

УДК 69.057.12

## ІНЖЕНЕРНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ СУЛЬФАТНІЙ КОРОЗІЇ БЕТОНУ

БАРДАХ О. Ю. <sup>1\*</sup>, *інженер*  
САВИЦЬКИЙ М. В. <sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*  
НІКІФОРОВА Т. Д. <sup>3</sup>, *д.т.н., доцент*  
ШЛЯХОВ К. В. <sup>4</sup>, *к.т.н., доцент*

<sup>1\*</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна

<sup>2</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>3</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: [nikiforova\\_t@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova_t@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: [6lyahov@i.ua](mailto:6lyahov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

**Анотація.** У статті представлено методологічний підхід до розрахунку міцності перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії агресивного сульфатного середовища. **Мета.** Розробка інженерного (спрощеного) методу розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. **Методика.** Метод розрахунку міцності перерізів залізобетонних елементів за граничними станами. **Результати.** Розроблено інженерний метод розрахунку міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів при дії агресивного сульфатного середовища. Для верифікації та обґрунтування розробленого інженерного методу виконані розрахунки міцності перерізів чисельно-аналітичним методом і за розробленою методикою. **Наукова новизна.** Отримані залежності для оцінки несучої здатності перерізів, нормальних до поздовжньої осі залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону для трьох стадій напружено деформованого стану: стадії зміцнення поверхневих шарів; стадії зниження міцності бетону з периферії вглиб перерізу та стадії руйнування поверхневих шарів. **Практична значимість.** Розроблений інженерний метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону задовільно оцінює міцність перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів (похибка обчислень 5%) і може використовуватися для практичних розрахунків.

**Ключові слова:** сульфатна корозія бетону, залізобетонні конструкції, напружено деформований стан, розрахунок за граничними станами

## ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СУЛЬФАТНОЙ КОРРОЗИИ БЕТОНА

БАРДАХ А. Е. <sup>1\*</sup>, *инженер*  
САВИЦКИЙ Н. В. <sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*  
НИКИФОРОВА Т. Д. <sup>3</sup>, *д.т.н., доцент*  
ШЛЯХОВ К. В. <sup>4</sup>, *к.т.н., доцент*

<sup>1\*</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>3</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: [nikiforova\\_t@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova_t@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: [6lyahov@i.ua](mailto:6lyahov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

**Аннотация.** В статье представлен методологический подход по расчету прочности сечений изгибаемых железобетонных элементов при действии агрессивной сульфатной среды. **Цель.** Разработка инженерного (упрощенного) метода расчета

прочности изгибаемых железобетонных элементов при сульфатной коррозии бетона. **Методика.** Метод расчета прочности сечений железобетонных элементов по предельным состояниям. **Результаты.** Разработан инженерный метод расчета прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов при действии агрессивной сульфатной среды. Для верификации и обоснования разработанного инженерного метода выполнены расчеты прочности сечений численно-аналитическим методом и по разработанной методике. **Научная новизна.** Получены зависимости для оценки несущей способности сечений, нормальных к продольной оси железобетонных элементов при сульфатной коррозии бетона для трех стадий напряженно деформированного состояния: стадии упрочнения поверхностных слоев; стадии снижения прочности бетона с периферии вглубь сечения и стадии разрушения поверхностных слоев. **Практическая значимость.** Разработанный инженерный метод расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов при сульфатной коррозии бетона удовлетворительно оценивает прочность сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов (погрешность вычислений 5%) и может использоваться для практических расчетов.

**Ключевые слова:** сульфатная коррозия бетона, железобетонные конструкции, напряженно-деформированное состояние, расчет по предельным состояниям

## ENGINEERING METHOD OF CALCULATION OF DURABILITY OF THE BINDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AT SULFATE CORROSION OF CONCRETE

BARDAKH O. Yu. <sup>1\*</sup>, *engineer*  
 SAVYTSKYI M. V. <sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*  
 NIKIFOROVA T. D. <sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Docent*  
 SLYAKHOV K. V. <sup>4</sup>, *Ph. D. (Tech.), Docent*

<sup>1\*</sup> Department of Reinforce-Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine

<sup>2</sup> Department of Reinforce-Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>3</sup> Department of Reinforce-Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine, e-mail: [nikiforova\\_t@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova_t@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Department of Reinforce-Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine, e-mail: [6lyahov@i.ua](mailto:6lyahov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

