

Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, Л. Ф. Первушова

ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», Київ

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕС, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Викладено співвідношення розрахунку надійності перерізу залізобетонної конструкції з урахуванням деформацій повзучості бетону та арматури, старіння бетону і накопичених пошкоджень у змінному температурно-вологісному режимі.

Ключові слова: ресурс, довговічність, АЕС.

Вступ

У залізобетонних конструкціях, що працюють в агресивному середовищі відбувається старіння бетону та арматури сталі, а також накопичення пошкоджень (руйнування захисного шару бетону та ін.), що впливає на їхню експлуатаційну надійність.

Основні положення оцінки залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій

Основні положення оцінки залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій:

залишковий ресурс кожної залізобетонної конструкції визначається допустимим ресурсом окремих її елементів (бетону, повздовжньої і поперечної арматури, закладних деталей, анкерів, зварних з'єднань);

в основу оцінки залишкового ресурсу повинно бути покладено:

- індивідуальний підхід до прогнозування технічного стану конструкції і її елементів на необхідний термін;

- принцип визначення «безпечної експлуатації по технічному стану» конструкції;

- експертну оцінку технічного стану і залишкового ресурсу;

фізична (детерміністична) модель накопичення незворотних змін у конструкційних матеріалах бетону (наповнювач, цемент) або складових елементах (бетон, арматура).

Модель накопичення пошкоджень обґрунтується:

точністю визначення параметрів;

наявністю відповідної системи діагностування та контролю.

Розрахунок залишкового ресурсу будівельних конструкцій, що тривалий час експлуатуються і мають пошкодження, необхідно виконувати за аналізом швидкості деградації конструкцій по параметрах критичних станів.

При розрахунку залишкового ресурсу необхідно визначити:

швидкість зміни деформацій для металоконструкцій і швидкість зміни напружень для бетону (1a);

швидкість зміни форми конструкції (1b);

швидкість зміни положення конструкції (1c);

аналіз можливості переходу конструкції в змінну систему внаслідок зростання змін форми, положення, деформацій (1d);

швидкість зміни конфігурації (1e);

швидкість повзучості (1f);

швидкість зростання прогинів конструкції (2a);

швидкість зростання коливань конструкції (2b);

швидкість накопичення мікротріщин (2c);

швидкість зростання розкриття тріщин та їхньої довжини (2d);

швидкість корозії металу, сульфатизації бетону (2f).

© Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, Л. Ф. Первушова, 2011

Карта факторів впливів на поверхню залізобетонних конструкцій

Параметри деградації, за якими визначається ресурс бетону:

- глибина сульфатизації поверхні конструкції, мм;
- глибина карбонізації поверхні конструкції, мм;
- густина накопичення мікротріщин, %;
- густина накопичення пор, %;
- накопичена деформація повзучості, %;
- відносне розбухання бетону, %;
- величина розкриття тріщин в бетоні ($a_{cr,1}$ і $a_{cr,2}$), мм;
- міцність бетону на стиск після довгострокової експлуатації R_r , МПа;
- ударна в'язкість бетону KCU , Дж/см²;
- динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{lg} , МПа $\sqrt{м}$;
- в'язкість руйнування бетону K_{lc} , МПа $\sqrt{м}$.

Параметри деградації металу, за якими визначається ресурс арматури:

- глибина поверхневої корозії, мм;
- глибина виразкової корозії, мм;
- зміна відносного здовження сталі, %;
- зміна відносного поперечного звуження сталі, %;
- кількість циклів навантаження, n ;
- зміна ударної в'язкості сталі, Дж/см².

Після визначення швидкості деградації матеріалів виконується розрахунок деградації елементів конструкції (закладних деталей, анкерів, зварних з'єднань тощо), а потім розрахунки конструкцій.

Параметри, за якими ведеться розрахунок залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій (ЗБК), що експлуатуються, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Контрольовані параметри	Параметри довговічності (ресурсу) ЗБК
Параметри міцності, тріщиностійкості, деформаційного ресурсу бетону та арматури	Швидкості зміни в часі (τ): міцності бетону $R_b(\tau)$; модуля пружності бетону $E_b(\tau)$; міцності арматури $R_s(\tau)$; відносного здовження при розриві арматури $A(\tau)$; відносного звуження при розриві арматури $Z(\tau)$; щільності енергії ударної в'язкості арматури з виточкою у вигляді $U - KCU(\tau)$; щільності енергії ударної в'язкості арматури з виточкою у вигляді $V - KCV(\tau)$; критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) арматури $K_{lc}(\tau)$; критичного КІН арматури при динамічному навантаженні $K_{lg}(\tau)$
Захисний шар бетону $a_{зш}$	Швидкості зміни в часі (τ): накопичення пошкоджень (ω) захисного шару $a_{зш}(1 - \omega(\tau))$; глибини карбонізації (y_k) захисного шару $y_k(\tau)$; розтріскування (N) захисного шару з критичною шириною розкриття тріщин на 1 пог. м довжини ЗБК $N(\tau)$; сумарного розкриття всіх тріщин на 1 м.п. довжини ЗБК $\sum_{i=1}^n a_{cr}(\tau)$

