

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ҐРУНТІ

Матченко П.Т.

ЗАТ «Науково-технічний центр «РЕСУРС»

Постановка проблеми

До залізобетонних конструкцій, що працюють в ґрунті, відносяться підвалини, захисні споруди, тунелі, фундаменти і палі.

На залізобетонні конструкції, що працюють під землею, впливають не тільки навантаження від споруд, деформації основи, реологічні зміни в ґрунті, а також ґрунтова волога і ґрунтові течії, хімічні елементи мінералів ґрунту і газів, що знаходяться в порах ґрунту, електричні поля, бактерії і гриби.

За впливом на корозію бетону і арматури вологи і кисню в ґрунті можна виділити ділянки конструкцій, що знаходяться:

- в зоні промерзання ґрунту;
- в зоні нижче промерзання, але вище зони впливу капілярної вологи ґрунтових вод;
- в зоні впливу капілярної вологи;
- в зоні сезонного коливання рівня ґрунтових вод;
- в зоні завжди нижче рівня коливання ґрунтових вод.

Для кожної із перелічених зон характерні своя комбінація навантажень і впливів та свій механізм старіння бетону, арматури і конструкції в цілому. Показники агресивності середовища приймаються за нормами [2].

Комбінації впливів для кожної зони наступні.

1. Для першої зони:

- сезонне замерзання та відтавання вологи в порах;
- вплив кисню (карбонізація);
- вплив хімічних елементів мінералів ґрунту (сульфатизація);
- вплив бактерій і грибів;
- у випадку порушення цілісності захисного шару бетону – електрохімічна корозія арматури і закладних деталей.

2. Для другої зони:

- не характерні будь-які механізми старіння.

3. Для третьої зони:

- вплив кисню (карбонізація);
- вплив хімічних елементів ґрунту (сульфатизація);
- вплив бактерій і грибів, які в даному випадку є переважальним фактором пошкодження;

- у випадку порушення цілісності захисного шару бетону – електрохімічна корозія бетону;
 - розрив бетону продуктами корозії арматури.
4. Для четвертої зони:
- карбонізація;
 - вимивання СаО із цементного каменю (корозія І виду);
 - сульфатизація (корозія ІІ виду);
 - корозія арматури після порушення захисного шару бетону.
5. Для п'ятої зони характерні тільки корозія бетону І і ІІ виду.

Для оцінки величини пошкодження кожної із зон від дії кожного із перелічених впливів необхідно визначити долю від року дії кожного впливу і кількість циклів кожного впливу протягом року.

Для зони Чорнобилю періодичність і час дії кожного впливу приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Періодичність і час дії впливів на старіння залізобетону за рік в зоні Чорнобиля										
Впливи	Зона 1		Зона 2		Зона 3		Зона 4		Зона 5	
	Час дії, частка року	Кількість за рік	Час дії, частка року	Кількість за рік	Час дії, частка року	Кількість за рік	Час дії, частка року	Кількість за рік	Час дії, частка року	Кількість за рік
Сезонне замерзання та відтавання	0,02	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Вплив кисню і газів	1	1	1	1	1	1	0,25	4	-	-
Вплив хімічних елементів мінералів	0,1	5	-	-	1	1	0,25	4	-	-
Вплив бактерій і грибів	0,5	1	-	-	1	1	0,25	4	-	-
Корозія арматури електрохімічна	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-
Корозія арматури хімічна	1	1	-	-	-	-	0,25	4	-	-
Розрив бетону продуктами корозії арматури	1	1	-	-	1	1	0,5	2	-	-
Корозія бетону І виду	-	-	-	-	-	-	0,5	2	1	1
Корозія бетону ІІ виду	-	-	-	-	-	-	0,5	2	1	1
Корозія бетону ІІІ виду	-	-	-	-	-	-	0,5	2	1	1

З табл. 1 видно, що загальна методика довговічності залізобетонних конструкцій складається із 10 методик, що визначають ресурс захисного шару бетону і корозію арматури, близько розташованої біля поверхні, а також декількох методик, що визначають старіння бетону і арматури внаслідок повзучості і декількох методик, що визначають деградацію конструкції в цілому.

