УДК 624.012.35: 620.173 / 174

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДЕФОРМАЦІЙНО-СИЛОВОЮ МОДЕЛЛЮ ЇХ ОПОРУ

Канд. техн. наук В. М. Ромашко (Національний університет водного господарства та природокористування)

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПО ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВОЙ МОДЕЛИ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Канд. техн. наук В. Н. Ромашко (Национальный университет водного хозяйства и природопользования)

BASES OF CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES ACCORDING TO THE DEFORMATION AND POWER MODEL OF RESISTANCE

Ph. D. in Engineering V. Romashko

У статті розглядаються основні положення універсальної методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за деформаційно-силовою моделлю їх опору. Особливу увагу зосереджено на основних методологічних проблемах та недоліках сучасних «деформаційних» моделей. Показано, що в більшості випадків ці проблеми можна вирішити за допомогою узагальнених діаграм реального стану залізобетонних елементів та конструкцій.

Ключові слова: *залізобетонні елементи та конструкції, методика розрахунку, модель деформування, діаграми стану.*

В статье рассматриваются основные положения универсальной методики расчета железобетонных элементов и конструкций по деформационно-силовой модели их сопротивления. Особое внимание сосредоточено на основных методологических проблемах и недостатках современных «деформационных» моделей. Показано, что в большинстве случаев эти проблемы можно решить с помощью обобщенных диаграмм реального состояния железобетонных элементов и конструкций.

Ключевые слова: *железобетонные элементы и конструкции, методика расчета, модель деформирования, диаграммы состояния.*

The article deals with the basic provisions of the universal calculation method of reinforced concrete elements and structures according to the deformation and force model of their resistance. Particular attention is focused on the basic methodological problems and shortcomings of modern "deformation" models. It is shown that in the most cases these problems can be solved by the generalized diagrams of reinforced concrete elements and structures real state. Thanks to these diagrams, the developed method: provides a single methodological approach to the calculation of reinforced concrete elements and structures normal sections for limit states; allows to reveal the internal static indeterminacy of heterogeneously deformable elements and structures in their ultimate limit state calculation; justifies the application of the basic and derived criteria of reinforced concrete elements and structures bearing capacity exhaustion; retains the essence of the physical processes of concrete and reinforced concrete structures deformation.

Keywords: *reinforced concrete elements and structures, calculation method, deformation model, state diagrams.*

Вступ. Забезпечення повної методологічної єдності розрахунків бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами обох груп завжди було і залишається нині однією з найважливіших проблем у теорії бетону та залізобетону.

У рамках силової моделі, при використанні «пластичного шарніра» з прямокутною епюрою напружень у стиснутому бетоні, ця проблема взагалі не могла бути вирішена принципово. Адже через різні вихідні передумови розрахунки залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами 1-ї та 2-ї групи взагалі залишалися повністю автономними.

Особливі сподівання у вирішенні зазначеної проблеми покладалися на так звану «деформаційну» модель. Однак, незважаючи на певні успіхи в її побудові, вона так і не вирішила в повній мірі основної проблеми. Більше того, в її рамках залишається не розв'язаною ціла низка супутніх задач:

• у більшості випадків внутрішня статична невизначеність неоднорідно деформованих елементів розкривається за допомогою чисельних ітерацій;

• не сформульовані чіткі критерії вичерпання (втрати) несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій;

• на сьогодні для залізобетонних елементів і конструкцій практично відсутні не тільки точні, але й наближені аналітичні рішення інтегральних залежностей $M = f(1/r)$ за екстремальним критерієм $dM / d(1/r) = 0$;

• у розрахунках неоднорідно деформованих елементів за граничними станами другої групи взагалі відсутні будь-які рекомендації чи пропозиції з розкриття їх внутрішньої статичної невизначеності, що веде до неминучого використання у розрахунках різного роду емпіричних залежностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих на сьогодні деформаційних моделях [1-3] дійсний напружено-деформований стан залізобетонних елементів і конструкцій відтворюється шляхом перенесення діаграм деформування матеріалів на їх переріз. Такий прийом, на думку багатьох дослідників [4-6], є не дуже переконливим і викликає цілу низку слушних застережень з їхнього боку. А тому процес деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій слід відтворювати за допомогою діаграм їх реального стану. Тоді не буде потреби у будь-якому перенесенні вищезгаданих діаграм на перерізи зазначених елементів і конструкцій, оскільки за певних обставин та вихідних умовах вони будуть трансформуватися одна в одну.