Контрольовані параметри	Параметри довговічності (ресурсу) ЗБК
Структура бетону для ЗБК, що належать до I категорії відповідальності	Швидкість та історія зміни параметрів: об'ємна маса CaO (τ); пористість $\Pi(\tau)$; зчеплення цементного каменю з заповнювачем $\psi(\tau)$
Радіаційний фон для ЗБК, що належать до I категорії відповідальності	Історія зміни потужності експлуатаційного нейтронного потоку на поверхню ЗБК та його інтегральна величина за весь період експлуатації $\varphi(\tau)$, $\Phi(\tau)$
Режим навантаження ЗБК	Історія зміни: температури $T^\circ(\tau)$; циклів навантаження $N(\tau)$; деформацій усадки $\varepsilon_{sh}(\tau)$; деформацій повзучості з мірою $\varphi_n(\tau)$
Тріщини	Місця виникнення і розвитку тріщин: нормальних $l(\tau)$, $a_{crc}(\tau)$; похилих $l(\tau)$, $a_{crc}(\tau)$; уздовж розтягнутої арматури $l(\tau)$; уздовж стиснутої арматури $l(\tau)$
Схема армування конструкції	Історія (сценарій): зміни положення арматури внаслідок втрати стійкості стиснутих стержнів, порушення зчеплення з бетоном при руйнації захисного шару; швидкості зростання ексцентриситетів і моментів унаслідок зростання викривлення ЗБК
Кліматичний район	Історія зміни параметрів впливу на ресурс
Схема діючих навантажень і технологічних впливів	Історія (у часі) зміни навантажень і впливів і програма (у часі) подальшого режиму навантаження
Хімічні забруднення ділянок ЗБК	Час впливу (τ): насичення олією; хімічними речовинами
Прогини, нахили і викривлення ЗБК	Швидкість зростання: прогинів $w(\tau)$; кута нахилів $\gamma(\tau)$; радіуса викривлення $r(\tau)$
Корозія бетону	Швидкість зростання ділянки враженого бетону $V(\tau)$
Корозія арматури	Швидкість корозії: робочої арматури; зварних з'єднань арматури; конструктивної арматури
Захисні покриття бетону, арматури, закладних деталей	Швидкість деградації та паспортний ресурс захисних покриттів
Стики між конструкціями та закладні деталі ЗБК	Швидкість корозії катету шва: зварних з'єднань; зубів різьбових з'єднань; поверхонь шайб та головок болтів; карбонізація та корозія бетону призми відриву закладних деталей

Карта факторів впливів на поверхню конструкції повинна містити таку інформацію: середовище (газ, повітря, рідина, ґрунт); перелік агресивних компонентів та їхні концентрації в середовищі; перелік штамів мікробів, бацил, грибів та їхні концентрації; електричний опір

середовища; інтенсивність сонячного опромінювання; інтенсивність нейтронного і фотонного опромінювання; температура середовища; циклічність зволоження; величина рухливих електричних токів.

Порядок визначення показників надійності будівельних конструкцій

1. Вірогідність безвідмовної роботи (за умови, що властивості конструкцій і зовнішні впливи незалежні) визначається як

$$P_j(t = t_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(S_j) \left[\int_S^{\infty} f(Y_j) dy_j \right] dS_j, \quad (1)$$

де $f(Y_j)_{t=t_k}$ – щільність розподілу властивостей конструкцій; $f(S_j)_{t=t_k}$ – щільність розподілу зовнішніх впливів; Y_j – характеристика (функція) властивості конструкції; S_j – характеристика зовнішнього впливу.

При відомих зовнішніх силових впливах, детермінованих величинах граничних значень властивостей

$$P_j(t = t_k) = P\{Y_j \geq S_{j,u}\} = \int_{S_{j,u}}^{+\infty} f(Y_j) dy_j, \quad (2)$$

де $S_{j,u}$ – зусилля від максимально можливих (розрахункових) або фактичних навантажень на конструкції при розгляді надійності за міцністю; зусилля від нормативних навантажень при розгляді надійності за появою тріщин; допустима ширина розкриття тріщин при розрахунку надійності по тріщиностійкості; допустимий прогин при розрахунку надійності по деформаціях. У останніх двох випадках даний запис визначає вірогідність відмови.

Зміна в часі функції, що характеризує здатність конструкції чинити опір дії ($R(t)$) і функції дії ($S(t)$) показана на рис. 1.

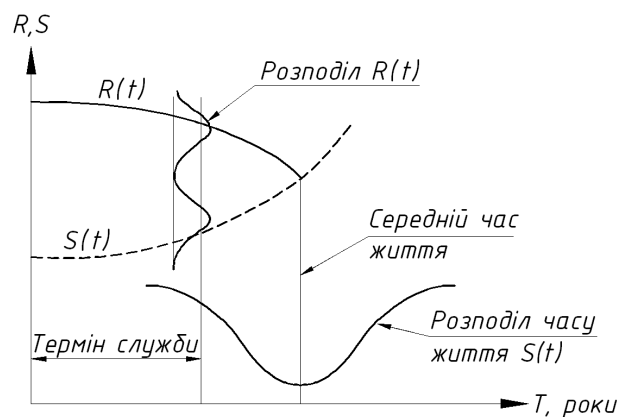


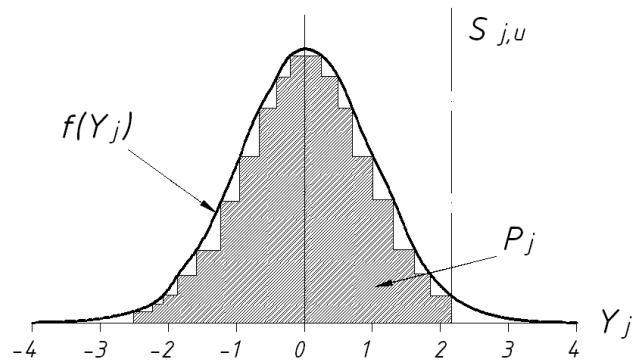
Рис. 1. Зміна в часі функції, що характеризує здатність конструкції чинити опір дії ($R(t)$) і функції дії ($S(t)$).