Деякі методики визначення ресурсу бетону і арматури приведено в роботах [3-13].

Механізми старіння залізобетону можна розділити на ті, що ідуть послідовно, і на ті, що можуть відбуватися паралельно (одночасно).

Приклад послідовного процесу це – карбонізація бетону → корозія арматури → розрив бетону продуктами корозії арматури.

Якщо процеси старіння йдуть паралельно, то довговічність кожної зони залізобетонної конструкції, що працює в ґрунті, визначається за критерієм найменшої довговічності, оціненої для кожного окремого механізму старіння або за критеріями:

– для першої зони – з непорушеним захисним шаром бетону

$$\sqrt{\frac{\omega_3^2}{[\omega_3]^2} + \frac{\omega_k^2}{[\omega_k]^2} + \frac{\omega_c^2}{[\omega_c]^2} + \frac{\omega_b^2}{[\omega_b]^2}} \leq 1;$$

– з порушеним захисним шаром

$$\sqrt{\left(\frac{\omega_{ea}}{[\omega_{ea}]} + \frac{\omega_{xa}}{[\omega_{xa}]}\right)^2 + \frac{\omega_p^2}{[\omega_p]^2}} \leq 1; \quad \frac{\omega_a}{[\omega_a]} \leq 1; \quad \frac{\omega_p}{[\omega_p]} \leq 1,$$

де ω_3 – доля від одиниці пошкодження бетону внаслідок циклічного замерзання;

$[\omega_3]$ – критично допустима величина пошкодження бетону внаслідок циклічного замерзання;

ω_k і $[\omega_k]$ – частка одиниці пошкодження захисного шару бетону внаслідок карбонізації і його критично допустима величина;

ω_c і $[\omega_c]$ – частка одиниці пошкодження захисного шару бетону внаслідок сульфатизації і його критично допустима величина;

ω_b і $[\omega_b]$ – частка одиниці пошкодження захисного шару бетону дією бактерій і грибів і його критично допустима величина;

ω_{ea} і $[\omega_{ea}]$ – частка одиниці втрати площі перерізу арматури внаслідок електрохімічної корозії та її критично допустима величина;

ω_{xa} і $[\omega_{xa}]$ – те саме внаслідок хімічної корозії арматури;

ω_p і $[\omega_p]$ – частка одиниці оголення робочої арматури внаслідок розриву захисного шару продуктами корозії арматури і критично допустима величина цього оголення.

Аналогічно записуються критерії довговічності для інших зон конструкції в ґрунті.

Основний зміст. Прогнозування змінювання міцності бетону

Попередню оцінку змінювання міцності бетону рекомендується виконувати за методикою [4].

При наявності достатньої інформації зниження міцності бетону R_{bt} і модуля пружності E_{bt} внаслідок деградації протягом t_i років експлуатації рекомендується визначати за формулами:

$$R_{bt} = (1 - \omega_R) \cdot R_b ;$$

$$E_{bt} = (1 - \omega_E) \cdot E_b ;$$

де R_b і E_b – розрахунковий опір і модуль пружності бетону відповідно чинному СНиП 2.03.01-84* [1];

ω_R , ω_E – показники пошкодження бетону в частка одиниці відповідно при оцінці міцності і пружності бетону. В свою чергу, можна записати.

$$\omega_R = K_b \cdot K_2 \cdot K_R \cdot K_3 \cdot t_i ;$$

$$\omega_E = K_b \cdot K_2 \cdot K_E \cdot K_3 \cdot t_i ;$$

де K_b – коефіцієнт, який залежить від агресивності води в середовищі ($K_b = 1$ – при контакті з прісною водою;

$K_b = 1,25$ – при контакті з морською водою);

K_2 – коефіцієнт переходу від властивостей кубика до властивостей призми ($K_2 = 1,675$);

K_R , K_E – комплекси впливу на бетон циклів замерзання і відтавання при заданій вологості повітря (табл. 2);

K_3 – комплекс впливу рівня напружень на швидкість змінювання деструктивного процесу (табл. 3);

t_i – кількість років експлуатації.

