УДК 624.012.45:620.17 DOI: 10.31650/2415-377X-2021-84-59-68

МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

[1]**Ромашко В.М.,** д.т.н., доцент,
romashkovasyl@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3448-7489
[1]**Ромашко-Майструк О.В.,** к.т.н.
romashkoolena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3353-2268
[1]*Національний університет водного господарства та природокористування*
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна

Анотація. У статті визначено та проаналізовано головні недоліки існуючих моделей і методів розрахунку ресурсу елементів будівельних конструкцій. Запропоновано універсальну модель та методику розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій в умовах тривалої експлуатації. Узагальнену деформаційно-силову модель опору залізобетонних елементів силовим впливам розвинуто до рівня енергетичної завдяки застосуванню гіпотези незмінності в одиниці об’єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії їх граничного деформування. Вказану гіпотезу рекомендується використовувати в якості універсального енергетичного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів та обмеження їх прогинів і ширини розкриття тріщин за дії навантажень будь-якої тривалості.

Ключові слова: залізобетонні елементи, граничне деформування, залишковий ресурс, енергетичний критерій.

Вступ. Встановлення дійсного напружено-деформованого стану будівельних елементів і конструкцій з визначенням їх залишкового ресурсу завжди залишатиметься одним з пріоритетних завдань, що доводиться вирішувати при реконструкції та модернізації будівельних об’єктів. Ця задача є особливо складною для залізобетонних елементів, оскільки пов’язується з необхідністю моделювання реальних жорсткісних характеристик в процесі їх тривалої експлуатації. За переважною більшістю існуючих на сьогодні методик [1-6], включно з нормативними [7-9], дійсний технічний стан експлуатованих залізобетонних елементів і конструкцій оцінюється за відповідними міцнісними характеристиками матеріалів та сукупністю виявлених дефектів і пошкоджень. За таких обставин моделювати жорсткість залізобетонних елементів в процесі їх експлуатації можна лише за допомогою геометричних параметрів їх перерізу. Водночас відомо, що зміна жорсткості за рахунок деформаційних параметрів, зокрема зменшення модуля деформацій бетону E_{cl} через його повзучість, є більш вагомою, оскільки може відбуватися навіть без зміни геометричних характеристик перерізу стиснутих елементів чи конструкцій. А в згинальних елементах саме зміна згаданого деформаційного параметра супроводжується ще й зміною геометричних характеристик перерізу залізобетонних елементів внаслідок розвитку прогинів та розкриття тріщин в умовах тривалої експлуатації.

Тому модель деформування та методика розрахунку, що відтворюватиме реальний технічний стан залізобетонних елементів і конструкцій на підставі жорсткісних характеристик їхнього перерізу дозволить з більшою надійністю прогнозувати залишковий ресурс залізобетонних елементів і конструкцій не тільки за їх несучою здатністю, але й за допустимими прогинами та шириною розкриття тріщин.

Цілком очевидно, що подібні моделі та методики потребують формулювання абсолютно чітких критеріїв настання граничного стану залізобетонних елементів та конструкцій за умов тривалої експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій здійснюють на основі силової моделі їх опору зовнішнім впливам та навантаженням. Пропоновані в її рамках методики розрахунку різняться між собою, переважно, строгістю постановки самої задачі та способами її розв'язку.

Всі відомі на сьогодні методи розрахунку залишкового ресурсу будівельних елементів і конструкцій за строгістю постановки задачі варто розділити на детерміновані та ймовірнісні.

Детерміновані методи [1, 2, 10] переважно використовують за недостатньої або ж доволі обмеженої інформації про досліджувані елементи чи конструкції. За вказаних обставин, аналітичні залежності у вигляді многочленів середніх ступенів [11], що залучаються до опису основних закономірностей їхнього деформування, мають бути достатньо переконливими та належним чином обґрунтовані. Адже у випадку вольового вибору закону поведінки окремого елемента чи конструкції протягом тривалої експлуатації, екстраполяція їх напружено-деформованого стану за певним конкретним параметром може призвести до дуже серйозних прорахунків з вкрай тяжкими та небажаними наслідками.

