

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.012.35:620.173/174

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Старш. викл. О. В. Ромашко, д-р техн. наук В. М. Ромашко

CALCULATION OF ENERGY RESOURCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

Senior Lecturer O. V. Romashko, D. Sc. (Tech.) V. M. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186169>

Здійснено критичний аналіз існуючих методів розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за строгістю постановки вихідної задачі та способом її розв'язання. Окреслено найважливіші положення універсальної методики розрахунку залишкового енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій в умовах тривалої експлуатації. В її основу покладено деформаційно-силову модель опору залізобетону загалом і гіпотезу незмінності в одиниці об'єму і незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента. Зазначену гіпотезу реформовано до енергетичного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів за різних режимів навантаження.

Ключові слова: залишковий ресурс, залізобетонні елементи, деформаційно-силова модель, енергетичний критерій.

An effective and scientifically grounded methodology for determining the energy recourse of bearing-strength capacity of reinforced concrete elements and structures in the modernization and reconstruction of construction sites is proposed. It allows you to take into account changes in operational rigidity and formalize the process of assessing the technical condition of construction sites by calculating the residual bearing strength capacity of reinforced concrete elements and structures.

The developed methodology is based on the deformation and force model of reinforced concrete resistance in general and the hypothesis of invariance in unit volume and independence from the loading mode of potential energy of reinforced concrete element deformation in particular. In this case, this hypothesis is reformed to the energy criterion of exhaustion of the bearing strength capacity of reinforced concrete elements under different load modes.

The methodology for calculating the residual energy resource of buildings and structures has been developed through in-depth analysis of existing similar techniques. It is based on the use of survey parameters that allow direct or indirect evaluation of the elements rigidity. In addition to real defects, damages and mechanical characteristics of materials, this parameter is the deflection of an element or structure, the value of which is determined by survey geodetic, photogrammetric, stereophotogrammetric or any other available methods. The use of the proposed energy criterion in the calculations of the reinforced concrete elements residual life becomes possible even when the initial parameters of field studies are the step and width of the normal cracks opening. In addition,

the developed technique allows predicting the operational values of the cracks specified parameters with their level formation, taking into account the adhesion of reinforcement with concrete.

The implementation of the proposed method for calculating the residual energy resource of the bearing strength capacity of reinforced concrete elements and structures is possible also in a temporary dimension. This can be done using the concrete creep parameters.

Keywords: *residual resource, reinforced concrete elements, deformation-force model, energy criterion.*

Вступ. Зазвичай модернізація та реконструкція будівельних об'єктів потребує не тільки встановлення дійсного технічного стану, але і визначення залишкового ресурсу несучої здатності будівельних конструкцій. Ці завдання є особливо важливими, а для залізобетонних елементів і конструкцій ще й вкрай складними, оскільки пов'язані з суттєвими змінами їхньої експлуатаційної жорсткості. Однак більшість чинних нормативних документів [1-3] подібні зміни повністю ігнорують, а тому технічний стан залізобетонних елементів і конструкцій оцінюється лише за сукупністю виявлених дефектів і пошкоджень без належних формалізованих розрахунків. Причиною такого примітивного підходу до встановлення дійсного технічного стану будівельних об'єктів є відсутність ефективної науково обгрунтованої методики розрахунку залишкового ресурсу несучої здатності будівельних конструкцій. Саме за допомогою такої методики і можна було б формалізувати процес достовірного оцінювання технічного стану будівельних об'єктів за результатами розрахунку залишкового ресурсу несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій.

Очевидно, що загальну універсальність і належну ефективність зазначеній методиці могли б забезпечити:

- обгрунтована модель деформування залізобетонних елементів і конструкцій у реальних умовах тривалої експлуатації;
- відповідні припущення, гіпотези та передумови, необхідні для реалізації зазначеної моделі;
- чіткі критерії настання граничного стану залізобетонних елементів і конструкцій за умов тривалої експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок залишкового ресурсу будівель і споруд виконують різними методами, що розрізняються між собою, як правило, строгістю постановки вихідної задачі та способом її розв'язання.

За строгістю постановки задачі всі відомі на сьогодні методи оцінювання залишкового ресурсу будівельних конструкцій можна умовно поділити на дві групи.

