жорсткість, чинять суттєвий опір горизонтальним навантаженням, але вони чутливі до деформацій фундаментів (повороти, осідання), внаслідок чого може змінюватися напружено-деформований стан всієї рами. Крім цього, по довжині колон виникає знакозмінний згинальний момент від зовнішнього навантаження (вертикального і горизонтального), що може призвести до перевитрати робочої арматури.

Конструктивна схема рами, яка наведена на рис. 1б, найбільш прийнятна для зведення одноповерхових будівель. Шарнірне з'єднання колони з фундаментом мінімізує вплив деформацій фундаментів на їх роботу, в колонах епюра моментів по довжині практично однозначна. В таких рамах чітко проявляється перерозподіл зусиль у вузлах з'єднання колон з ригелем та перерізах в його прольоті.

Рами з шарнірним з'єднанням колон з ригелем і жорстким з фундаментом (рис. 1в) мають одну статичну невизначеність, а тому перерозподілу зусиль в них не спостерігається. Такі рами, в основному використовують для зведення одноповерхових виробничих будівель.

Визначення зусиль в П-подібній рамі з урахуванням їх перерозподілу.

Розглядається одно пролітна рама з шарнірними опорами та жорстким з'єднанням з колонами (рис. 2).

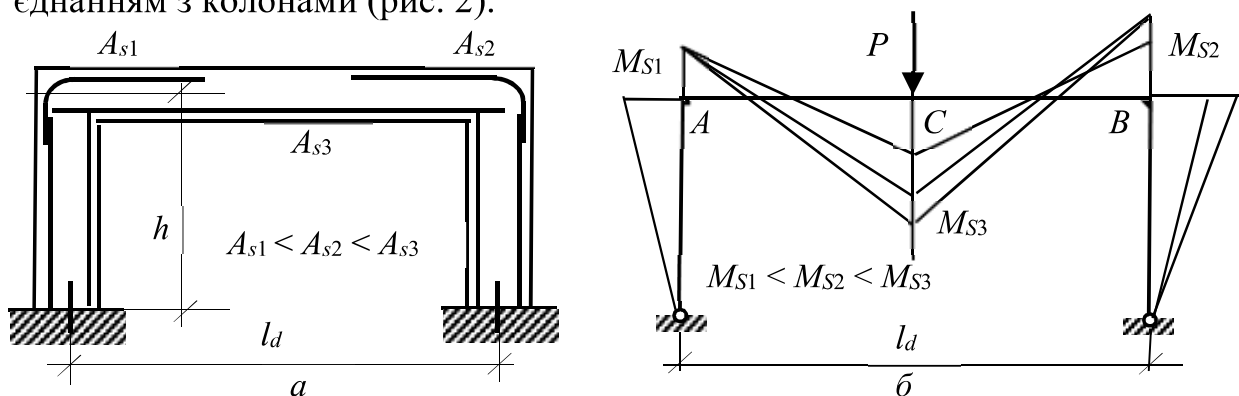


Рис. 2. Конструктивна (а) та розрахункова (б) схеми П-подібної рами та процес перерозподілу зусиль

Рама завантажена в середині ригеля зосередженою силою P , умовно вважається, що горизонтальне навантаження відсутнє. За статичним розрахунком рами як пружної системи визначені внутрішні зусилля і підібрана арматура для армування ригеля, колони та вузлів (рис. 2а). При цьому виявилось що найменша площа A_{s1} арматури необхідно влаштувати у вузлу A , більша площа A_{s2} потрібна у вузлу B , а найбільша площа A_{s3} – в прольоті.

За прийнятою розрахунковою площею арматурою за деформаційною методикою визначені граничні моменти M_S , які можуть сприйняти характерні перерізи ригеля і колон перед утворенням пластичних шарнірів, при цьому співвідношення між моментами аналогічне, як і між площею арматури

(рис. 2б). Прийнято, що граничні моменти в ригелі і колонах в перерізах біля вузлів однакові.

При початковому навантаженні рами силою P рама працює як пружна система і внутрішні зусилля пропорційні цьому навантаженню. При збільшенні навантаження в перерізах біля вузла A , оскільки тут найменша площа арматури, будуть розвиватися пластичні деформації як в бетоні, так і в арматурі і при певному значенні навантаження P_1 , якому відповідає згинальний момент M_{E1} , утвориться пластичний шарнір, а напружений стан в перерізі буде знаходитися в умовах граничної рівноваги $M_{E1} = M_{S1}$.

Наслідком утворення першого пластичного шарніру буде зменшення статичної невизначеності рами на одиницю, а її руйнування не відбудеться, оскільки в ній є ще жорсткі в'язі. При подальшому збільшенні навантаження P будуть зростати згинальні моменти в перерізах біля вузла B та в прольоті, а біля вузла A пластичні деформації матеріалів дещо будуть збільшуватися при постійних внутрішніх зусиллях. В процесі збільшення навантаження може наступити ситуація, коли в перерізах біля вузла B при P_2 внаслідок розвитку пластичних деформацій утвориться другий пластичний шарнір і наступить стан граничної рівноваги $M_{E2} = M_{S2}$.