В основу ймовірнісних методів розрахунку [3, 12] закладається значно більший обсяг деталізованої інформації про актуальні зовнішні впливи та навантаження. Вони потребують аналогічної інформації і про зміну міцнісних властивостей матеріалів досліджуваної конструкції. Безперечно, це дозволяє суттєво підвищити достовірність як самих розрахунків, так і висновків щодо надійності та довговічності будівельних конструкцій. Саме за такого підходу особлива увага звертається лише на міцнісні характеристики матеріалів, на коефіцієнти їх запасів або ж на окремі технологічні показники. Зміна ж деформаційних характеристик матеріалів в процесі тривалої експлуатації залізобетонних елементів і конструкцій жодним чином не враховується. За способом розв'язку поставленої задачі всі пропоновані на сьогодні методи розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій можна умовно розділити на спрощені (повірочні) та числові.

Спрощені методи розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій реалізуються за критеріями граничних станів [2, 4, 6] при забезпеченні необхідних коефіцієнтів запасу їх несучої здатності. Особливістю цих методів є те, що вони потребують не тільки достовірної інформації про технічний стан досліджуваних елементів та конструкцій, але й виконання обов'язкових перевірочних розрахунків. Інакше кажучи, зазначені методи розрахунку зводяться до доволі наближеної екстраполяції основних параметрів технічного стану залізобетонних елементів і конструкцій з урахуванням наявних дефектів, пошкоджень та дійсних властивостей матеріалів.

Числові методи [5] ґрунтуються на моделюванні напружено-деформованого стану залізобетонних елементів і конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів. Тут дефекти і пошкодження, включно з тріщинами, встановлені за результатами натурних обстежень, моделюють за допомогою методу скінчених елементів. У результаті все зводиться до того, що в розрахункову схему конструкцій вводяться додаткові «елементи посилення», ймовірні зусилля в яких визначають з урахуванням зміни міцнісних та геометричних характеристик розрахункового перерізу. Безперечно, що такі методи здатні більш точно відтворювати реальний технічний стан залізобетонних елементів і конструкцій в умовах тривалої експлуатації порівняно зі спрощеними.

В сучасних деформаційних моделях [9, 13] розрахунок залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій реалізується переважно за допомогою ймовірнісних числових методів. Однак і тут зміна визначальних деформаційних параметрів елементів та конструкцій в процесі їх експлуатації враховується вкрай опосередковано або ж взагалі не враховується [14].

Тому в основу узагальненої методики розрахунку ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій варто було б закладати деякий комплексний деформаційно-силовий критерій, що дозволяв би з енергетичних позицій відтворювати зміну їх жорсткісних характеристик в процесі тривалої експлуатації.

Мета і завдання досліджень. З урахуванням сказаного, дані дослідження спрямовано на розробку універсальної методики розрахунку ресурсу залізобетонних елементів та конструкцій. Її розбудову планується вести на основі узагальненої деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам [15] з використанням розширеної системи рівнянь механіки деформованого твердого тіла (МДТТ). Визначальними особливостями цієї методики мають бути загальні закономірності нелінійної зміни жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій в процесі їх деформування [16] та деякий універсальний енергетичний критерій вичерпання несучої здатності зазначених елементів в процесі їх експлуатації [14].

Матеріали та методика дослідження. Нижченаведені дослідження стосуються проектування і реконструкції залізобетонних елементів та конструкцій, виготовлених з важкого бетону і стержневої арматури та експлуатованих в умовах тривалого завантаження. Вони ґрунтуються на загальних закономірностях процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій за дії експлуатаційних навантажень та зводяться до моделювання змін жорсткісних характеристик зазначених елементів на основі енергетичного критерію.

Результати досліджень. В механіці деформованого твердого тіла (МДТТ) напружено-деформований стан залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування описують, зазвичай, системою наступних співвідношень:

$$\left.\begin{array}{l} \bullet\ \text{статичних;}\ M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ \bullet\ \text{геометричних}\ 1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ \bullet\ \text{фізичних (стану матеріалів)}\ \sigma_c = f(\varepsilon_c), \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \sigma_s = f(\varepsilon_s). \end{array}\right\} \quad (1)$$

Для силових моделей [2-4, 6, 10-12], де нехтують гіпотезою плоских перерізів та використовують ідеалізовані епюри напружень в матеріалах, ця система зводиться до використання двох традиційних рівнянь рівноваги $\Sigma M = 0$ та $\Sigma N = 0$. Тому визначити аналітичним шляхом залишковий ресурс залізобетонних елементів і конструкцій за умови повзучості бетону тут вкрай складно, а в більшості випадків – навіть неможливо.

В так званих «деформаційних» моделях [9, 13] співвідношення (1) утворюють статично невизначену систему, розв'язок якої навіть без врахування повзучості бетону є доволі трудомістким та зводиться до виконання численних ітерацій. При врахуванні ж деформацій повзучості бетону число ітераційних розрахунків помітно зростає, а розв'язок зазначеної системи ще більше ускладнюється.