**Annotation.** The article presents a methodological approach for calculating the durability of cross sections of the bent reinforced concrete elements at the action of aggressive sulfate environment. **Purpose.** Development of engineering (simplified) method of calculation of durability of the bent reinforced concrete elements at sulfate corrosion of concrete. **Methods.** Method of calculation of durability of cross sections of reinforced concrete elements by limiting states. **Results.** The engineering method of calculation of durability of cross sections, normal to the longitudinal axis of the bent reinforced concrete elements at the action of aggressive sulfate environment is developed. For verification and justification of the developed engineering method the calculations of durability of cross sections were completed of calculation by a numeral-analytical method and by the developed method. **Scientific novelty.** Calculation formulas are obtained for estimating the load-bearing capacity of cross sections normal to the longitudinal axis of reinforced concrete elements by sulfate corrosion of concrete for three stages of a stress-strain state: the hardening stages of surface layers; stages of reducing the durability of concrete from the periphery to the interior of the section and the stage of destruction of the surface layers. **Practical value.** The developed engineering method for calculating the durability of cross sections of the bent reinforced concrete elements at the sulfate corrosion of concrete satisfactorily estimates the durability of cross sections normal to the longitudinal axis of the bent reinforced concrete elements (calculation error of 5%) and can be used for practical calculations.

**Keywords:** sulfate corrosion of concrete, reinforced concrete structures, stress-strain state, calculation by limiting states

### Актуальність

Досвід експлуатації бетонних і залізобетонних будівельних конструкцій і споруд в умовах впливу будівельних конструкцій від корозії – одна з головних проблем у вирішенні питання забезпечення довговічності будівель і споруд в цілому.

Для запобігання корозійного руйнування залізобетонних конструкцій в залежності від ступеня агресивності середовища слід застосовувати шляхом виконання високо затратних заходів

агресивних чинників зовнішнього середовища, свідчить про складність забезпечення проектної довговічності конструкцій. Тому захист

первинний або вторинний види захисту або їх поєднання [1]. Розрахунок конструкцій з бетону та залізобетону ведеться за умовою недопущення корозії, як бетону, так і арматури. Однак виключення можливості корозійного пошкодження конструкції нерідко досягаються вторинного захисту. З іншого боку, для деяких

конструкцій і видів пошкоджень виконання вторинного захисту практично неможливо.

Найчастіше корозія арматури спостерігається в результаті ураження бетону рідкими середовищами, що містять сульфати. При цьому може відбуватися взаємодія сульфатів води з гідроалюмінатами цементу, в результаті чого утворюються продукти, що збільшуються в об'ємі, і які викликають кристалізаційний тиск і утворення мікротріщин в бетоні, полегшуючи при цьому проникнення інших агресивних речовин до арматури.

У нормах [1] не враховується можливість одночасної дії комплексу агресивних агентів, не допускається виникнення корозійних процесів, не регламентуються межі вмісту речовин, агресивних по відношенню до сталевих арматур та ін. Це може привести до неправильної оцінки результуючої впливу зовнішнього середовища.

Крім того, в нормах не зазначено термін дії первинного і вторинного захисту. В результаті заходи, які виконуються для захисту від корозії, можуть бути завищеними, що призводить до подорожчання будівництва або заниженими, що може привести до передчасної втрати конструкцією експлуатаційних характеристик.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Різноманіття факторів і складність процесів, що впливають на кінетику сульфатної корозії визначили, в основному, емпіричний характер залежностей для опису закономірностей сульфатної корозії бетону.

Аналіз результатів існуючих досліджень [4-10] дозволяє виділити два напрямки побудови методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів в умовах впливу зовнішнього агресивного середовища.

У першому напрямку широко використовуються емпіричні залежності, отримані, безпосередньо, узагальненням результатів численних випробувань залізобетонних елементів. Зазначений підхід використовується в діючих нормах проектування [2, 3]. Для випадку впливу типу "середовище-навантаження" дослідження такого роду тільки набувають поширення.

В іншому напрямку розвитку теорії залізобетону використовуються результати випробувань найпростіших зразків бетону і арматури (рівняння механічного стану матеріалів) і модельні уявлення залізобетонних елементів [4-8, 10]. Основні труднощі при оцінці напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з комплексними перерізами пов'язані з оцінкою зусиль, які сприймаються бетоном стиснутої і розтягнутої зон.

Таким чином, сьогодні існує досить розвинена теоретична база для оцінки напружено-деформованого стану перерізів, нормальних до поздовжньої осі залізобетонних елементів, однак всі розроблені методи орієнтовані на застосування методів чисельного інтегрування, тож необхідна розробка інженерної методики оцінки міцності

згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону для її практичного застосування.