Комплекси K_R , K_E , K_3 , які приведені в табл. 1 і 2, вираховані на імовірнісній основі з забезпеченістю 0,95.

Таблиця 2 – Величини K_R , K_E для різних умов водонасиченості і морозостійкості (F)

Стан елемента конструкції за СНиП 2.03.01-84	Умови					
	особливо суворі ($F > 300$)		Суворі ($300 > F \geq 300$)		Помірні ($F \leq 300$)	
	K_R	K_E	K_R	K_E	K_R	K_E
Водонасичений	13,5	20,9	6,0	9,6	3,0	4,8
Епізодичне водопоглинання	9,0	13,8	3,0	4,6	1,6	2,5
Повітряний вологий стан	4,5	6,9	2,0	3,0	1,0	1,5

Таблиця 3 – Величина K_3 для різних умов впливу морозостійкості на напружений стан

Відношення σ_{\min}/R_b	$K_3 \cdot 10^3$			
	$F = 200$		$F = 300$	
	Стиснення	Розтягування	Стиснення	Розтягування
0,01	4,86	5,00	3,27	3,33
0,05	4,42	5,02	3,04	3,34
0,10	4,04	5,06	2,84	3,36
0,15	3,79	5,14	2,70	3,39
0,20	3,64	5,26	2,60	3,45
0,25	3,56	5,42	2,55	3,52
0,30	3,54	5,63	2,53	3,60
0,35	3,59	5,90	2,53	3,71
0,40	3,70	6,25	2,58	3,85
0,45	3,90	6,69	2,66	4,01
0,50	4,21	7,27	2,78	4,21
0,55	4,68	8,04	2,95	4,46
0,60	5,36	9,09	3,21	4,76
0,65	6,08	10,60	3,54	5,14
0,70	6,80	12,90	3,88	5,63
0,75	7,52	16,84	4,23	6,27
0,80	8,23	25,00	4,57	7,14
0,85	8,95	51,61	5,09	8,38

Примітка: σ_{\min} – напруження стиснення від постійних навантажень

Прогнозування карбонізації бетону від впливу повітря і газів

Існує декілька методик розрахунку швидкості карбонізації бетону [6]. Для попередніх оцінок на стадії розробки проекту рекомендується швидкість карбонізації горизонтальних незахищених поверхонь конструкцій визначати за табл. 4.

Таблиця 4 – Нормативні значення карбонізації за СНиП 2.03.11 [2]

Найменування	Агресивність середовища			
	підвищена		нормальна	мала
Марка бетону за вологонепроникністю, В(W)	В8	В6	В4	В4
Швидкість карбонізації, V , мм/рік	0,25	0,75	1,0	2,0

Значення в табл. 4 отримано на основі статистичних даних для мостових конструкцій.

Час для карбонізації захисного шару бетону товщиною (a) визначається за формулою

$$T_{кр} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot a/V,$$

де V – швидкість карбонізації, мм/рік; a – товщина прийнятого в проєкті захисного шару бетону, мм;

m_1 – коефіцієнт, який залежить від типу конструкції ($m_1 = 0,6$ для прогонових споруд із звичайною арматурою;

$m_1 = 1,0$ – для попередньо напружених конструкцій);

m_2 – коефіцієнт, який залежить від положення поверхні конструкції ($m_2 = 2,0$ – для захищених від сонця і опадів поверхонь, $m_2 = 1$ – для незахищених поверхонь);

m_3 – коефіцієнт, який залежить від агресивності повітря і який приймається рівним 2,0; 1,3; 1,0 при слабкому, середньому і високому ступеню агресивності повітря відповідно;

m_4 – коефіцієнт, який враховує наявність захисного покриття поверхонь конструкцій ($m_4 = 1,5$ – при терміні служби захисного покриття 30 років; в інших випадках m_4 визначається інтерполяцією).