Після утворення другого пластичного шарніру у вузлу B руйнування рами не наступить і вона може сприймати збільшення навантаження. І тільки при утворенні пластичного шарніру в середині прольоту при навантаженні $P_3 = P_u$ коли $M_{E3} = M_{S3}$ (рис. 2б) вся рамна система переходить в стан граничної рівноваги, в усіх жорстких в'язях утворилися пластичні шарніри, а сама рама перетворилася в механізм, будь яке мінімальне збільшення навантаження призводить до руйнування.

Наведене свідчить, що в статично невизначених залізобетонних конструкціях є можливість регулювати процес утворення пластичних шарнірів. Практика свідчить, що в нерозрізних конструкціях досягається економія арматури та спрощується армування у випадках, коли вирівняні опорні і прольотні моменти, а їх абсолютні значення практично однакові. Для даного випадку можна прийняти умову $M_{E1} = M_{E2} = M_{E3} = M_E$, де M_E – вирівняний момент від зовнішнього навантаження.

При визначенні моменту M_E можна скористатися правилом будівельної механіки, що не в розрізних конструкціях напівсума значень опорних моментів спільно з прольотним моментом повинні дорівнювати балочному моменту M_0 , тобто $0,5(M_{E1} + M_{E2}) + M_{E3} = M_0$. Для ригеля при зосередженому навантаженні максимальний балочний момент буде дорівнювати

$M_0 = (P_u l_d^2)/4$. З цих залежностей можна отримати формулу для визначення опорних і прольотних моментів в ригелі рами від дії зовнішнього навантаження з урахуванням перерозподілу зусиль у вигляді

$$M_E = (P_u l_d^2)/8. \quad (1)$$

В рамках на перерозподіл зусиль впливають жорсткості елементів, які з'єднуються у вузлах (з'єднання ригеля з колоною). Це можна прослідкувати на перерозподілі зусиль в рамках з варіантами поперечного перерізу ригеля або колон. На рис. 3 наведена розрахункова схема трьох рам, в яких ригель прийнятий постійного прямокутного перерізу з розмірами $b_p \times h_p = 0,3 \times 0,6$ м. Ширина колон також для однакова для всіх рам і рівна $b_k = 0,3$ м. Висота поперечного перерізу колон для рам Р-1, Р-2 і Р-3 відповідно рівні $h_{k1} = 0,6$; $h_{k2} = 0,5$ і $h_{k3} = 0,4$ м. Відношення жорсткості поперечного перерізу колон рам до жорсткості поперечного перерізу ригеля відповідно становить $i_1 = 1,0$; $i_2 = 0,6$ і $i_3 = 0,3$.

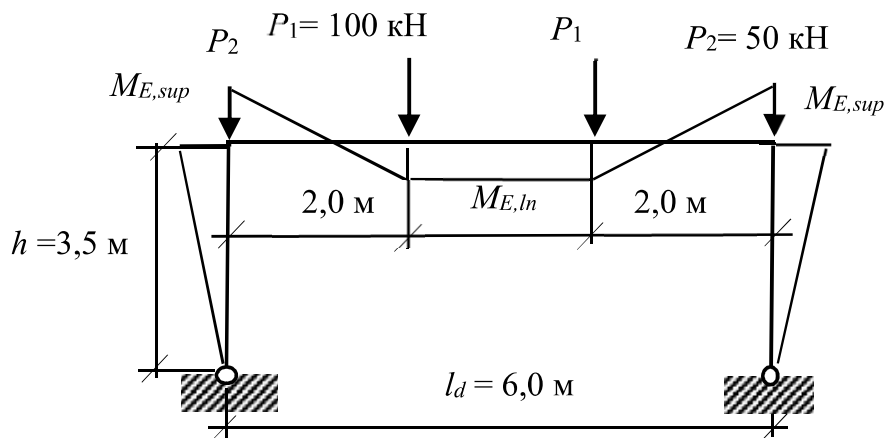


Рис. 3. Епюра моментів в рамі після перерозподілу зусиль

За умови пружної роботи рам з використанням ПК «Лира» визначені згинальні моменти від дії зовнішнього навантаження в перерізах, що розташовані по грані колон $M_{E,sup}$ та прольотних перерізах $M_{E,ln}$, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення згинальних моментів в опорних і прольотному перерізі ригеля і площі поперечного перерізу арматури відповідно розрахункам за пружною стадією та з урахуванням перерозподілу зусиль

Марка рами	Відноше жорсткостей, i	За пружною стадією				З перерозподілом зусиль			
		Моменти, кН×м		Арматура, см ²		Моменти, кН×м		Арматура, см ²	
		$M_{E,sup}$	$M_{E,ln}$	$A_{s,sup}$	$A_{s,ln}$	$M_{E,sup}$	$M_{E,ln}$	$A_{s,sup}$	$A_{s,ln}$
Р-1	1,0	92,3	108	4,95	5,81	100	100	5,26	5,26
Р-2	0,6	86,9	113	4,66	6,18	100	100	5,26	5,26
Р-3	0,3	80,0	120	4,29	6,56	100	100	5,26	5,26