#### Мета

Метою роботи є розробка інженерного (спрощеного) методу розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону.

#### Виклад основного матеріалу

При дії на бетон рідких сульфатних розчинів, агресивних до бетону за ознакою корозії бетону III-го виду в бетоні розвиваються як конструктивні, так і деструктивні процеси. Ці процеси пов'язані з впливом води (адсорбційний ефект зниження міцності, процес гідратації цементу), так і, власне, з впливом накопичення новоутворень в структурі бетону. При одночасній дії конструктивних і деструктивних процесів в елементарному об'ємі бетону його міцність змінюється у вигляді залежності, наведеної на рис. 1.

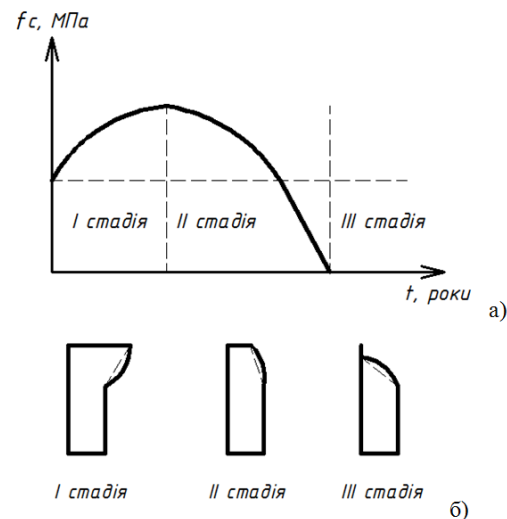


Рис. 1. Схема зміни міцності бетону при постійному впливі сульфатних розчинів / Scheme of changes durability of concrete at the constant influence of sulfate

$$\left( \begin{array}{l} I - Q_{SO_3}(z, t) \leq Q_{SO_3,1}^{solution} < Q_{SO_3}(z, t) < Q_{SO_3,U} \\ II - Q_{SO_3}(z, t) < Q_{SO_3,1}^{solution} < Q_{SO_3}(z, t) < Q_{SO_3,U} \\ III - Q_{SO_3}(z, t) \geq Q_{SO_3,U} \end{array} \right);$$

a) діаграма зміни міцності / a diagram of the change in durability;

б) вид епюри напружень в перерізі / the form of the stress diagram in the section

Можна виділити три стадії стану елементарного об'єму бетону, пов'язані з впливом накопичення новоутворень: стадія I - стадія зміцнення, стадія II - стадія зниження міцності, стадія III - стадія руйнування. У зв'язку з цим, можливо виділити три стадії стану бетону перерізів, нормальних до поздовжньої осі залізобетонних елементів - стадія зміцнення поверхневих шарів (стадія I), стадія зниження міцності бетону з периферії вглиб перерізу (стадія II), стадія руйнування поверхневих шарів

(стадія III). Відповідно до цих стадій отримані розрахункові формули з урахуванням положення висоти стиснутої зони і механізму руйнування перерізу елемента (по арматурі або бетону стиснутої зони).

Розрахункові залежності базуються на наступних передумовах:

- гранична відносна висота стиснутої зони бетону ( $x_R$ ) в будь-який момент часу і при будь-якому ступеню руйнування визначається як для вихідного бетону;

- розподіл напружень в граничному стані за міцністю підпорядковується лінійному закону в залежності від значень міцності в крайовому волокні до значень, рівних міцності бетону з незмінною структурою на глибині фронту взаємодії;

- при відносній висоті стиснутої зони бетону більше граничного значення, приріст несучої здатності не враховується в силу його незначності.

Розрахункова схема перерізу залізобетонного елемента в стадії в стадії I наведена на рис. 2.

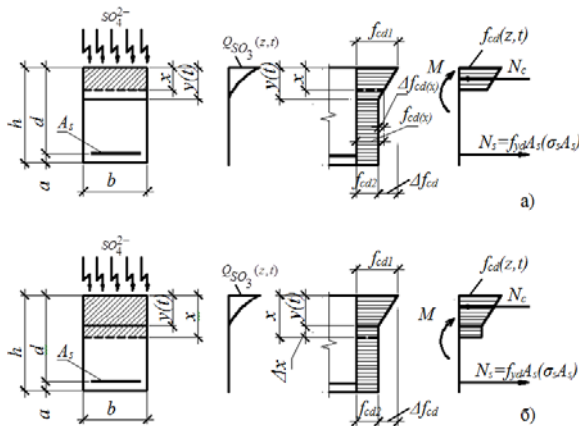


Рис. 2. Стадія I. Розрахункова схема перерізу елемента / Stage I. Calculation scheme of the cross section of the element:

а)  $x \leq y(t)$ ; б)  $x > y(t)$

На схемі (рис. 2) параметри, що характеризують корозійну дію середовища позначені:

$y(t)$  – глибина фронту взаємодії;

$y_2(t)$  – глибина зруйнованих шарів, розраховується за розробленою методикою [9];

$\Delta f_{cd}$  – величина зміни міцності бетону в порівнянні з міцністю бетону з незмінною структурою;

$f_{cd}(z,t)$  – міцність бетону при дії розчинів сульфатів.