До першої групи слід віднести детерміновані методи [4-8], що використовуються за недостатньої або обмеженої інформації про конструкцію. За таких обставин залежності з опису функціональних якостей конструкції, переважно у вигляді многочленів середніх ступенів [9], повинні бути достатньо обгрунтовані. При вольовому виборі закону поведінки конструкції, аж до її граничного стану, екстраполяція за певним параметром може призвести не тільки до суттєвих помилок, але й до вкрай важких наслідків.

Другу групу складають імовірнісні методи розрахунку [8, 10, 11], які вимагають значно більшого обсягу детальної інформації не тільки про зовнішні навантаження та впливи, але й властивості матеріалів самої конструкції. Безперечно, внаслідок збільшеного обсягу необхідної інформації суттєво зростає і достовірність самих розрахунків і висновків про надійність і довговічність будівель і споруд. За такого підходу зовнішні умови експлуатації конструкції вважаються випадковими процесами, а розрахунок залишкового ресурсу здійснюється за визначальними параметрами технічного стану. Серед останніх особливо увагу звертають на зміну механічних

характеристик матеріалів, на коефіцієнти запасів міцності і навіть на окремі технологічні показники.

За способом розв'язання поставленої задачі методи розрахунку залишкового ресурсу будівельних конструкцій теж можна умовно поділити на дві групи.

Першу групу формують методи розрахунку залишкового ресурсу за критеріями граничних станів [5, 12, 13, 14] при забезпеченні коефіцієнтів запасу конструкцій. Вони ґрунтуються на відстеженні та екстраполяції параметрів технічного стану конструкцій, аж до досягнення їхніх граничних значень. Сама методика розрахунку потребує достовірної інформації про технічний стан окремих елементів конструкції та обов'язкового виконання перевірок розрахунків з урахуванням виявлених дефектів, пошкоджень і дійсних властивостей матеріалів.

До другої групи необхідно віднести ті методи, що ґрунтуються на моделюванні напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій числовими методами [15, 16, 17] за допомогою різних програмних комплексів. Дефекти і пошкодження включно з тріщинами, встановлені за результатами натурних обстежень, моделюють шляхом зміни характеристик жорсткості елементів за допомогою методу скінченних елементів. Імовірні зусилля в «елементах посилення» визначають з урахуванням зміни характеристик жорсткості чи введення до розрахункової схеми додаткових елементів. Перспективність таких методів підтверджується результатами системних досліджень, виконаних у провідних науково-дослідних інститутах і технічних університетах України [15].

Таким чином, в основу всіх вказаних методів розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій закладаються силові або деформаційні критерії [3]. Але в основу універсальної методики подібних розрахунків слід було б покласти деякий комплексний

деформаційно-силовий (енергетичний) критерій.

Мета та завдання досліджень. Дані дослідження спрямовані на розроблення методики розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за енергетичним критерієм деформування. Зазначена методика має стати універсальною завдяки залученню до неї:

- узагальненої деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам [18];
- загальноновизнаної системи співвідношень механіки деформованого твердого тіла (МДТТ);
- визначальних гіпотез нелінійності жорсткості та граничної рівноваги;
- особливого енергетичного критерію деформування залізобетонних елементів і конструкцій.

Основна частина досліджень. Найважливіші силові і деформаційні параметри деформування залізобетонних елементів на всіх етапах пов'язуються між собою функцією жорсткості $D = M / (1/r)$. Тому доцільно, щоб методика розрахунку їхнього залишкового ресурсу базувалася на використанні саме тих параметрів натурних досліджень (обстежень), які дозволяли б безпосередньо чи опосередковано оцінювати жорсткість елементів. Крім реальних дефектів, пошкоджень і механічних характеристик матеріалів, таким параметром може слугувати прогин елемента чи конструкції f_l , величину якого можна визначити при обстеженні геодезичним, фотограмметричним, стереофотограмметричним чи іншим способом. За величиною прогину можна доволі легко визначити осереднену кривину згинального елемента в експлуатаційній стадії (рисунок):

$$1/r_{f_l} = f_l / (s \cdot l^2), \quad (1)$$

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

l – розрахункова довжина залізобетонного елемента.