Мета та завдання досліджень. Дані дослідження спрямовані на розроблення узагальненої універсальної методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами, яка б відповідала таким критеріям:

• повністю забезпечила методологічну єдність їх виконання;

• була максимально позбавлена емпіризму;

• сприяла розкриттю внутрішньої статичної невизначеності залізобетонних елементів і конструкцій та суттєвому скороченню ітераційних обчислень;

• максимально зберігала фізичну сутність процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій;

• могла реалізовуватися за простими компактними алгоритмами;

• зберігала методологічну єдність точних та спрощених способів розрахунку.

Основна частина досліджень. Досягти поставленої мети і вирішити перелічені завдання покликана саме деформаційно-силова модель опору залізобетонних елементів і конструкцій та діаграма їх реального стану.

Оскільки в основі розробленої моделі лежать загальновизнані принципи механіки деформованого твердого тіла (МДТТ), то розрахунок залізобетонних елементів і конструкцій у найбільш напруженому перерізі (або в усередненому перерізі найбільш напруженої ділянки) при їх нелінійному деформуванні пропонується виконувати за допомогою комп'ютерного або «ручного» розв'язання такої замкнутої системи рівнянь:

$$\left.\begin{array}{l} \bullet \text{ статичних співвідношень з гіпотезою граничної рівноваги} \\ M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ \bullet \text{ геометричних співвідношень з гіпотезою плоских перерізів} \\ 1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ \bullet \text{ фізичних співвідношень: стану елементів } M = f(1/r) \text{ з екстремальним} \\ \text{критерієм несучої здатності } dM/d(1/r) = 0; \text{ стану матеріалів } \sigma_c = f(\varepsilon_c), \\ \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s) \text{ з екстремальними критеріями міцності} \\ d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0,\ d\sigma_{ct}/d\varepsilon_{ct} = 0. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Відомо, що несуча здатність залізобетонних елементів і конструкцій в їх нормальних перерізах забезпечується двома загальновідомими рівняннями рівноваги $\Sigma N = 0$ і $\Sigma M = 0$. Зазвичай більш жорстким є друге рівняння, з якого випливає визначальна умова (гіпотеза) граничної рівноваги

$$M_{Ed} \le M_u, \quad (2)$$

де M_{Ed} – розрахункове значення згинального моменту від зовнішнього навантаження; M_u – несуча здатність залізобетонного стержня (максимально можливе зусилля в ньому при настанні граничного стану).

У розробленій деформаційно-силовій моделі [7] саме гіпотеза граничної рівноваги і є основним критерієм вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій. А похідний екстремальний критерій несучої здатності $dM/d(1/r) = 0$ служить лише для прогнозування граничних значень деформацій бетону та арматури.

Розв'язок загальноприйнятих рівнянь рівноваги за вказаним критерієм дозволив отримати функцію рівня граничних деформацій стиснутого бетону [7, 8], залежно від параметрів армування перерізу елемента та ступеня неоднорідності деформування бетону, зображеного на рисунку.