На практиці формула (2) означає необхідність вирахувати площу під графіком функції розподілу випадкового параметра $f(Y_j)$, відсічену детермінованим гранично допустимим значенням параметра $S_{j,u}$ (рис. 2).

У разі, коли параметр Y_j розподілений нормально, значення вірогідності відмови можна визначити за табульованою функцією стандартного нормального розподілу, якщо заздалегідь розрахувати характеристику безпеки γ_y за формулою

$$\gamma_y = \frac{Y - [Y]}{\sigma_y}, \quad (3)$$

де Y – математичне очікування функції властивості; $[Y]$ – граничне допустиме значення властивості; σ_y – середнє квадратичне відхилення функції властивості.

Рис. 2. Графік функції розподілу випадкового параметра $f(Y_j)$.

Значення функції стандартного нормального розподілу визначається як

$$F[\gamma_y] = 1 - z(\gamma_y)(b_1\chi + b_2\chi^2 + b_3\chi^3), \quad (4)$$

де $z(\gamma_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5[\gamma_y]^2}$; $\chi = 1/(1 + b_0\gamma_y)$; $b_0 = 0,33267$; $b_1 = 0,4361836$; $b_2 = 0,1201676$; $b_3 = 0,937298$.

Проводиться розрахунок вірогідності відмови за співвідношенням

$$P_j(\gamma_y) = F[\gamma_y]. \quad (5)$$

Конструкція задовольняє тій або іншій категорії технічного стану по j -й властивості, якщо

$$P_j(t) \geq R_{j,u}, \quad (6)$$

де $R_{j,u}$ – нормований рівень надійності j -ї властивості для тієї або іншої категорії технічного стану, який визначається за діючими стандартами.

2. Коефіцієнт безпеки визначається в відповідності з табл. 2 як

$$C = \bar{Y}/Y, \quad (7)$$

де C – коефіцієнт безпеки; \bar{Y} – математичне очікування міцності, що отримується в результаті розрахунку з урахуванням мінливості параметрів конструкцій при їхньому обстеженні; Y – міцність конструкцій, що визначається розрахунком з урахуванням розрахункових опорів матеріалів з урахуванням мінливості лише опорів матеріалів (розрахункова міцність); у ймовірнісній постановці – міцність конструкцій з нормованою забезпеченістю.

3. Показник вірогідності безвідмовної роботи в белах (Б) визначається за заздалегідь розрахованою вірогідністю безвідмовної роботи P :

$$\rho = -\lg(1 - P). \quad (8)$$

Таблиця 2

Категорія і відповідний технічний стан конструкцій	Показники надійності			
	Вірогідність безвідмовної роботи	Характеристика безпеки	Рівень надійності, Б**	Коефіцієнт безпеки*
1. Справне	$\geq 0,99865$	$\geq 3,0$	$\geq 2,87$	$(\geq 1,6)/(\geq 1,4)$
2. Працездатне	$0,99865 - 0,99$	$3,0 - 2,33$	$2,87 - 2,0$	$(1,6 - 1,4)/(1,4 - 1,35)$
3. Обмежено працездатне	$0,99 - 0,95$	$2,33 - 1,64$	$2,0 - 1,3$	$(1,4 - 1,3)/(1,35 - 1,3)$
4. Непрацездатне	$0,95 - 0,5$	$1,64 - 0$	$1,3 - 0,3$	$1,3 - 1,0$
5. Аварійне	$\leq 0,5$	≤ 0	$\leq 0,3$	$\leq 1,0$

* 1) для ЗБК при руйнуванні по бетону (чисельник) і при руйнуванні по арматурі (знаменник);
2) для останніх конструкцій коефіцієнт безпеки в знаменнику.

** Рівень надійності в белах (Б) визначається згідно з пунктом 3.

Процедура системи кількісної діагностики будівельних конструкцій викладена в [1] і наведена блок-схема, показана на рис.3, реалізується поетапно таким чином.

Етап 1. На основі робочих креслень будівлі або споруди, даних попередніх обстежень, аналізу навантажень і впливів визначаються розрахункові схеми несучих конструкцій, структурних елементів, будівлі або споруди в цілому.