$M_{E,sup}$ і $A_{s,sup}$ – відповідно момент і площа арматури в опорному перерізі
 $M_{E,ln}$ і $A_{s,ln}$ - відповідно момент і площа арматури в прольотних перерізах

Аналіз значень згинальних моментів свідчить жорсткість поперечних перерізів ригеля і колон впливає на значення опорних і прольотних згинальних моментів в пружній стадії роботи всієї рами. Так, при $i = 1,0$ (рама Р-1) різниця між опорними і прольотними моментами невелика (відхилення від середнього значення складає 8 %), а тому розрахунок з урахуванням пластичної роботи матеріалів суттєвого ефекту спостерігатися не буде, але можливе спрощення в армуванні.

На практиці завжди висота колони приймається меншою за висоту ригель. В рамі Р-2 співвідношення жорсткостей колони і ригеля становить $i = 0,6$, внаслідок чого відхилення значення моментів від середнього збільшилося до 13%, а в рамі Р-3 – до 20 %. В цих рамах доцільно виконати перерозподіл зусиль і за вирівняними моментами визначити площу робочої арматури в елементах рами.

Перерозподіл зусиль в рамах можна виконати за методикою, яка описана вище, в якій використовується умова $0,5(M_{E1} + M_{E2}) + M_{E3} = M_0$ (за рис. 2), де $M_0 = P_1 l_d / 3 = 100 \times 6 / 3 = 200$ кН×м – максимальний балочний момент. Наведену умову для даного випадку (за рис. 3) можна записати у вигляді: $M_{Esup} + M_{Eln} = M_0$. Якщо прийняти $M_{Esup} = M_{Eln} = M_E$, то значення вирівняних моментів знайдуться за формулою

$$M_E = P_1 l_d / 6 = 100 \times 6 / 6 = 100 \text{ кН} \times \text{м}. \quad (2)$$

За значеннями згинальних моментів в ригелях рам за деформаційною методикою визначена площа робочої арматури в опорних та прольотних перерізах ригеля (табл. 2). За площею арматури підібрані за сортаментом діаметри робочої арматури, а також визначена їх довжина і вага. Для армування ригеля, виходячи з пружної їхньої роботи, використовуються стержні діаметром 18, 20 та 22 мм, а для рами, розрахованої з урахуванням перерозподілу зусиль використовуються стержні тільки діаметром 18 мм.

Розрахунки свідчать, що в результаті використання в розрахунках перерозподілу зусиль в рамі Р-2 можна досягти економії арматури 6,7%, а в рамі Р-3 – 12,3%. При цьому спрощується армування ригеля рами.

Висновки. 1. З урахуванням перерозподілу зусиль доцільно проектувати П-подібні залізобетонні рами, в яких колони жорстко з'єднані з ригелем та шарнірно з фундаментом.

2. Встановлено, що на перерозподіл зусиль суттєво впливає співвідношення жорсткості поперечного перерізу колони до жорсткості поперечного перерізу ригеля, доцільно таке відношення приймати близько 0,5.

3. Запропонована методика розрахунку П-подібних рам з урахуванням перерозподілу зусиль дає можливість при проектуванні раціонально розподіляти зусилля по довжині елементів, при цьому дотримуватися основних положень будівельної механіки.

4. Розрахунками доведено, що П-подібних рамах за рахунок перерозподілу зусиль можна досягти до 12% економії арматури, зменшити номенклатуру арматури та спростити саме армування елементів рами.

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. ДБН В.2.6-98:2009. Київ. Мінрегіонбуд України. 2011. С.71.

Betonni ta zalizobetonni konstrukciji. Osnovni polozhenia. DBN B.2.6-98:2009. Kyiv. Minregionbyd of Ukraine. 2011.

2. Glanville W. N., Tomas F. J. The redistribution of moments in reinforced concrete beams and frames. Institution of Civil Engineers. London. 1936.

3. Барашиков А. Я., Мурашко Л. А., Реминец Г. М. Исследование деформативности железобетонных рам. «Будівельник». Киев. 1974. 87 с.

Barashikov A. Y., Murashko L. A., Reminets G. M.. Isledovanie deformativnosti zhelezobetonnih ram. «Budidelnik». Kyiv. 1974.

4. Бабич Є. М., Філіпчук С. В., Ільчук Н. І. Робота і розрахунок залізобетонних рам при дії повторних навантажень. НУВГП. Рівне. 2012. 176 с.

Babych E. M., Filipchuk S. V., Ilchuk N. I., Robota i rozrahunok zalizobetonnih ram pri diyi povtornih navantazhen. NUWEE. Rivne. 2012.