$$\eta_{\varepsilon u} = \varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c1} = 1 + 5^3 \cdot \alpha_s \cdot \frac{(k-1)}{(6-k)} \cdot \sum_{i=1}^{n} \rho_{li} \cdot \left(\frac{x_{si}}{x}\right)^2 + \beta_F \times$$

$$\times \left[\frac{(0{,}43 - 0{,}2(0{,}4 - m_h)^2)(1 - m_h^{3/2})(1 - m_h/k)\sqrt{(\ln k)^{(1-m_h^{3/2})}}}{1 + ((1/6 - 0{,}1 \cdot m_h^2)(k-2)\ln(6/k - 2(0{,}1 - m_h)))^2} + \right. \quad (3)$$

$$\left. + \frac{(0{,}43 - 0{,}2(0{,}4 - m_b)^2)(1 - m_b^{3/2})(1 - m_b/k)\sqrt{(\ln k)^{(1-m_b^{3/2})}}}{1 + ((1/6 - 0{,}1 \cdot m_b^2)(k-2)\ln(6/k - 2(0{,}1 - m_b)))^2} \right],$$

де k – характеристика деформативності (пружно-пластичності) стиснутого бетону, $k=E_{co}\cdot\varepsilon_{c1}/f_{ck}$; x_{si} – відстань від нейтральної лінії до центра ваги стиснутих стержнів, напруження в яких у граничному стані не досягають межі текучості; ρ_{li} – коефіцієнт армування перерізу елемента тими самими стержнями, $\rho_{li}=A_{si}/(b_n\cdot h_n)$; β_F – коефіцієнт, що залежить від виду напружено-деформованого стану елемента і приймається: для стиснутих елементів – *1,0*; для згинальних – *0,81*; m_h – параметр неоднорідності деформування стиснутого бетону уздовж сторони h, $m_h=\varepsilon_{co,h}/\varepsilon_{c2}$; m_b – параметр неоднорідності деформування стиснутого бетону уздовж сторони b, $m_b=\varepsilon_{co,b}/\varepsilon_{c2}$ (див. рисунок).

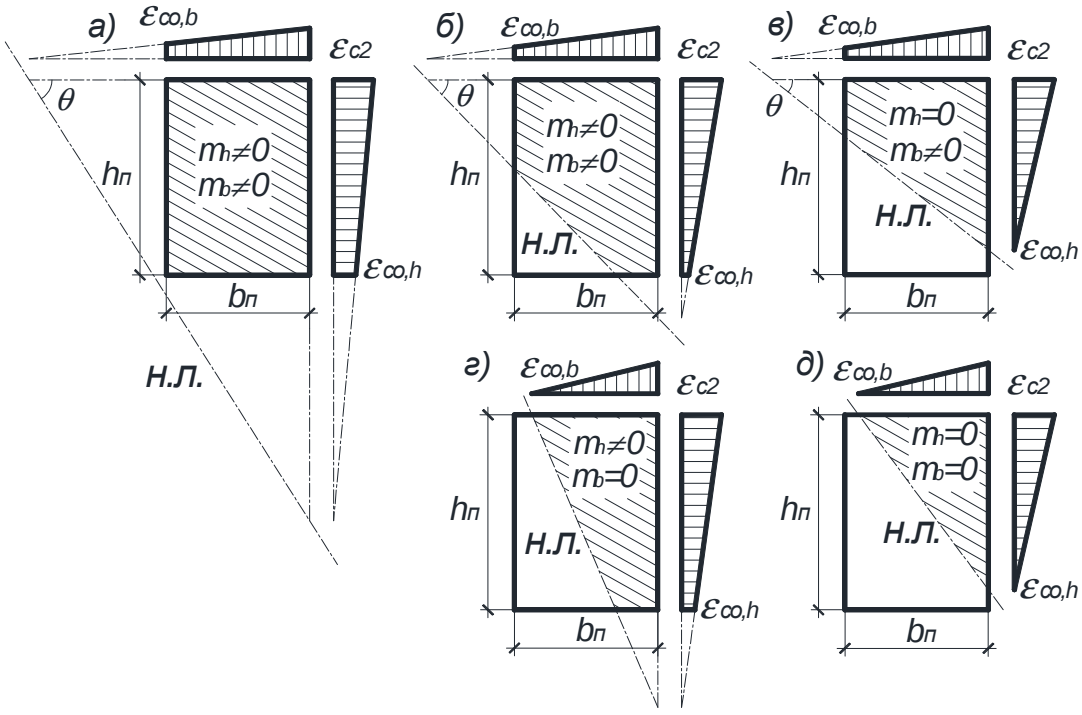

Рис. Можливі випадки положення нейтральної лінії в косодеформованих залізобетонних елементах