Корозія бетону (і виду) внаслідок розчинення в воді гідроксида кальція (сао)

Залізобетонні палі і фундаменти, що знаходяться нижче рівня ґрунтових вод, зазнають впливу від розчинення гідроксиду кальцію СаО у воді і його вимивання з бетону. Розчинення СаО відбувається навіть у неагресивній воді. Швидкість розчинення СаО залежить від швидкості руху підземних вод V_0 (м/с), температури середовища t (°C); гідростатичного тиску H (10 м), а також властивостей бетону.

Довговічність одного м² бетонної поверхні, що знаходиться нижче рівня ґрунтових вод, визначається за формулою

$$\tau = \frac{[\omega] \cdot \text{Ц} \cdot a \cdot L}{(1 + b_1 \cdot V_0)(1 - b_2(t - 20)) \cdot K_f \cdot C_0 \cdot H \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5},$$

де τ – довговічність бетону, рік;

$[\omega]$ – допустима частка від одиниці втрати СаО;

Ц – складова цементу в бетоні, т/м³;

a – складова СаО в цементі;

$a \cong 0,63$ частка від одиниці;

K_f – коефіцієнт фільтрації (см/с) вологи в бетоні (табл. 5);

C_0 – коефіцієнт розчинення СаО в воді при 20 °C ($C_0 = 1,18$ г/л) (табл. 6);

H – висота гідростатичного тиску води в ґрунті, вимірюється 10 метрами (10 м);

L – товщина елемента залізобетонної конструкції, через яку вимірюється фільтрація (м);

V_0 – швидкість руху ґрунтової води (м/доба);

t – температура навколишнього середовища, °C;

b_1 – коефіцієнт впливу швидкості руху води на швидкість вимивання СаО (табл. 7), доба/м;

b_2 – коефіцієнт впливу температури, $1/^\circ\text{C}$ ($b_2 = 0,007$);

$b_3 = 31557600$ – кількість секунд в одному році;

$b_4 = 10^{-3}$ – кількість кубічних метрів в одному літрі;

$b_5 = 10^{-2}$ – кількість метрів в сантиметрі.

Таблиця 5

СНиП 2.03.11-85	
Марка бетону по водонепроникності	Коефіцієнт фільтрації, см/с (при рівноважній вологості), K_f
W4	Понад $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$
W6	Понад $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$
W8	Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 6 – Рівноважні концентрації гідроксиду кальцію для розчинів різних компонентів портландцементного каменю

Мінерал цементного каменю	Гранична рівноважна концентрація СаО, г/л	
	від	до
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot aq$	Близька до насиченого розчину	
$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot aq$	Те саме	
$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot aq$	0,031	0,052
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	1,06	1,08
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,415	0,56
$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot aq$	0,16	0,36
$4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot aq$	Більше 1,06	
$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot aq$	0,64	
Розкладання на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$	Менше 0,64	
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{SO}_4 \cdot aq$	0,045	

Таблиця 7

Розчинність СаО в залежності від V_0									
V_0 , м/доба	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
b_1 , доба/м	0	0,01	0,1	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

За величиною втрати СаО в залізобетоні в частках від одиниці (ω) можна перерахувати залишкову складову цементу в бетоні

$$\text{Ц}_\tau = \text{Ц} \cdot (1 - \omega).$$

Знаючи залишкову складову цементу, можна вирахувати його міцність (R_b); критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{Ic}); загальну пористість бетону (Π); вологість бетону (W_b) і модуль пружності бетону.

$$R_b = -17,18 + 0,1 \cdot R_{ag} + 14,15 \cdot (\Pi_{\tau}/B) + 0,49 \cdot R_c - 0,6 \cdot W - 39,75 \cdot R_{ag};$$

$$K_{Ic} = -0,0148 + 0,0011 \cdot R_{ag} + 0,133 \cdot (\Pi_{\tau}/B) + 0,0058 \cdot R_c - 0,0082 \cdot W_b - 0,5825 \cdot K_{ag};$$

$$\Pi = (B/\Pi_{\tau} - 0,21C) \cdot \Pi_{\tau}/1000;$$

$$W_b = W/100 + B/68;$$

$$E_b = -13515,9 + 184,7 \cdot R_{ag} + 11292,5 \cdot (\Pi_{\tau}/B) + 190,5 \cdot R_c - 269 \cdot W - 1690 \cdot K_{ag};$$