В деформаційно-силовій моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам [15] найважливіші силові та деформаційні параметри їх деформування на всіх стадіях пов'язуються між собою функцією жорсткості:

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

з якої отримано аналітичну залежність універсальної діаграми стану зазначених елементів «момент-кривина»:

$$M = \frac{D_o \cdot 1/r - M_u \cdot ((1/r)/(1/r_u))^2}{1 + (D_o / M_u - 2/(1/r_u)) \cdot (1/r)}, \quad (3)$$

де D_o – початкова приведена жорсткість перерізу залізобетонного елемента;

D_u – жорсткість перерізу залізобетонного елемента при вичерпанні несучої здатності $D_u = M_u/(1/r_u)$;

M_u – несуча здатність залізобетонного стержня (граничне зусилля в ньому);

$1/r_u$ – кривина елементу в граничному стані.

Оскільки діаграма стану (3) за певних граничних умов здатна трансформуватися в загальновідому дробово-раціональну функцію деформування бетону (4):

$$\sigma_c = f_{ck} \cdot \frac{E_{co} \cdot \varepsilon_c /(E_{cu} \cdot \varepsilon_{cu}) - (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})^2}{1 + (E_{co} / E_{cu} - 2) \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})}, \quad (4)$$

де f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск;

E_{co} – початкове значення модуля пружності (деформацій) бетону;

E_{cu} – граничне значення січного модуля деформацій бетону;

ε_{cu} – граничне значення відносних деформацій стиснутого бетону,

то параметри граничного стану M_u і $1/r_u$, визначені за екстремальним критерієм Ферма $dM/d(1/r) = 0$, дозволяють прогнозувати граничні деформації не тільки розтягнутої арматури ε_{su}, але і стиснутого бетону $\varepsilon_{cu} = f(\varepsilon_{si}, \rho_{li}, x_{si}, m_h, m_b)$ [15].

За таких обставин методику розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій пропонується розбудовувати на основі тих параметрів, які можна визначити безпосередньо при натурних обстеженнях геодезичним, фотограмметричним чи будь-яким іншим способом. Крім реальних дефектів, пошкоджень та механічних характеристик матеріалів конструкції таким параметром може слугувати прогин f_l. За ним можна доволі легко розрахувати осереднене значення кривини згинального залізобетонного елемента в експлуатаційній стадії (рис. 1, *а*):

$$1/r_{fl} = f_l /(s \cdot l^2), \quad (5)$$

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

l – розрахункова довжина залізобетонного елемента.

Водночас, початкову кривину згинального залізобетонного елемента в осередненому розрахунковому перерізі за дії експлуатаційних навантажень можна визначити з узагальненої діаграми його стану (3) за виразом:

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

де M_l – згинальний момент від дії експлуатаційного навантаження.

Основною відмінністю деформаційно-силової моделі порівняно з іншими є те, що за допомогою вищевказаних силових та деформаційних параметрів (M і $1/r$) можна не тільки контролювати зміну жорсткісних характеристик залізобетонних елементів, але й оцінювати потенціальну енергію їхнього деформування. Задля цього в деформаційно-силовій моделі висунуто гіпотезу незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії руйнування залізобетонного елемента ($W = const$), яка одночасно слугує ще й енергетичним критерієм розрахунку його залишкового ресурсу [14].

Зокрема, потенціальну енергію граничного деформування згинального залізобетонного елемента на деякій ділянці руйнування Δl за короткочасної дії повного навантаження (рис. 1, *а*) можна обчислити за виразом:

$$W = \frac{\Delta l}{2}\int_o^{1/r_u} M d(1/r) = \frac{\Delta l}{2}\int_o^{1/r_u}\left[\left(D_o \cdot (\frac{1}{r}) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2} \cdot (\frac{1}{r})^2\right) \Big/ \left(1 + (K-2)\frac{(1/r)}{(1/r_u)}\right)\right] d(1/r) =$$

$$= \frac{\Delta l \cdot M_u \cdot (1/r_u)}{2 \cdot (K-2)}\left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2}\right)^2 \ln(K-1)\right], \quad (7)$$

де Δl – довжина ділянки (розрахункового блоку), в межах якої відбувається руйнування елемента, приймається за умовою $s_r \le \Delta l \le h$;

s_r – відстань між нормальними тріщинами (їх крок);

h – висота поперечного перерізу елемента на ділянці руйнування.