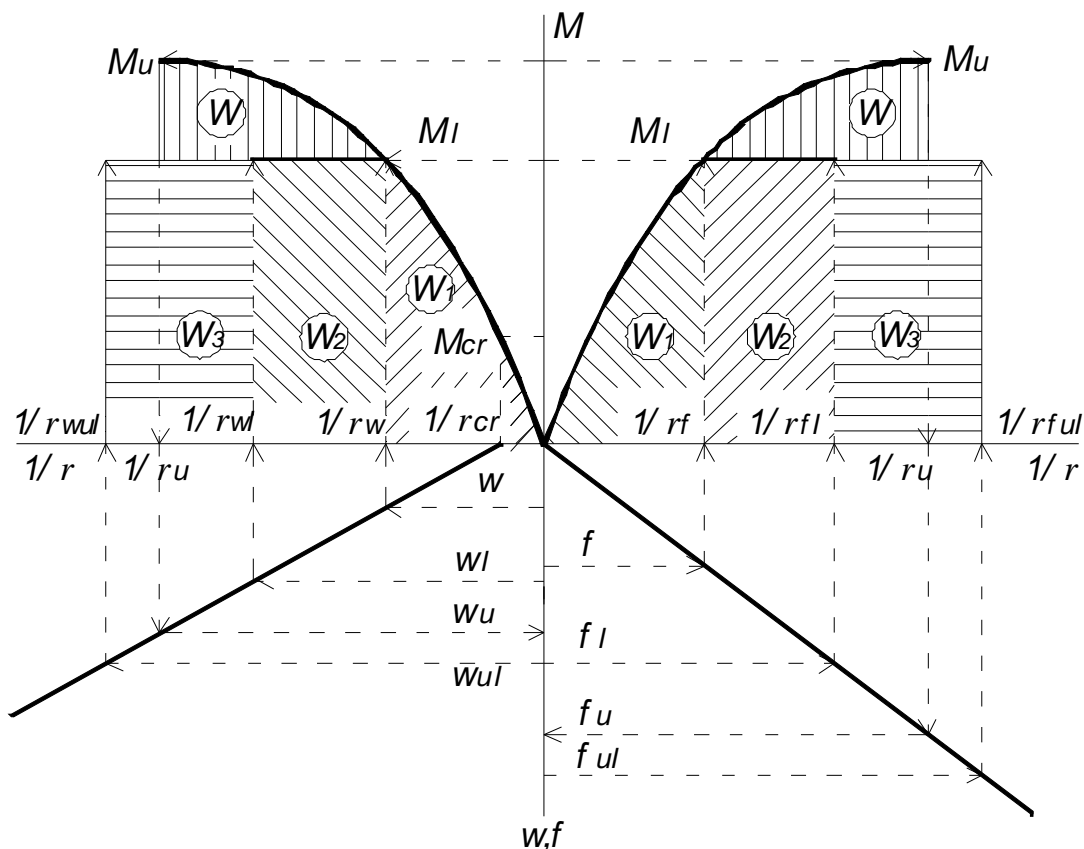


Рис. Визначення потенціальної енергії деформування згинального залізобетонного елемента за дії навантажень різної тривалості

Початкове значення осередненої кривини в розрахунковому перерізі згинального залізобетонного елемента в

експлуатаційній стадії можна визначити, виходячи з узагальненої діаграми його стану [18]

$$M = \frac{D_0 \cdot 1/r - M_u \cdot ((1/r)/(1/r_u))^2}{1 + (D_0/M_u - 2/(1/r_u)) \cdot (1/r)}, \quad (2)$$

за виразом:

$$\frac{1}{r_f} = \frac{1/r_u}{2M_u} \left[\left(1 - \frac{M_l}{M_u}\right) \frac{D_0}{r_u} + 2M_l - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M_l}{M_u}\right) \frac{D_0}{r_u} + 2M_l\right)^2 - 4M_l \cdot M_u} \right], \quad (3)$$

де $1/r_u$ – граничне значення кривини залізобетонного елемента при вичерпанні ним несучої здатності;

M_u – несуча здатність цього ж елемента (максимальне зусилля в ньому при настанні граничного стану);

M_l – згинальний момент від експлуатаційного навантаження;

D_0 – значення повної початкової жорсткості залізобетонного елемента.