Саме залежність (3) разом із гіпотезою плоских перерізів та узагальненою діаграмою стану $M=f(1/r)$ дозволяє уникнути або істотно зменшити число ітерацій, сприяючи тим самим розкриттю внутрішньої статичної невизначеності перерізу залізобетонних елементів та конструкцій.

Загалом процес деформування залізобетонних елементів і конструкцій у деформаційно-силової моделі відтворюється діаграмами їх реального стану за допомогою функції жорсткості D. Саме остання пов'язує між собою основні силові (M) і деформаційні ($1/r$) параметри напружено-деформованого стану зазначених елементів і конструкцій. І як показують досліди [9], аж до вичерпання несучої здатності жорсткість елементів залежить від зазначених параметрів нелінійно. Тому, завдяки гіпотезі «нелінійності» жорсткості [8, 10], вираженій залежністю

$$M/(1/r) = A - B\cdot(1/r)/(1/r_u) - C\cdot M/M_u, \quad (4)$$

діаграма стану набуває вигляду:

$$M = \frac{D_o\cdot 1/r - M_u\cdot((1/r)/(1/r_u))^2}{1+(D_o/M_u - 2/(1/r_u))\cdot(1/r)}, \quad (5)$$

де D_o – початкове значення повної ($\Sigma E_з I_з$) або приведеної ($E_{co}I_{red,o}$) жорсткості залізобетонного елемента;

$1/r_u$ – граничне значення кривизни залізобетонного елемента при вичерпанні несучої здатності.

У практичних розрахунках діаграму стану доцільно подавати у вигляді $1/r = f(M)$ за формулою

$$\frac{1}{r} = \frac{1/r_u}{2M_u}\left[(1-\frac{M}{M_u})\frac{D_o}{r_u} + 2M - \sqrt{((1-\frac{M}{M_u})\frac{D_o}{r_u} + 2M)^2 - 4M\cdot M_u}\right]. \quad (6)$$

За наявності тріщин у розтягнутій зоні залізобетонного елемента його кривизну рекомендується корегувати $1/r^* = (1/r)\cdot\psi_\rho$ поліноміальною функцією

$$\psi_i = 1 + \rho_l/\alpha_s\cdot(1 - M/M_u)\cdot M/M_u, \quad (7)$$

де α_s – відносне значення модуля пружності арматури, $\alpha_s = E_s/200000$;

ρ_l – відсоток армування перерізу елемента поздовжніми стержнями, %.

Унікальність узагальненої діаграми стану елемента (5) підтверджується тим, що за певних початкових умов вона трансформується в загальновідому діаграму стану бетону Єврокод-2 [3],

$$\sigma_c = f_{ck}\cdot\frac{E_{co}\cdot\varepsilon_c/(E_{cu}\cdot\varepsilon_{cu}) - (\varepsilon_c/\varepsilon_{cu})^2}{1+(E_{co}/E_{cu} - 2)\cdot(\varepsilon_c/\varepsilon_{cu})}, \quad (8)$$

де E_{cu} – граничне значення січного модуля деформацій бетону за осьового стиску, $E_{cu} = E_{cf} = f_{ck}/\varepsilon_{cu}$; ε_{cu} – граничні деформації бетону за осьового стиску, рівні критичним.