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

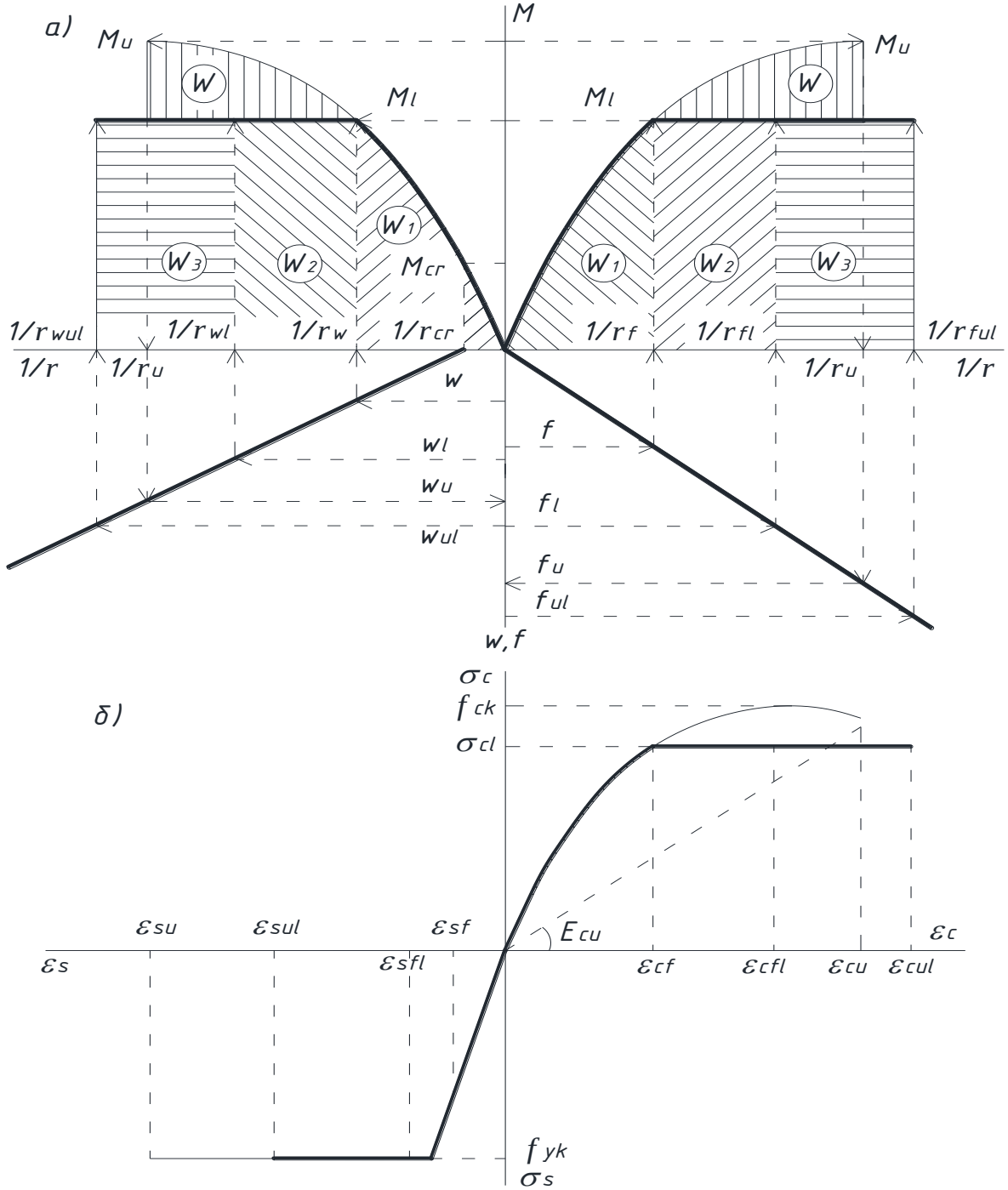

Рис. 1. До розрахунку ресурсу залізобетонних елементів за енергетичним критерієм деформування: *а* – діаграми стану елементів та потенціальної енергії їх деформування; *б* – діаграми деформування матеріалів за різних режимів завантаження