Визначальні параметри граничного стану M_u та $1/r_u$ розраховують згідно з деформаційно-силовою моделлю опору

залізобетонних елементів і конструкцій та основних положень МДТТ за системою рівнянь

- статичних $M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$, $N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$;
- геометричних $1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$;
- фізичних (стану матеріалів) $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$, $\sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct})$, $\sigma_s = f(\varepsilon_s)$

} (4)

з доповненням її аналітичною залежністю діаграми стану залізобетонного елемента $M - 1/r$ та функцією граничних деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cu} = f(\varepsilon_{si}, \rho_{li}, x_{si}, m_h, m_b)$ [18].

Тоді потенціальну енергію граничного деформування згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження (рисунок) можна обчислити за таким виразом:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_0^{1/r_u} M d(1/r) = \int_0^{1/r_u} \left[\left(D_0 \cdot (1/r) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_u)} \right) \right] d(1/r) = \\
 &= -\frac{M_u \cdot (1/r_u)}{2 \cdot (K-2)} + \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^2} - \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^3} \ln(1 + (K-2)) = \\
 &= \frac{M_u \cdot (1/r_u)}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right], \tag{5}
 \end{aligned}$$

де $K = D_0 \cdot (1/r)_u / M_u$ – характеристика граничної деформативності залізобетонного елемента.

Аналогічно визначимо потенціальну енергію деформування згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії експлуатаційного навантаження (рисунок)

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \int_0^{1/r_f} M d(1/r) = \int_0^{1/r_f} \left[\left(D_0 \cdot (1/r) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_u)} \right) \right] d(1/r) = \\
 &= \frac{M_u \cdot (1/r_f)^2}{2(1/r_u) \cdot (K-2)} + \frac{M_u \cdot (1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^2} - \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^3} \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) = \\
 &= \frac{M_u}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_f)^2}{2 \cdot (1/r_u)} + \frac{(1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) \right], \tag{6}
 \end{aligned}$$

та за тривалої дії експлуатаційного навантаження (рисунок)

$$W_2 = M_l \cdot (1/r_{fl} - 1/r_f). \tag{7}$$

З урахуванням виразів (5)-(7) потенціальна енергія деформування згинального залізобетонного елемента, що

відповідає його залишковому ресурсу, може бути визначена за виразом (рисунок)

$$W_3 = W - W_1 - W_2 = \frac{M_u \cdot (1/r_u)}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right] - \frac{M_u}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_f)^2}{2 \cdot (1/r_u)} + \frac{(1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) \right] - M_l \cdot (1/r_{fl} - 1/r_f) = M_l \cdot (1/r_{ful} - 1/r_{fl}), \quad (8)$$

де $1/r_{ful}$ – граничне значення кривини елемента при вичерпанні ним несучої здатності за тривалої дії навантажень.

Таким чином, розрахунок залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за деформаційно-силовою моделлю пропонується виконувати з залученням ще однієї визначальної гіпотези – незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента, витраченої на його руйнування $W = const$. Ця гіпотеза одночасно слугує ще й енергетичним критерієм розрахунку залишкового ресурсу в пропонованій методиці та дозволяє реалізувати його в часовому вимірі.

Розрахунок залишкового ресурсу залізобетонного елемента в часовому вимірі пов'язаний зі зміною в часі жорсткості його перерізу загалом та січного модуля деформацій бетону, зокрема

$$E_{cl} = E_{cc} / (1 + \varphi(t, t_0)), \quad (9)$$

де E_{cc} – січний модуль деформацій бетону за короткочасної дії зовнішнього навантаження [19];

$\varphi(t, t_0)$ – коефіцієнт повзучості бетону за тривалої дії зовнішнього навантаження, граничне значення якого розраховують або приймають згідно з чинними нормами [3, 20].