- де K_{ag} – кількість крупного заповнювача в одиниці об'єму бетону, кг/м³;
 $C = 0,8$ – ступінь гідратації цементу; Π – загальна пористість бетону, %;
 B/Π_{τ} – водно-цементне відношення, частки;
 Π_{τ}/B – цементно-водне відношення, частки;
 Π_{τ} – кількість цементу після вимивання, кг/м³;
 R_{ag} – міцність крупного заповнювача, МПа;
 R_c – активність цементу (~ 50,8 МПа);
 B – кількість води в бетоні, кг/м³;
 W – вологість середовища, %;
 W_b – вологість бетону, %.

Ресурс за міцністю бетону можна оцінити, порівнюючи значення R_b після τ років експлуатації з мінімально допустимим значенням R_b для навантаженої конструкції.

Електрохімічна корозія арматури

Електрохімічна корозія металу – це процес взаємодії металу з корозійним середовищем, при якому іонізація атомів металу і відновлення окислювального компонента корозійного середовища протікає не в однаковому акті, а їх швидкості залежать від електродного потенціалу.

Електрохімічна корозія конструкційних сталей найбільш характерна там, де мають місце блукальні токи, волога, забруднення хімічними речовинами, контакт металів з різним потенціалом.

Будівельні металоконструкції та їх зварні з'єднання можуть втрачати несну здатність за рахунок пошкодження корозією. Для визначення залишкового ресурсу конструкцій та їх зварних з'єднань необхідні прості в використанні, але достатньо надійні і точні інженерні методики розрахунків швидкості і глибини корозійного проникнення конструкційних сталей та їх з'єднань в корозійному середовищі.

Втрата маси при електрохімічній корозії визначається швидкістю анодного процесу розчинення, який характеризується щільністю електричного току, пропорційній втраті металу з одиниці площі

$$m = i_a \cdot \frac{A}{n \cdot F} \cdot t,$$

де m – кількість металу, який перейшов у ґрунт, насичений вологою з одиниці поверхні, ч·г/см²;

i_a – щільність анодного току, А;

A – відносна маса металу;

n – валентність;

F – число Фарадея;

t – час корозії, година.

У свою чергу, можна записати

$$i_a = \frac{\varphi_k^0 - \varphi_a^0}{R_a + R_k + R_{zp}},$$

де φ_k^0, φ_a^0 – електродні потенціали катода і анода (сталі та ґрунту), В (див. табл. 8);

R_a, R_k, R_{zp} – електричний опір аноду, катода і ґрунту відповідно.

Таблиця 8 – Характеристики основних металів

Найменування металу	Атом. маса, A	Пит. маса, γ	Температура плавлення, °С, T	Валентність, n	Співвідношення між одиницями швидкості корозії	Потенціали деяких електродних процесів	
						процеси	Потенціали φ_k і φ_a
Залізо	55,85	7,87	1539	2, 3, 6	$1 \text{ г/м}^2 \cdot 24 \text{ ч} =$ $=0,047 \text{ мм/год}$ $1 \text{ мм/год} =$ $=23,53 \text{ г/м}^2 \cdot 24 \text{ ч}$	$\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ $\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} =$ $=\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2e^-$ $\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} =$ $=\text{HFeO}_2^- + 2\text{H}^+ + 2e^-$ $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} =$ $=\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 8e^-$ $\text{Fe}^{2+} = \text{Fe}^{3+} + e^-$	$\varphi = -0,440 + 0,0295$ $\lg[\text{Fe}^{2+}]$ $\varphi = -0,047 - 0,0591 \text{ pH}$ $\varphi = 0,493 - 0,00886$ $\text{pH} + 0,0295 \lg[\text{HFeO}_2^-]$ $\varphi = -0,085 - 0,0591 \text{ pH}$ $\varphi = 0,771 + 0,0591 \times \lg$ $[\text{Fe}^{3+}]/[\text{Fe}^{2+}]$
Цинк	65,37	7,14	419,5	2	$1 \text{ г/м}^2 \cdot 24 \text{ ч} =$ $=0,051 \text{ мм/год}$ $1 \text{ мм/год} =$ $=19,8 \text{ г/м}^2 \cdot 24 \text{ ч}$	$\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} =$ $=\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 2e^-$ (амфотерний) $\text{Zn} = \text{Zn}^{2+} + 2e^-$ $\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} =$ $=\text{HZnO}_2^- + 3\text{H}^+ + 2e^-$ $\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{ZnO}_2^{2-} +$ $+4\text{H}^+ + 2e^-$	$\varphi = -0,400 - 0,0591 \text{ pH}$ $\varphi = -0,763 + 0,0295$ $\lg[\text{Zn}^{2+}]$ $\varphi = 0,054 - 0,0886$ $\text{pH} + 0,0295 \lg[\text{HZnO}_2^-]$ $\varphi = 0,041 - 0,1182$ $\text{pH} + 0,0295 \lg[\text{ZnO}_2^{2-}]$