Потенціальну енергію деформування залізобетонного елемента на тій же ділянці від короткочасної дії експлуатаційного навантаження (рис. 1, *а*) слід обчислювати за виразом:

$$W_1 = \frac{\Delta l}{2}\int_o^{1/r_f} M d(1/r) = \frac{\Delta l}{2}\int_o^{1/r_f}\left[\left(D_o\cdot(1/r) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2}\cdot(1/r)^2\right)\Big/\left(1+(K-2)\frac{(1/r)}{(1/r_u)}\right)\right]d(1/r) =$$

$$= \frac{\Delta l\cdot M_u}{2\cdot(K-2)}\left[-\frac{(1/r_f)^2}{2\cdot(1/r_u)} + \frac{(1/r_f)\cdot(K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u)\cdot\left(\frac{K-1}{K-2}\right)^2 \ln\left(1+(K-2)\frac{1/r_f}{1/r_u}\right)\right], \quad (8)$$

а від його тривалої дії (рис. 1, *а*) – за формулою (9):

$$W_2 = \Delta l \cdot M_l \cdot (1/r_{fl} - 1/r_f)/2. \quad (9)$$

Зважаючи на залежності (7)…(9), потенціальну енергію деформування згинального залізобетонного елемента, що відповідає його залишковому ресурсу (рис. 1, *а*), можна визначити за виразом:

$$W_3 = W - W_1 - W_2 = \Delta l \cdot M_l \cdot (1/r_{ful} - 1/r_{fl})/2, \quad (10)$$

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

Водночас, разом з граничною кривиною осередненого перерізу елемента $1/r_{ful}$ можна прогнозувати граничні деформації бетону за тривалої дії експлуатаційного навантаження (рис. 1, *б*). Зробити це можна за допомогою системи рівнянь або співвідношень (1) при залученні загальновідомої гіпотези плоских перерізів:

$$1/r_{ful} = (\varepsilon_{cul} + \varepsilon_{sul})/d, \quad (11)$$

де ε_{cul} – граничні значення осереднених деформацій бетону найбільш стиснутої грані на ділянці між нормальними тріщинами;

ε_{sul} – граничні значення осереднених деформацій найбільш розтягнутої арматури на тій же ділянці її активного зчеплення з бетоном [17];

d – робоча висота перерізу елемента.

З іншої сторони, граничні деформації бетону за тривалої дії експлуатаційного навантаження можна спрогнозувати за допомогою характеристик повзучості бетону через граничну жорсткість осередненого перерізу залізобетонного елемента загалом або граничне значення січного модуля деформацій бетону E_{cul} зокрема:

$$E_{cul} = E_{cc}/(1 + \varphi(\infty, t_o)), \quad (12)$$

де E_{cc} – січний модуль деформацій бетону за короткочасної дії експлуатаційного навантаження [16, 18];

$\varphi(\infty, t_o)$ – граничне значення коефіцієнта повзучості бетону за тривалої дії експлуатаційного навантаження, приймають згідно чинних норм [9, 13].

Завдяки гіпотезі плоских перерізів використання вищезгаданого енергетичного критерію у розрахунках залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій стає можливим навіть тоді, коли вихідним параметром натурних досліджень буде слугувати не прогин f, а крок s_r і ширина розкриття w нормальних тріщин (рис. 1, *а*). Вони пов'язані з кривиною наступною залежністю:

$$1/r = (\varepsilon_c + w/s_r + \varepsilon_{ctu})/d, \quad (13)$$

згідно якої граничне значення ширини розкриття нормальних тріщин [19] за тривалої дії експлуатаційного навантаження можна визначити за формулою:

$$w_{ul} = (d/r_{wul} - \varepsilon_{clu} - \varepsilon_{ctu}) \cdot s_r, \quad (14)$$

де $1/r_{wul}$ – граничне значення кривини залізобетонного елемента (за тріщинами) при вичерпанні ним несучої здатності за тривалої дії навантажень;

ε_{ctu} – граничні значення осереднених деформацій розтягнутого бетону на ділянці між нормальними тріщинами.

За вищеописаною методикою було виконано теоретичне прогнозування тривалого розкриття нормальних тріщин для однієї з балок, випробуваних Gilbert R. I. [20]. При цьому, осереднені деформації стиснутого бетону від початкових $\varepsilon_c = \sigma_{cl}/E_{cc}$ до кінцевих значень $\varepsilon_{cfl} = \sigma_{cl}/E_{cfl}$ визначалися згідно виразу (12) за допомогою коефіцієнта повзучості бетону $\varphi(t, t_o)$ [9, 13, 14]. Результати зазначеного прогнозування графічно відображені на рис. 2.