Використання пропонованого енергетичного критерію в розрахунках залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій стає можливим навіть тоді, коли вихідним параметром натурних досліджень буде слугувати не прогин f_l , а крок $s_{r,l}$ і ширина розкриття w_l нормальних тріщин (рисунок). При цьому необхідно зауважити, що запропонована методика дозволяє прогнозувати експлуатаційні значення вказаних параметрів тріщин за їх рівневого утворення [21] з урахуванням зчеплення арматури з бетоном [22]. І стає це можливим завдяки тому, що гіпотеза плоских перерізів дозволяє в осередненому розрахунковому перерізі пов'язати деформації матеріалів з жорсткістю елемента через його кривину:

$$1/r = (\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1}) / d \quad \text{або} \quad 1/r = (\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{c0}) / h, \quad (10)$$

де ε_{c2} – поточні значення відносних деформацій бетону найбільш стиснутої грані;

ε_{c0} – поточні значення відносних деформацій найменш стиснутої грані бетону (за відсутності розтягу);

ε_{s1} – поточні значення відносних деформацій найбільш розтягнутої арматури;

h і d – відповідно загальна та робоча висота перерізу елемента.

Правда, слід зауважити, що точність розрахунку залишкового енергетичного ресурсу залізобетонних елементів за кроком і шириною розкриття нормальних тріщин є дещо нижчою, ніж за прогином.

Висновки з досліджень та перспективи подальшого розвитку в даному напрямі. Запропонована методика розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій відрізняється від усіх інших тим, що в її основу покладено:

- деформаційно-силову модель опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам;
- гіпотезу незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента;
- безпосереднє використання таких вихідних параметрів натурних досліджень (вимірювань), як прогин елемента, крок і ширина розкриття нормальних тріщин;
- можливість її реалізації в часовому вимірі за допомогою параметрів повзучості бетону як в інженерному, так і програмному варіанті.

Список використаних джерел

1. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. Київ: Держбуд України, 1999. 153 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.1.2-14-2008. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с. (Національні норми України).
3. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Стандарт України).
4. Самолинов Н. А. Использование неразрушающих методов контроля прочности конструкций при определении остаточного ресурса зданий и сооружений. *Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений*. 2002. № 3. С. 8–10.
5. Шматков С. Б. Расчёт остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура*. 2007. Вып. 5. № 22. С. 56-57.
6. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 445 с.
7. Самигуллин Г. Х. Алгоритм расчета остаточного ресурса производственных зданий и сооружений по значениям параметров технического состояния. *Инновационная наука*. 2016. № 1. С. 124-128.
8. Existing models residual life assessment of structures and their comparative analysis / M. Volkov et al. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1801-1805. (Цитується в SCOPUS).
9. Выбор метода расчета остаточного ресурса зданий и сооружений / Акулов А. С. и др. *Научные труды КубГТУ*. 2015. № 10. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/568> (дата звернення: 21.08.2019).
10. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. Москва: Стройиздат, 1982. 352 с.

11. Суцев С. П., Самолинов Н. А., Адаменко И. А. Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки. *Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов.* 2009. Вып. 8. С. 320–327.
12. Клименко Є. В. Технічний стан будівель та споруд : монографія. Одеса: ОДАБА, 2010. 284 с.
13. Беляев С. М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций. *Вестник СГАСУ: Градостроительство и архитектура.* 2013. № 3(11). С. 22–25.
14. Визначення параметрів залишкового експлуатаційного ресурсу житлових будинків перших масових серій / М. П. Куркін та ін. *Наука і будівництво.* 2014. № 2. С. 28-30.
15. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. статей за 2007-2009 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. 709 с.
16. Голоднов А. И., Слюсар Ю. Н. Остаточный ресурс железобетонных балок, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды. *Зб. наук. праць Українського ін-ту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського.* 2013. Вип. 12. С. 110-117.
17. Семиног М. М., Голоднов О. І. Діагностика технічного стану та визначення залишкового ресурсу будівельних конструкцій. *Дороги і мости.* 2009. Вип. 11. С. 285-290.
18. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
19. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине.* 2007. № 6. С. 2–6.
20. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p. (Європейський стандарт).
21. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ. 2018. Вип. 181. С. 58-65.
22. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ. 2018. Вип. 179. С. 92-99.

Ромашко Олена Василівна, старш. викл. кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, д-р 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: romashkovasy1@gmail.com.

Romashko Olena Vasylyivna, Senior Lecturer, Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyl Mykolayovych, D. Sc. (Tech.), Associate Professor, Head of Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy1@gmail.com.

Статтю прийнято 05.09.2019 р.