Розроблена деформаційно-силова модель якраз і відрізняється від інших тим, що в ній вплив емпіричних параметрів певною мірою локалізований саме розрахунковими діаграмами стану елементів і конструкцій, які передбачають можливе зниження їх несучої здатності з одночасним ослабленням бетону та підвищенням його деформативності. Інакше кажучи, за подібних обставин немає потреби у використанні різних емпіричних коефіцієнтів, що підвищують базові параметри деформування залізобетонних елементів (w_o, $y_o = f_o$) до рівня розрахункових (w_k, $y_k = f_k$).

Для апробації вищеописаної методики було виконано розрахунки різних залізобетонних елементів, випробуваних як вітчизняними, так і закордонними дослідниками. При цьому прогини згинальних елементів обчислювалися за загальновідомою формулою Сімпсона з використанням залежності кривини (6), а прогини стиснутих елементів у граничному стані розраховувалися переважно за класичним виразом:

$$f_{\max} = s \cdot l^2 \cdot (1/r_x)_{\max}, \qquad (9)$$

де s – коефіцієнт, що залежить від схем завантаження та закріплення елемента;

$(1/r_x)_{\max}$ – осереднена кривина елемента в перерізі з найбільшим згинальним моментом (найменшою жорсткістю).

Результати порівняння теоретичних та експериментальних значень досліджуваних параметрів, наведені в таблиці, засвідчують правомірність використання розробленої методики в практичних розрахунках.

Таблиця

Порівняння теоретичних та дослідних параметрів залізобетонних елементів

Автори дослідів, кількість зразків	Відхилення експериментальних даних від розрахункових, отриманих за методикою					
	Eurocod-2 [1]			Ромашко В.М.		
	Δ	σ	v,%	Δ	σ	v,%
Несуча здатність позацентрово стиснутих, косостиснутих та стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів						
Таль К.Є., Чистяков Е.А. [11], 68 зр.	1,023	0,0813	7,95	1,009	0,0763	7,56
Бабич С.В. [12], 15 зр.	1,05	0,1269	12,09	1,026	0,1146	11,17
Різак В.В. [13], 15 зр.	1,025	0,0979	9,55	1,016	0,0908	8,94
Бабич В.І. [14], 30 зр.	1,004	0,0426	4,24	1,014	0,043	4,24
Загалом, 128 зразків.	1,022	0,0795	7,75	**1,013**	**0,075**	**7,37**
Прогини згинальних залізобетонних елементів						
Burns N.H., Siess C.P. [315], 18 зр.	1,022	0,1585	15,51	0,978	0,1104	11,29
McCollister H.M., Siess C.P. [16], 18 зр.	0,978	0,065	6,64	0,997	0,063	6,32
Ernst G.C. [17], 20 зр.	1,009	0,1881	18,64	1,018	0,1421	13,96
Rashid, M. A., Mansur, M. A. [18], 13 зр.	1,137	0,2489	21,89	1,046	0,177	16,92
Загалом, 69 зр. (234 досл.)	1,051	0,1807	16,94	**1,015**	**0,133**	**13,03**
Примітки: $\Delta = M_{th} / M_{ex}$ і σ – середньоарифметичні та стандартні відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями, v – коефіцієнт варіації відхилень						

Висновки з досліджень і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку. Проведені дослідження показали, що завдяки узагальненій діаграмі реального стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, розроблена деформаційно-силова модель:

• забезпечує єдиний методологічний підхід до розрахунку залізобетонних елементів та конструкцій за граничними станами;

• дає змогу розкривати внутрішню статичну невизначеність неоднорідно деформованих елементів в їх розрахунках за граничними станами;

• обґрунтовує застосування основного та похідного критеріїв вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій;

• не вимагає використання складного програмного забезпечення і дозволяє виконувати розрахунки навіть «вручну» та зберігає фізичну сутність процесів деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій;

• певною мірою локалізує вплив емпіричних параметрів на методику розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій.

У цілому вищеописані положення деформаційно-силової моделі можуть бути покладені в основу загальної теорії деформування бетону і залізобетону та поширені ще й на статично невизначні елементи і конструкції.