Для переходу виміру корозії від втрати металу з площі до глибини корозії в мм, врахуємо коефіцієнти переходу і отримаємо:

$$V_{кр} = \frac{m}{S} \cdot \frac{10^9 \cdot 8,766A}{\rho \cdot h \cdot F} \left[\frac{\varphi_k^o - \varphi_a^o}{R_a + R_k + R_{zp}} \right], \text{ мм/рік,}$$

де ρ – густина сталі;
 S – площа поверхні сталі, м²;
 V – швидкість корозії, мм/рік;
 Δh – глибина корозії, мм.

Для застосування запропонованої формули необхідно знати електродні потенціали сталі і ґрунту кожного шару, електричний опір на поверхні сталі, ґрунту і захисного шару бетону з тріщинами на глибині в ґрунті. Ці дані можна отримати на підставі інструментальних обстежень ґрунтів і конструкцій в ґрунті.

Для попередньої оцінки довговічності арматури залізобетонних конструкцій з пошкодженим захисним шаром, що знаходяться в ґрунті, доцільно визначати швидкість корозії за характеристиками корозійної активності ґрунту, а ресурс сталі – за формулою

$$\tau = \tau_{зи} + (h_0 - [h])/V_{кр}, \text{ рік}$$

де τ – ресурс арматурного стержня, рік;
 $\tau_{зи}$ – ресурс захисного шару, рік;
 h_0 – попередня товщина або діаметр сталевого елемента, мм;
 $[h]$ – критично допустимий мінімальний діаметр, який забезпечує вимоги міцності конструкції, мм;
 $V_{кр}$ – швидкість корозії арматурної сталі в конкретному середовищі.

Інженерна методика оцінки корозії арматури залізобетонних конструкцій, розташованих в ґрунті

Різні температури ґрунта і споруд на різних глибинах сприяють руху в ґрунті вологи: насичене парою ґрунтове повітря переміщується в зоні аерації з більш нагрітого шару до менш нагрітого, де волога конденсується на поверхні споруди. Різниця в температурі окремих частин споруди сприяє виникненню термогальванічних пар з катодними і анодними ділянками, а коливання вологості і доступ кисню ще більше посилює корозію металів. Концентрація солей впливає на електропровідність розчину, і зі збільшенням концентрації солей збільшується інтенсивність корозії.

Корозійну активність ґрунту можна визначити за бальною системою:

- 0 балів – відсутня активність;
- 1 бал – низька активність;
- 2 бали – середня активність;
- 3 бали – підвищена активність;

- 4 бали – висока активність;
- 5 балів – надмірно висока активність.

В табл. 9 приведено значення балів корозійної активності ґрунтів з глибиною по зонах їх вологості і значення кислотно-лужного балансу (pH). В табл. 10 приведено швидкості корозії арматурних сталей в ґрунтах з різною корозійною активністю.