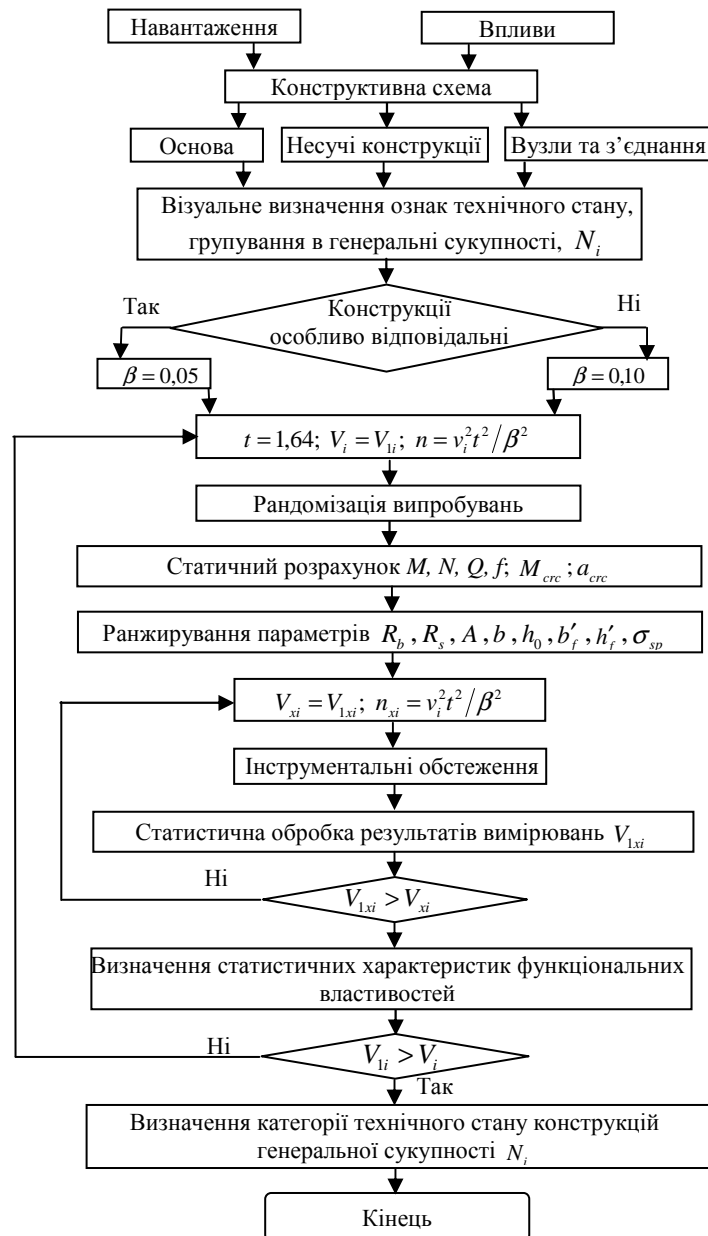


Рис. 3. Блок-схема алгоритму діагностики та оцінки технічного стану будівельних конструкцій.

Етап 2. Проводиться попереднє візуальне обстеження об'єкта. За візуальними ознаками і даними проектної документації виконується угруповання конструкцій в однорідні (однотипні) генеральні сукупності (N_i) або зони контролю.

Етап 3. Залежно від міри відповідальності і класифікації будівельних конструкцій задається гранична помилка (β) у визначенні функціональних властивостей несучих і огорожувальних конструкцій. При цьому $\beta = 0,5$ для конструкцій класу 2 і $\beta = 0,10$ для конструкцій класів 3 і 4.

Етап 4. Призначається план контролю (кількість випробувань – n_i) конструкцій з урахуванням мінливості (попереднім завданням коефіцієнта варіації V_{li}), достовірності визначення функціональної властивості (t) і її граничної помилки (β).

Етап 5. За допомогою рандомізації визначаються конструкції, що підлягають випробуванню, та їхній об'єм. Рандомізація дозволяє оптимізувати об'єм робіт по діагностиці й обстеженню будівельних конструкцій і понизити витрати при забезпеченні якості і достовірності контролю.

Етап 6. Проводиться статичний або динамічний розрахунок несучих конструкцій, структурних елементів, будівлі або споруди з урахуванням навантажень і впливів (M – момент, згинаючий момент; N – поздовжня сила; Q – поперечна сила, сила здвигу; M_{crc} – момент утворення тріщин; a_{crc} – максимальний розмір тріщин) з побудовою обвідної епюри зусиль. Визначаються оптимальні зони контролю, виходячи з обвідних епюр допустимих значень параметрів.

Етап 7. Визначаються параметри контролю конструкцій (R – розрахунковий опір матеріалу; R_b, R_s – розрахунковий опір бетону і арматури; A – площа перетину конструктивного елемента; b, h – основні геометричні параметри перетину конструкції; h_0, b'_f, h'_f – геометричні параметри елемента конструкції; σ – напруження в елементі або зусилля в перетині; σ_{sp} – попереднє напруження в конструкції, наприклад у канатах захисної оболонки) по їхньому ранжируванню згідно з детермінованим розрахунком функціональних властивостей.

Етап 8. Призначається план контролю (кількість випробувань n_{xi}) параметрів конструкцій з урахуванням мінливості (V_{xi} – коефіцієнт варіації параметра x конструкції i).

Етап 9. Проводиться контроль параметрів конструкцій інструментальними методами.

Етап 10. Виконується статистична обробка результатів вимірів параметрів конструкцій. Якщо коефіцієнт варіації (V_{xi}) вимірюваного параметра більший за заданого (V_{lxi}), тоді кількість випробувань параметрів збільшується. Виконується додаткове визначення параметрів стану конструкції (з етапу 8).

Етап 11. Проводиться оцінка статистичних характеристик функціональних властивостей конструкцій при відомих значеннях статистичних характеристик визначальних параметрів відомими методами (чисельної лінеаризації, Монте-Карло та ін.). За обчисленим коефіцієнтом варіації (V_i) можливе корегування кількості конструкцій, що підлягають обстеженню (етап 4).

Етап 12. Визначається вірогідність безвідмовної роботи конструкцій, будівель і споруд по першій і другій групах граничних станів.

Етап 13. Визначається категорія технічного стану сукупності конструкцій, будівлі або споруди згідно з табл. 2. Завершення роботи за оцінкою технічного стану будівельних конструкцій з підготовкою звітної документації згідно з робочою програмою моніторингу.

Оцінка надійності перерізу

Для кількісної оцінки стійкості споруди, що має пошкодження, приймається умова

$$\gamma_{fc} \cdot A(t) \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R(t) \cdot (1 - \omega), \quad (9)$$

де γ_{fc} – коефіцієнт сполучення навантаження; γ_n – коефіцієнт надійності; γ_c – коефіцієнт умов роботи споруди; $A(t)$ – навантаження, яке змінюється в часі; ω – накопичені пошкодження, що вимірюються в частках від одиниці.