Висновки. Таким чином, за результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

• застосування енергетичного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій дозволило розвинути узагальнену деформаційно-силову модель їх опору силовим впливам до рівня енергетичної;

• гіпотеза незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента дозволяє виконувати розрахунок його загального та залишкового ресурсів з єдиних методологічних позицій;

• використання енергетичного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій дозволяє виконувати розрахунок їх загального та залишкового ресурсів безпосереднє за виміряними деформаційними параметрами натурних досліджень (прогинами, кроком та шириною розкриття нормальних тріщин);

• прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій вимагає проведення детальних досліджень параметрів повзучості бетону.

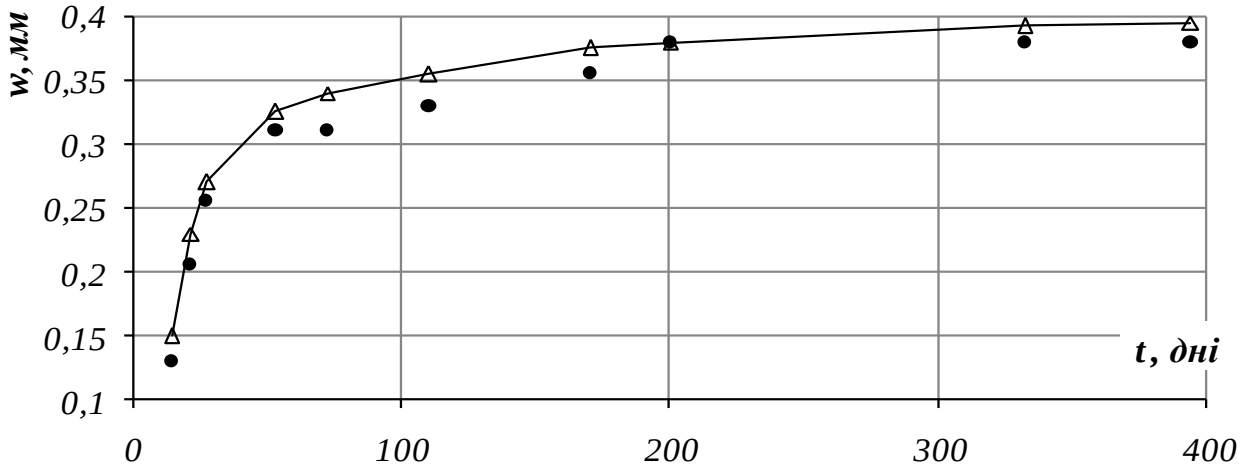

Рис. 2. Порівняння експериментальних (●) та теоретичних (△) значень ширини розкриття нормальних тріщин в залізобетонній балці В2-а [20] за тривалої дії навантаження

Література

1. 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.

2. Шматков С.Б. Расчёт остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений. *Вестник ЮУрГУ: Стр-во и арх-ра*. 2007. Вып. 5. № 22. С. 56-57.

3. Сущев 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.

4. Клименко Є.В. Технічна експлуатація і реконструкція будівель та споруд. Полтава: ПолНТУ, 2004. 280 с.

5. Голоднов А.И., Слюсар Ю.Н. Остаточный ресурс железобетонных балок, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды. *Зб. наук. праць Українського ін-ту сталевих кон-цій ім. В. М. Шимановського*. 2013. Вип. 12. С. 110-117.

6. Беляев С.М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций. *Вестник СГАСУ: Град-ство и арх-ра.* 2013. № 3(11). С. 22-25.

7. ДБН В.1.2-6-2008. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. [Чинні від 01.10.2008]. Київ: Держбуд України, 2008. 15 с.

8. ДБН В.1.2-14-2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [Чинні від 01.01.2019]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2018. 30 с.

9. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

10. Бигус Г.А. Основы диагностики технических устройств и сооружений. Москва: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 448 с.

11. Акулов А.С., Гудзь Ю.В., Кремер И.В., Полежнев С.С., Прошин Ю.М. Выбор метода расчета остаточного ресурса зданий и сооружений. *Научные труды КубГТУ*. 2015. №10. URL: http://ntk.kubstu.ru/file/568.

12. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. Москва: Стройиздат, 1982. 352 с.

13. 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.

14. Ромашко О.В., Ромашко В.М. Розрахунок енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2019. Вип. 186. С. 23-30.

15. Ромашко В.М. Основи розрахунку залізобетонних елементів та конструкцій за деформаційно-силовою моделлю їх опору. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2017. Вип. 168. С. 103-110.

16. Ромашко В.М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 6. С. 2-6.

17. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02027.

18. Ромашко В.М., Ромашко О.В. Модуль деформацій бетону за дії тривалих та малоциклових навантажень. *Будівельні конструкції: зб. наук. праць НДІБК*. 2008. Вип. 70. С. 143-150.

19. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02028.

20. Gilbert R.I., Nejadi S. An Experimental Study of Flexural Cracking in Reinforced Concrete Members under Sustained Loads: UNICIV Report № R-435, School of Civil and Environmental Engineering. Sydney: University of New South Wales, 2004. 59 p.

References

[1] N.A. Samolinov, "Ispolzovanie nerazrushayuschih metodov kontrolya prochnosti konstruktsiy pri opredelenii ostatochnogo resursa zdaniy i soorujeniy", *Seysmostoykoe stroitelstvo, bezopasnost soorujeniy*, no. 3, pp. 8-10, 2002.

[2] S.B. Shmatkov, "Raschët ostatochnogo resursa stroitelnyih konstruktsiy zdaniy i soorujeniy", *Vestnik YUUrGU: Stroitelstvo i arhitektura*, vyip. 5, no. 22, pp. 56-57, 2007.

[3] S.P. Suschev, N.A. Samolinov, I.A. Adamenko, "Ostatochnyiy resurs konstruktsiy (soorujeniy) i vozmojnyie metodyi ego otsenki", *Predotvraschenie avariy zdaniy i soorujeniy: sb. nauch. trudov*, vyip. 8, pp. 320-327, 2009.

[4] Ye.V. Klymenko, *Tekhnichna ekspluatatsiia i rekonstruktsiia budivel ta sporud*, Poltava: PolNTU, 2004.

[5] A.I. Golodnov, YU.N. Slyusar, "Ostatochnyiy resurs jelezobetonnyih balok, ekspluatiruyuschihsya v usloviyah agressivnoy sredyi", *Zb. nauk. prats Ukrainskoho in-tu stalevykh kon-tsii im. V. M. Shymanovskoho*, vyp. 12, pp. 110-117, 2013.

[6] S.M. Belyaev, "Raschet ostatochnogo resursa zdaniy s uchetom zapasa nesuschey sposobnosti konstruktsiy", *Vestnik SGASU: Grad-stvo i arh-ra*, no. 3(11), pp. 22-25, 2013.

[7] DBN V.1.2-6-2008, Osnovni vymohy do budivel i sporud. Mekhanichnyi opir ta stiikist, Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 2008.

[8] DBN V.1.2-14-2018, Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud, Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2018.

[9] DSTU B V.2.6-156: 2010, Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia, Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011.

[10] G.A. Bigus, *Osnovyi diagnostiki tehnicheskih ustroystv i soorujeniy*. Moskva: MVTU im. N.E. Baumana, 2015.
[11] A.S. Akulov, YU.V. Gudz, I.V. Kremer, S.S. Polejnev, YU.M. Proshin, "Vyibor metoda rascheta ostatochnogo resursa zdaniy i soorujeniy", *Nauchnyie trudyi KubGTU*, no. 10, [Online]. Available: http://ntk.kubstu.ru/file/568, 2015.
[12] V.V. Bolotin, *Metodyi teorii veroyatnostey i teorii nadëjnosti v raschëtah soorujeniy*, Moskva: Stroyizdat, 1982.
[13] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, CEN, Brussels, 2004.
[14] O.V. Romashko, V.M. Romashko, "Rozrakhunok enerhetychnoho resursu zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii", *Zb. nauk. prats UDUZT*, vyp. 186, pp. 23-30, 2019.
[15] V.M. Romashko, "Osnovy rozrakhunku zalizobetonnykh elementiv ta konstruktsii za deformatsiino-sylovoiu modelliu yikh oporu", *Zb. nauk. prats UDUZT*, vyp. 168, pp. 103-110, 2017.
[16] V.M. Romashko, "Zhorstkist ta modul deformatsii betonu v deformatsiinii modeli", *Beton y zhelezobeton v Ukrayne*, no. 6, pp. 2-6, 2007.
[17] O. Romashko, V. Romashko, "Evaluation of bond between reinforcement and concrete", *Matec Web Conf*, vol. 230, 02027, 2018.
[18] V.M. Romashko, O.V. Romashko, "Modul deformatsii betonu za dii tryvalykh ta malotsyklovykh navantazhen", *Budivelni konstruktsii: zb. nauk. prats NDIBK*, vyp. 70, pp. 143-150, 2008.
[19] V. Romashko, O. Romashko, "Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation", *Matec Web Conf*, vol. 230, 02028, 2018.
[20] R.I. Gilbert, S. Nejadi, An Experimental Study of Flexural Cracking in Reinforced Concrete Members under Sustained Loads: UNICIV Report № R-435, School of Civil and Environmental Engineering, Sydney: University of New South Wales, 2004.