Список використаних джерел

1. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building: EN 1992-1-1 [Final Draft, December, 2004], Brussels: CEN, 2004. – 226 p.

2. СНБ 5.03.01-02. Конструкции бетонные и железобетонные [Текст] / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – [Введ. 01.07.2003]. – Минск: Стройтехнорм, 2003. – 144 с.

3. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст] / Мінрегіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. – [Чинний від 01.06.11]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.

4. Карпенко, Н. И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры [Текст] / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, А. Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. науч. трудов. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 7-25.

5. Узун, И. А. Трансформирование диаграммы деформирования бетона при сжатии [Текст] / И. А.Узун // Изв. вузов: строительство и архитектура. – 1991.– № 11.– С.7-12.

6. Дорофеев, В. С. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона [Текст]: монография / В. С. Дорофеев, В. Ю. Барданов. – Одесса: ОГАСА, 2003. – 210 с.

7. Ромашко, В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону [Текст]: монографія / В. М. Ромашко. – Рівне: О. Зень, 2016. – 424 с.

8. Ромашко, В. Н. Критерии исчерпания несущей способности железобетонных элементов и конструкций [Текст] / В.Н. Ромашко // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym: Construction of Optimized Energy Potential. – CZĘSTOCHOWA: Politechniki Częstochowskiej, 2015. – №2(16). – s.75-83.

9. Рискинд, Б. Я. Исследование работы сжатых железобетонных элементов с термически упрочненной арматурой [Текст] / Б. Я. Рискинд, Г. И. Шорникова // Железобетонные конструкции: сб. науч. тр. – Челябинск: УралНИИстромпроект, 1972. – Вып. VI. – С.42-71.

10. Ромашко, В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций [Текст] / В.Н. Ромашко // Международный научный журнал. – 2016. – № 3. – С. 84-86.

11. Таль, К. Э. Исследование несущей способности гибких железобетонных колонн, работающих по первому случаю внецентренного сжатия [Текст] / К. Э. Таль, Е. А. Чистяков // Расчёт железобетонных конструкций. Экспериментально-теоретические исследования по усовершенствованию расчёта: труды НИИЖБ. – М.: Госстройиздат, 1961. – Вып. 23. – С. 127-195.

12. Бабич, С. В. Робота та несуча здатність стиснутих залізобетонних елементів із різними ексцентриситетами на кінцях [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Бабич Сергій Васильович. – Рівне, 1998. – 193 с.

13. Різак, В. В. Робота та несуча здатність стиснуто–зігнутих залізобетонних елементів за короткочасного навантаження [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.23.01 / Різак Василь Васильович. – Рівне, 2000. – 175 с.

14. Бабич, В. И. Экспериментально-теоретические исследования работы гибких железобетонных элементов прямоугольного сечения на косое внецентренное сжатие [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Бабич Василий Иванович. – Львов, 1972. – 191 с.

15. Burns, N.H. Load-deformation characteristics of beam-column connections in reinforced concrete: A report of a research project [Text] / N.H. Burns, C.P. Siess. – University of Illinois, Urbana, Illinois, January 1962. – 261 p.

16. McCollister, H.M. Load-Deformation Characteristics of Simulated Beam Column Connections in Reinforced Concrete. A technical report of a research project [Text] / H.M. McCollister, C.P. Siess, N.M. Newmark. – University of Illinois. Urbana, Illinois, June 1954. – 172 p.

17. Ernst, G.C. Plastic hinging at the intersection of beams and columns [Text] / G.C. Ernst // ACI Journal, Vol. 28, № 12, (Journal Proceedings, Vol. 53), June 1957. − P.1119-1144.

18. Rashid, M.A. Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure [Text] / M.A. Rashid, M. A. Mansur // ACI Structural Journal, Vol. 102, № 3, May 2005. – P.462- 471.

Ромашко Василь Миколайович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko Vasil, Ph. D. in Engineering, associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Стаття прийтяна 02.03.2017 р.