Коефіцієнти $\gamma_{fc}, \gamma_n, \gamma_c$ є частинними коефіцієнтами запасу, що враховують окремо основні фактори. Коефіцієнт $\gamma_{fc} \leq 1$ враховує ймовірність розрахункових сполучень навантажень за нормами України або за Єврокодом, такі як основні ($\gamma_{fc} = 1$), особливі та будівельно-го періоду. Коефіцієнт $\gamma_n \geq 1$ враховує капітальність споруди, її відповідальність і значення

наслідків її руйнування. Коефіцієнт γ_c враховує головним чином приблизність розрахункових схем, особливості роботи споруди, які не відображені в розрахунковій моделі.

Крім того, розрахункова величина навантаження $A(t)$ визначається з урахуванням своїх коефіцієнтів запасу γ_f , так званих коефіцієнтів перенавантаження, що враховують варіацію навантажень відносно їхніх нормативних значень, і вони можуть бути різними для окремих видів навантажень, тобто

$$A = \sum \gamma_{fi} \cdot A_i^o. \quad (10)$$

У свою чергу узагальнений опір

$$R = \sum R_i^o / \gamma_{gi}, \quad (11)$$

де γ_{gi} – коефіцієнт безпечності по матеріалу.

У результаті через частинні коефіцієнти запасу умова (9) має вигляд

$$\gamma_{fc} \sum \gamma_{fi} \cdot A_i^o(t) \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \sum \frac{R_i^o(t)(1 - \omega_i)}{\gamma_{gi}}. \quad (12)$$

У випадку, коли в рівнянні (12) присутній знак рівняння, буде отримано найбільш економічне рішення задачі ресурсу та надійності.

Величина накопичення пошкоджень визначається залежністю

$$\omega(t) = \nu(t) \cdot t \cdot \prod_{i=1}^n K_i(I_i), \quad (13)$$

де $\nu(t)$ – швидкість накопичення пошкоджень; t – час (термін) експлуатації; I_i – інтенсивність агресивного середовища номером (i); $K_i(I_i)$ – коефіцієнт впливу інтенсивності агресивного середовища на швидкість накопичення пошкоджень.

Тоді в якості випадкових величин приймаємо розподілення по нормальному закону I, ν .

Резерв стійкості перерізу може бути записом у вигляді

$$F = \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \sum \frac{R_i^o(t)(1 - \omega(t)_i)}{\gamma_{gi}} - \gamma_{fc} \sum \gamma_{fi} \cdot A_i^o(t). \quad (14)$$

Отримаємо вираз для $m(F)$ і $\sigma^2(F)$ для даної інтенсивності агресивного середовища і швидкості процесів деградації конструкції у вигляді

$$\begin{cases} m(F) = m(R) - a_0 - c_1 \\ \sigma^2(F) = \sigma^2(R) + c_1^2 \left[\frac{\sigma^2(A)}{m^2(A)} + \frac{\sigma^2(\nu)}{m^2(\nu)} + \frac{\sigma^2(I)}{m^2(I)} \right], \end{cases} \quad (15)$$

де $c_1 = m(A) \cdot m(\nu) \cdot m(I) \cdot a_1$.

Якщо відомі ймовірності $P(\alpha_j)$ різних процесів у деградації α_j , то надійність перерізу ЗБК визначається за формулою повної ймовірності

$$P = \min \sum_{k,j} P(I_k) P(I_j) \Phi(\gamma_{kj}), \quad (16)$$

де $\gamma_{kj} = m(F)/\sigma(F)$ для k -го бала і j -го агресивного середовища; Φ – інтервал імовірності.

Умова міцності ЗБК хоча б за одним із критеріїв міцності I групи критичних станів ЗБК [2] розглядається як випадкова подія, яка може бути представлена у вигляді

$$B = (B_1 B_0 + \tilde{B}_1 B'_0) (B_3 B_{13} + \tilde{B}_2 B_{14}), \quad (17)$$

де $B_0 = B_2 (B_{01} + \tilde{B}_4 B_6) + \tilde{B}_2 [B_7 (B_8 B_9 + \tilde{B}_8 B_{10}) + \tilde{B}_7 (B_{01} + \tilde{B}_4 B_{11})]$.

$$B_{01} = B_{12} \tilde{B}_5 + \tilde{B}_{12} B_4 B_5, \quad (18)$$

де B_1, B_2, B_3 позначають події $M > 0, N > 0, Q > 0$ відповідно; $B_4 \dots B_{13}$ позначають події, що відповідають виконанню нерівностей, наведених у табл. 3.

Подія B'_0 отримується внаслідок взаємної заміни в виразах відповідних подій $B_4 \dots B_{12}$ параметрів a, h_0, F_a, R_a, R_{ac} на $a', h'_0, F'_a, R'_a, R'_{ac}$ відповідно [2] (тут уведено інші позначення нормативних опорів розтягнутої арматури, для того, щоб відрізнити їх від аналогічних параметрів у випадку зміни знака моменту).