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

[1]**Ромашко В.Н.,** д.т.н., доцент,
romashkovasyl@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3448-7489
[1]**Ромашко-Майструк Е.В.,** к.т.н.
romashkoolena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3353-2268
[1]*Национальный университет водного хозяйства и природопользования*
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина

Аннотация. В статье выполнена классификация, определены и детально проанализированы главные недостатки существующих моделей и методов расчета ресурса элементов строительных конструкций. Предложены универсальная модель и методика расчета общего и остаточного ресурсов железобетонных элементов и конструкций, находящихся под длительным воздействием эксплуатационных нагрузок. Обобщенная деформационно-силовая модель сопротивления железобетонных элементов и конструкций силовым воздействиям представлена расширенной системой уравнений механики деформируемого твердого тела. Показано, что важнейшие силовые и деформационные параметры диаграмм состояния железобетонных элементов на всех стадиях функционально связаны между собой не только жесткостью, но потенциальной энергией деформирования. Поэтому, благодаря применению гипотезы неизменности в единице объема и независимости от режима загрузки потенциальной энергии их предельного деформирования, эта модель развита до уровня энергетической.

Продемонстрированы главные преимущества разработанной модели сопротивления железобетонных элементов силовым воздействиям по сравнению с уже существующими силовыми и деформационными моделями в вопросах определения ресурса таких элементов.

Методику расчета общего и остаточного ресурса железобетонных элементов и конструкций предлагается строить по непосредственно измеренным при натурных обследованиях прогибам или шагу и ширине раскрытия нормальных трещин. На практике их можно определить геодезическими, фотограмметрическими или любыми другими способами.

Сочетание деформационно-силовой модели и энергетического критерия позволяет выполнять расчет общего и остаточного ресурсов железобетонных элементов и конструкций с единых методологических позиций. Поэтому предлагаемую «энергетическую» гипотезу рекомендуется использовать в качестве универсального энергетического критерия не только исчерпания несущей способности железобетонных элементов, но и ограничения их прогибов, а также ширины раскрытия нормальных трещин при действии нагрузок любой продолжительности.

Ключевые слова: железобетонные элементы, предельное деформирование, остаточный ресурс, энергетический критерий.

MODEL AND METHOD FOR CALCULATING THE RESOURCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

[1]**Romashko V.M.,** DSc, Associate Professor,
romashkovasyl@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3448-7489
[1]**Romashko-Maistruk O.V.,** PhD
romashkoolena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3353-2268
[1]*National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne*
st. Soborna, 11, Rivne, 33000, Ukraine

Abstract. The article classifies, identifies and analyzes in detail the main disadvantages of existing models and methods for calculating the resource of building structure elements. A universal model and method for calculating the general and residual resources of reinforced concrete elements and structures that are under prolonged influence to operational loads are proposed. The generalized deformation-force model of the reinforced concrete elements and structures resistance to force effects is represented by an extended system of equations of the deformable solid mechanics. It is shown that the most important force and deformation parameters of the reinforced concrete elements state diagrams at all stages are functionally interconnected not only by rigidity, but by the potential energy of deformation. Therefore, due to the application of the hypothesis of invariability in a unit of volume and independence from the loading mode of the potential energy of their limiting deformation, this model has been developed to the energy level.

The main advantages of the developed model of the reinforced concrete elements to force effects resistance in comparison with the existing force and deformation models in determining the resource of such elements are demonstrated. The methodology for calculating the general and residual life of reinforced concrete elements and structures is proposed to be built according to the deflections directly measured during field surveys or the step and width of the opening of normal cracks. In practice, they can be determined by geodetic, photogrammetric or any other means.

The combination of the deformation-force model and the energy criterion makes it possible to calculate the general and residual resources of reinforced concrete elements and structures from a unified methodological standpoint. Therefore, the proposed "energy" hypothesis is recommended to be used as a universal energy criterion not only for the bearing strength exhaustion of the reinforced concrete elements, but also for limiting their deflections, as well as the width of the normal cracks opening under the action of any duration loads.

Keywords: reinforced concrete elements, limiting deformation, residual life, energy criterion.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2021