Таблиця 9 – Значення балів корозійної активності ґрунту по зонах вологості і значення pH

Назва зон ґрунту по вологості	Значення pH			
	2,5-5,0	5,0-7,5	7,5-10	10-12,5
Промерзання	5	4	3	2
Сухий ґрунт	0	0	0	0
Капілярна волога	5	4	3	2
Коливання рівня ґрунтових вод	4	3	2	2
Нижче рівня ґрунтових вод	3	2	1	1

Таблиця 10 – Класифікація ґрунтів за корозійною активністю арматурних сталей і швидкості корозії, мм/рік

Назва	Група корозійної активності ґрунтів						
	Відсутня бал 0	Низька бал 1	Середня бал 2	Підвищені бал 3	Висока бал 4	Особливо висока бал 5	
Щільність електричного опору ґрунтів, Ом·м	>300	300–100	100–20	20–10	10–5	5–0	
Уявний електричний опір, Ом·м ² /м	>30	300–100	20–100	10–20	5–10	5	
Очікуємо швидкість корозії арматурних сталей, мм/рік	(A240) А-I	0,03	0,03–0,3	0,03–0,8	0,8–1,6	1,6–2,6	>2,6
	(A300) А-II	0,025	0,025–0,25	0,25–0,65	0,65–1,3	1,3–2,1	>2,1
	(Ac300) Ac-II	0,025	0,025–0,25	0,25–0,65	0,65–1,3	1,3–2,1	>2,1
	(A400) А-III	0,02	0,02–0,2	0,2–0,5	0,5–1,0	1,0–1,6	>1,6
	Ат-IIIc	0,025	0,025–0,25	0,05–0,65	0,65–1,3	1,3–2,1	>2,1
	(A600) Ат-IV	0,015	0,015–0,15	0,15–0,38	0,38–0,76	0,76–1,23	>1,23
	Ат-IVc	0,01	0,01–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	>1,0
	Ат-IVк	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	(A800) Ат-V	0,01	0,01–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	>1,0
	Ат-Vк	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	Ат-Vск	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	(A1000) Ат-VI	0,007	0,007–0,07	0,07–0,15	0,15–0,30	0,30–0,60	>0,60

Назва		Група корозійної активності ґрунтів					
		Відсутня бал 0	Низька бал 1	Середня бал 2	Підвищені бал 3	Висока бал 4	Особливо висока бал 5
Оцінюємо швидкість корозії арматурних сталей, мм/рік	Ат-VІк	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,45
	Ат-VІІ	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	ВР-I	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	В-II	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48
	ВР-II	0,005	0,005–0,05	0,05–0,12	0,12–0,24	0,24–0,48	>0,48

Прогноз корозії арматури діаметром більше 12 мм

За початок відрахунку часу корозії арматури T_a приймається час, потрібний для повної нейтралізації бетону захисного шару внаслідок розтріскування, карбонізації, сульфатизації або фільтрації цементного каменю.

Швидкість корозії для арматурних стержнів і дротів малого діаметру до 12 мм рекомендується визначати за методикою, викладеною вище. Для діаметрів арматури більше 12 мм функція зниження поперечного перерізу арматури (ΔF_a) відповідає функції відмови за теорією надійності

$$\Delta F_a = \left(e^{\lambda(t-T_{кр}) \cdot K} - 1 \right) \cdot 100, \%,$$

де ΔF_a – площа втрати перерізу арматури в відсотках від початкової площі;

λ – показник функції корозії, який характеризує її швидкість при різних умовах експлуатації і різних марок сталі;

t – час експлуатації конструкції;

$T_{кр}$ – час втрати захисного шару бетону своїх захисних властивостей, рік;

K – коефіцієнт прискорення процесу корозії, обумовлений зовнішніми умовами і який визначається за формулою

$$K = K_{тр} \cdot K_{г} \cdot K_{з},$$

де $K_{тр}$ – коефіцієнт, який враховує наявність тріщин після виготовлення конструкції (при проектуванні $K_{тр} = 1,0$);

$K_{г}$ – коефіцієнт, який враховує якість гідроізоляції (при проектуванні $K_{г} = 1,0$);

$K_{з}$ – коефіцієнт, який враховує кліматичну зону (при проектуванні $K_{з} = 1,0$).