Подія B_5 отримується із B_5 при $R'_{ac} = 0$. Випадковими величинами, відносно яких здійснюється лінеаризація нерівності $S_i > 0$ ($i=1..14$), є параметри A, I, v та опір бетону на стиск (R_{np}) і розтяг (R_p). Результуюче зусилля в перерізі ЗБК при $l-m$ ($l=1.2$) особливому сполученню впливів має вигляд

$$S_i = u_{i1} + \delta_{2i} u_{i2} A + \delta_{3i} (u_{i3} A I v + u_{i4} A v) \quad (i=1,2,3), \quad (19)$$

де $S_1 = M$; $S_2 = N$; $S_3 = Q$ – згинаючий момент, здовження і поперечна сила відповідно; $\delta_{11} = \delta_{22} = 1$; $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$; u_{ij} – коефіцієнти, що визначаються з рішення відповідних плоских задач теорії пружності й залежать від геометрії перерізу та характеру навантаження.

Таблиця 3

Події	Нерівності $S_i \geq 0$ ($i=4..13$) І групи критичних станів	Нумерація формул СНиП 2.03.01-84*	Нотатки
B_4	$\xi_R \cdot \xi \geq 0$, $\xi = x/h_0$, $N = R_{np} \cdot b \cdot x + R'_{ac} F'_a - R_a F_a$	п. 3.15 (28)	Опущені коефіцієнти m_σ, m_a, n_c, k_n
B_5	$R_{np} \cdot b \cdot x(h_0 - 0.5x) + R'_{ac} F'_a(h_0 - a') - Ne \geq 0$	(31), (30), (36)	Те саме
B_6	$N = R_{np} \cdot b \cdot x + R'_{ac} F'_a - \sigma_a F_a$ $\sigma_a = \left(2 \frac{1 - x/h_0}{1 - \xi_R} - 1 \right) R_a$	(37) (39)	Те саме
B_7	Сила N прикладена між рівнодіючими зусиль в арматурі $\frac{1}{2}(h_0 - a) + \frac{M}{N} > 0$		Проведена заміна N на $-N$
B_8	$R_a F_a e \geq R'_a F'_a e'$		Те саме
B_9	$R'_a F'_a(h_0 - a') + Ne \geq 0$	(61)	Те саме
B_{10}	$R_a F_a(h_0 - a') + Ne' \geq 0$	(62)	Те саме
B_{11}	За формулами (31), (36) $x = \xi_R \cdot h_0$	-	-
B_{12}	$2a' - \frac{N + R_a F_a}{R_{np} \cdot b} \geq 0$	-	-
B_{13}	$R_p \cdot b \cdot h_0 - Q \geq 0$	(84)	-

Лінеаризація виразів для S_1, S_2, S_3 і N^2 відносно A, I, v приводить до таких співвідношень:

$$S_i = S_{i0} + S_{i1}A + S_{i2}v + S_{i3}I + S_{i4}R_{np} + S_{i5}R_p, \quad (20)$$

$$N^2 = N_{20} + N_{21}A + N_{22}v + N_{23}I \quad (i=1,2,3),$$

де $S_{ij}, N_{20}, \dots, N_{23}$ – відповідні коефіцієнти. Параметри нормально розподілених величин S_1 (у випадку незалежності випадкових величин A, I, v, R_{np}, R_p) даються виразами

$$\left. \begin{aligned} m(S_i) &= S_{i0} + S_{i1}m(A) + S_{i2}m(v) + S_{i3}m(I) + S_{i4}m(R_{np}) + S_{i5}m(R_p) \\ \sigma^2(S_i) &= S_{i1}^2\sigma^2(A) + S_{i2}^2\sigma^2(v) + S_{i3}^2\sigma^2(I) + S_{i4}^2\sigma^2(R_{np}) + S_{i5}^2\sigma^2(R_p) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

де $m(S_i)$ $\sigma(S_i)$ – математичне очікування і дисперсії відповідних величин.

Імовірність відповідних подій (відмов) має вигляд

$$P(S_i \geq 0) = \Phi(\gamma_i), \quad (22)$$

де Φ – інтеграл імовірності.

Надійність ЗБК визначається надійністю найбільш небезпечного перерізу конструкції

$$F = \max(1 - P_\theta), \quad (23)$$

де θ – номер перерізу.

Феноменологічний опис процесу деградації поверхонь бетону

Процес деградації бетону протягом життєвого циклу описується класифікаційними таблицями дискретних станів. Ці таблиці, дані яких залежать від типу матеріалу і конструктивного призначення бетону, складені на підставі багаторічного досвіду українських науковців-експертів з нагляду, діагностики, обстеження і випробовування залізобетонних транспортних споруд. Вони містять характерні для i -го стану ($i = 1, 2, 5$) ознаки деградації бетону за параметром структури ω .

Для кожного з дискретних станів, як імовірності марковського ланцюга [3], за відомою початковою надійністю в першому стані визначено надійність бетону за першою групою граничних станів.

Для випадку початкової надійності $P(\tau = 0) = 0,9998$, ($\beta = 3,8$) у табл. 4 наведено значення надійності в дискретних станах (тут β - характеристика безпеки, числовий параметр зв'язаний з надійністю співвідношенням $P_s = F(-\beta)$, де F - стандартна функція нормального розподілу).

Міцність бетону R_σ є параметром, за значенням якого виконується розрахунок на міцність ЗБК. Після тривалої експлуатації τ років значення $R_{\sigma\tau}$ зменшується. Доцільно визначати швидкість деградації бетону за параметром $R_{\sigma\tau}$.

Таблиця 4

Технічний стан бетону після тривалої експлуатації			
Технічний стан	Надійність		$R_{\sigma\tau}$
	P_τ	β	
1. Нормальний	0,999844	3,8	(1,0 - 0,95) R_σ
2. Задовільний	0,998363	3,0	(0,95 - 0,85) R_σ
3. Незадовільний	0,992461	2,4	(0,85 - 0,75) R_σ
4. Непридатний для нормальної експлуатації	0,979771	2,1	(0,75 - 0,5) R_σ
5. Аварійний	0,958351	1,7	(> 0,5) R_σ

Таким чином, класифікаційні таблиці визначення дискретного стану бетону є фундаментальною базою моделі деградації.

Функція надійності

Функцією надійності описується процес деградації елемента протягом життєвого циклу, тобто встановлюється зв'язок між надійністю та часом експлуатації бетону. Постулюється, що швидкість деградації описується одним параметром λ – показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається сталим, незалежним від часу.

За функцію надійності згідно з гіпотезою D прийнято

$$P_\tau = 1 - p_i(\tau, \lambda) = 1 - \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau}, \quad (24)$$

де λ – інтенсивність відмов (швидкість деградації).

У термінах таблиці дискретних станів (див. табл. 4) P_t – імовірність того, що бетон перейде в стан k протягом часу $\tau < T_k$. Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ залежністю (24) установлюється зв'язок між надійністю бетону P_t в i -му стані та часом τ , що пройшов від початку експлуатації до стану $i = 2, \dots, 5$. Криві деградації бетону по структурному параметру за рівнянням наведено на рис. 4.

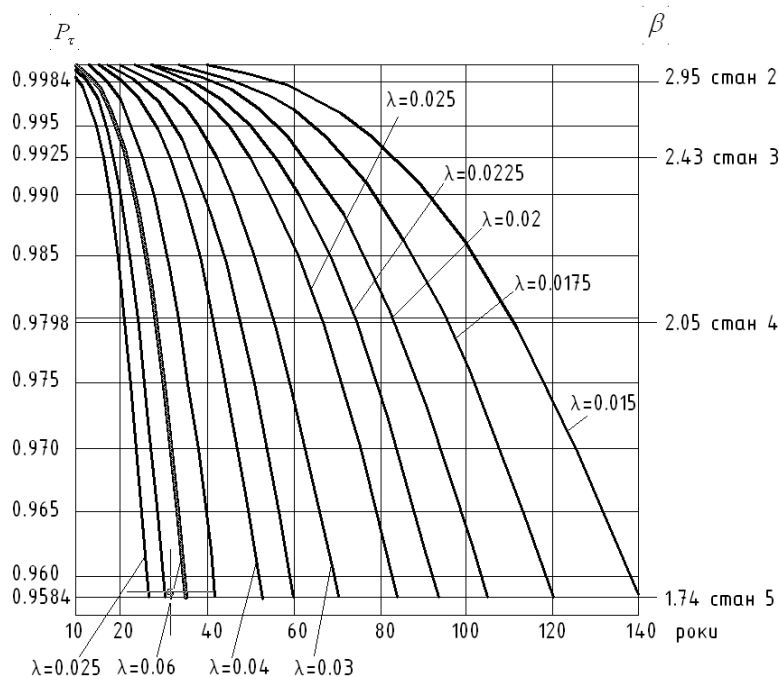


Рис. 4. Криві деградації бетону.

При $k = 5$ функція має вигляд

$$P_t = 0,008333(\lambda\tau)^k e^{-\lambda\tau}. \quad (25)$$

Визначення показника інтенсивності відмов

Розв'язок рівняння (24), відносно невідомої τ - часу експлуатації, можна отримати при відомому параметрі λ (надійність елемента P_t в i -му стані відома з класифікаційної табл. 4).

Довірчий інтервал для параметра розподілу λ Пуассона визначається за виразом

$$\left[\left(\sqrt{\lambda^*} - \frac{R_a}{2\sqrt{n}} \right); \left(\sqrt{\lambda^*} + \frac{R_a}{2\sqrt{n}} \right) \right], \quad (26)$$

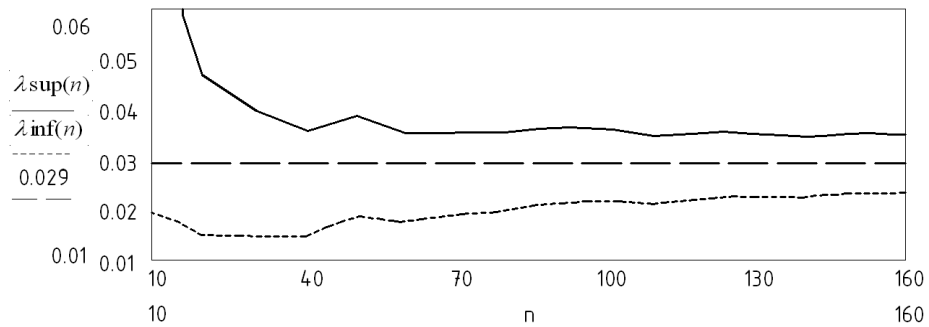
де λ^* – точкова оцінка параметра λ , $\lambda^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$; α – довірча ймовірність, $\alpha = 0,05$.

Для бетону встановлено верхню оцінку параметра інтенсивності відмов $\lambda_{sup} = 0,035$ та нижню $\lambda_{inf} = 0,023$. На рис. 5 показано залежність верхньої і нижньої оцінок від кількості елементів вибірки для бетону.

У запропонованій моделі параметр інтенсивності відмов λ визначається розв'язком рівняння (25) при відомих початкових умовах, визначених для окремого параметра пошкодження бетону:

надійності бетону в i -му стані $P_{\tau,i}$, яка визначається за табл. 4 на підставі класифікації за даними оглядів, діагностики, обстежень, перерахунку несучої здатності та обчислення дійсної (на момент обстеження) характеристики надійності β [4];

часу, що пройшов від початку експлуатації до i -го стану, τ_i .