Значення коефіцієнтів $K_{тр}$ і $K_{з}$ приведені в табл. 11.

Таблиця 11

Вид арматури	$K_{тр}$ при розмірі тріщин a_{cr} , мм				K_3 у кліматичних зонах		
	0	<0,2	<0,5	>0,5	Північ	Центр	Південь
Арматура з'єднань швів омонолічування	1,0	1,0	1,10	1,25	1,20	1,0	0,9
Хомути на фасадній поверхні	1,0	1,1	1,25	1,5	1,20	1,0	0,9
Хомути на захищених поверхнях конструкцій	1,0	1,0	1,0	1,25	1,10	1,0	0,8
Основна арматура біля поверхонь під впливом атмосфери	1,0	1,1	1,25	1,50	1,1	1,0	0,9
Основна арматура біля поверхонь під впливом атмосфери	1,0	1,0	1,10	1,25	1,1	1,0	0,8

Значення коефіцієнта, який враховує якість гідроізоляції, K_r , приведено в табл. 12.

Таблиця 12

Найменування	Значення K_r при якості гідроізоляції		
	а	б	в
Шви омонолічення	1,0	1,1	1,25
Фасадні поверхні	1,0	1,2	1,5
Захищені від атмосфери поверхні	1,0	1,0	1,1

Якість гідроізоляції відмічено трьома станами:

- а) дефекти відсутні;
- б) локальні дефекти;
- в) має місце протікання ізоляції.

Базовий показник функції λ приймається за даними характеристик марок сталей та агресивності середовища.

Напрямки подальших досліджень

Зібрати, обробити статистичні дані за швидкостями корозії арматурних сталей діаметром більше 12 мм і побудувати функції λ для всіх класів арматурних сталей.

Література

1. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР. Москва. – 1989.
2. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии. Государственный комитет СССР по делам строительства. Москва. – 1986.
3. Матченко П.Т. Інженерна методика розрахунку довговічності залізобетонних конструкцій, що знаходяться під впливом атмосферних опадів / Будівництво України, 2009, № 9-10. – С. 35-38.
4. Матченко П.Т. Інженерна методика визначення залишкового ресурсу бетону / Будівництво України, 2009, № 5. – С. 36-37.
5. Матченко Т.І., Матченко П.Т., Куніченко А.О. Методика визначення залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій сховища відпрацьованого ядерного палива на ЧАЕС / Будівництво України, 2008, № 6. – С. 33-39.
6. Матченко П.Т. Інженерна методика розрахунку залишкового ресурсу захисного шару бетону робочої арматури залізобетонних конструкцій, що експлуатуються / Будівництво України, 2010, № 3.
7. Матченко П.Т. Методика розрахунку ресурсу бетону, що накопичує теплові нейтрони / Будівництво України, 2010, № 1.
8. Матченко П.Т. Інженерна методика розрахунку залишкового ресурсу сталеві арматури в корозійному середовищі / Будівництво України, 2010, № 5.
9. Матченко Т.І. Методика визначення запасу міцності зварних з'єднань опорної ферми реактора після довгострокової експлуатації / Будівництво України, 2007, № 9. – С. 30-32.
10. Матченко П.Т. Методика розрахунку залишкового ресурсу сталеві арматури циклічно навантажених залізобетонних конструкцій, що експлуатуються / Будівництво України, 2009, № 1-2. – С. 44-47.
11. Матченко Т.І. Визначення швидкості корозії закладних деталей шахти реактора / Будівництво України, 2008, № 4. – С. 36-38.
12. Матченко Т.І. Використання теорії графів у методі експертних оцінок визначення залишкового ресурсу захисної оболонки реактора / Будівництво України, 2007, № 7. – С. 41-43.
13. Матченко Т.І., Матченко П.Т., Рожновська О.С. Визначення швидкості протікання борної води крізь залізобетонну оболонку шахти реактора/Будівництво України, 2006, № 2. – С. 43-46.