Рис. 5. Довірчий інтервал параметра λ вибірки часу переходу в стан 5.

Цим самим визначається параметр інтенсивності відмов λ , який присвоюється тільки одному параметру пошкодження бетону. У такому трактуванні параметр λ є не детермінованою, а випадковою змінною, яка характеризує тільки даний стан бетону. У подальшому параметр λ заноситься в паспорт конструкції і служить технічним показником швидкості деградації. Процедура визначення параметра інтенсивності відмов застосовується до станів бетону, що досягли другого, чи нижчого стану.

Прогноз залишкового ресурсу

За відомим значенням параметра λ та надійністю елемента в i -му стані P_a , $i = 2, 3, 4, 5$, розв'язуванням рівняння (25) відносно невідомої τ_i знаходиться час, що пройде від початку експлуатації до стану i . На рис.6 показаний графік переходу стану бетону у вищий стан. При $i = 5$ визначається час до припинення експлуатації. Очевидно, що залишковий ресурс становитиме

$$T_p = \tau_5 - \tau_i, \quad (27)$$

де τ_5 - час, що пройде від початку експлуатації конструкції до стану 5 (прогнозований час), роки; τ_i - час від початку експлуатації конструкції до моменту складання прогнозу, роки.

Модель легко узагальнюється на випадок процесу з відновленням, тобто на випадок ремонту, який повертає стан бетону конструкції із стану i до вищого стану $j < i$. У цьому випадку за алгоритмом, наведеним вище, вираховується нове значення параметра інтенсивності відмов $\lambda_j < \lambda_i$, бетон набуває нових фізико-механічних властивостей, що описуються іншою деградаційною кривою (рис. 6) з ресурсом $T_{p,j} > T_{p,i}$.

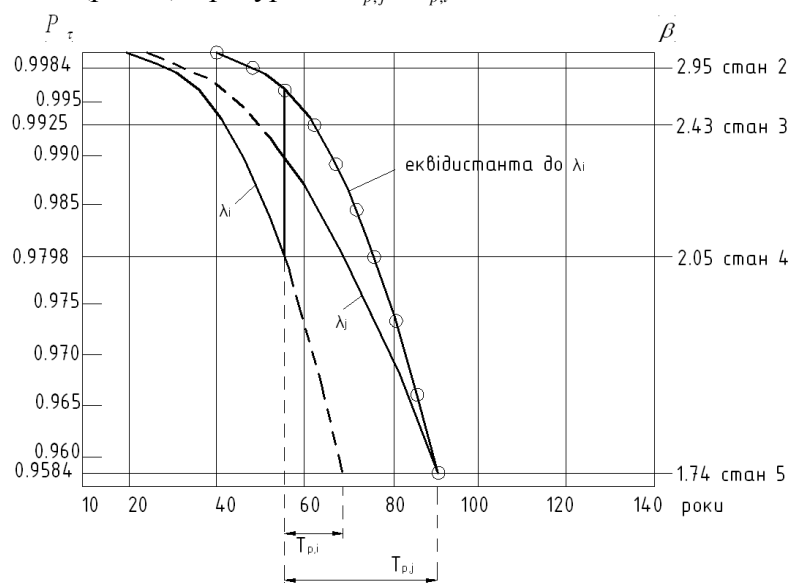


Рис. 6. Перехід стану бетону у вищий стан.

Точність моделі та відкриті проблеми

Оскільки модель базується на гіпотезі надійності і застосовується для окремого стану бетону, її точність буде такою, як і точність розрахунків у проектуванні – в довірчому інтервалі 0,95 - 0,05. Точність моделі, очевидно, буде тим вищою, чим нижчий наявний стан бетону на момент складання прогнозу.

Напрямки подальших досліджень

Для інженерної практики цікавим буде визначити характеристику безпеки, інтенсивність відмов і довірчу ймовірність запропонованої моделі для відповідних державних будівельних норм класів бетонів і окремо для параметрів структурних пошкоджень по накопиченню мікротріщин, пор, руйнуванню кристалічної решітки бетону та для нормативних режимів навантаження та категорії агресивного середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *РД ЭО 0624-2005* Мониторинг строительных конструкций АЭС. Основные положения. - К.: НАЭК «Энергоатом», 2005. - 47 с.
2. *СНиП* Бетонные и железобетонные конструкции. - М.: Госстрой СССР, 1989. - 78 с.
3. *Лантух-Лященко А.І.* Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. - 1999. - Вип. 57. - С. 183 - 188.
4. *Лантух-Лященко А.І.* Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації // Вісник Транспортної академії України. - 1999. - № 3. - С. 59 - 63.

Т. І. Матченко, Л. Б. Шамис, Л. Ф. Первушова

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС, НАХОДЯЩИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Изложены соотношения расчета надежности сечения железобетонной конструкции с учетом деформаций ползучести бетона и арматуры, старения бетона и накопления повреждений в переменном температурно-влажностном режиме.

Ключевые слова: ресурс, долговечность, АЭС.

T. I. Matchenko, L. B. Shamis, L. F. Pervushova

MAINTAINABILITY EVALUATION OF THE EXPLOITED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF NPP

Correlations of strength analysis of the reinforced concrete structure sections subject to creep deformation of concrete and armature, deterioration of concrete and damage accumulation in a varying temperature-dampy mode are expounded.

Keywords: resource, durability, NPP.

Надійшла до редакції 25.01.11