$Q_{SO_3}(z,t)$  – зв'язані цементним каменем сульфат-іони.

### Стадія I.

Можливі два випадки положення граничної висоти стиснутої зони бетону, щодо глибини фронту взаємодії  $x_R < y(t)$  і б)  $x_R > y(t)$ .

У разі, якщо, необхідно встановити механізм руйнування елемента - по арматурі або бетону стиснутої зони, то визначається зусилля, яке сприймається бетоном стиснутої зони при її висоті рівній  $x_R = x$  і порівнюється із зусиллям в арматурі:

$$N_c = b \cdot x_R \cdot [f_{cd} + \Delta f_{cd} \cdot (1 - 0,5 \frac{x_R}{y(t)})] \geq f_{yd} A_s \quad (1)$$

Якщо умова (1) виконується, то маємо випадок руйнування елемента по арматурі розтягнутої зони при висоті стиснутої зони  $x < x_R$ , зусилля визначається за формулою:

$$N_c = b \cdot x \cdot [f_{cd} + \Delta f_{cd} \cdot (1 - 0,5 \frac{x}{y(t)})] \geq f_{yd} A_s \quad (2)$$

Висота стиснутої зони:

$$x = \frac{1}{2A} (-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) \quad (3)$$

де:

$$A = -0,5b \cdot \Delta f_{cd} \cdot \frac{1}{y(t)} \quad (4)$$

$$B = b \cdot (f_{cd} + \Delta f_{cd}) \quad (5)$$

$$C = -f_{yd} \cdot A_s \quad (6)$$

Міцність згинального елемента при виконанні умови (1) визначається за формулою:

$$M = b \cdot x \cdot [f_{cd} \cdot (d - 0,5x) + \Delta f_{cd} \cdot (1 - 0,5 \frac{x}{y(t)}) \cdot (d - 0,5x) + 0,5 \Delta f_{cd} \cdot \frac{x}{y(t)} \cdot (d - \frac{1}{3}x)] \quad (7)$$

Якщо умова (1) не виконується, то переріз руйнується по бетону стиснутої зони. У цьому випадку міцність згинального елемента визначається за формулою (7), приймаючи  $x = x_R$ .

При  $x_R > y(t)$ , в залежності від ступеня армування можливі два випадки положення висоти стиснутої зони бетону:  $x < y(t)$  і  $x > y(t)$ . Для визначення розрахункового випадку приймається  $x = y(t)$  і обчислюється зусилля, яке сприймає бетонний переріз:

$$N_c = f_{cd} \cdot b \cdot x + 0,5 \Delta f_{cd} \cdot b \cdot y(t) \quad (8)$$

Якщо  $N_c > f_{yd} \cdot A_s$ , то  $x < y(t)$  і міцність перерізу елемента визначається за формулою (7), а висота стиснутої зони бетону за формулою (3).

Якщо  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$  при  $x < y(t)$ , тоді приймається  $x = y(t)$  але необхідно встановити механізм руйнування елемента - по арматурі або бетону стиснутої зони. Для цього визначається зусилля, яке сприймається бетоном стиснутої зони при  $x = x_R$  і порівнюється із зусиллям в арматурі в припущенні, що руйнування відбувається по арматурі:

$$N_c = f_{cd} \cdot b \cdot x_R + 0,5 \Delta f_{cd} \cdot b \cdot y(t) \geq f_{yd} \cdot A_s \quad (9)$$

При виконанні умови (9) маємо випадок руйнування залізобетонного перерізу по арматурі розтягнутої зони. Міцність елемента визначається за формулою:  $M = b \cdot [f_{cd} \cdot x(d - 0.5x) +$

$$+ 0.5 \Delta f_{cd} \cdot y(t) \cdot (d - \frac{1}{3} y(t))] \quad (10)$$

Якщо умова (9) не виконується, то залізобетонний елемент переармований і міцність його перерізу визначається за формулою (10), приймаючи  $x = x_R$ .

### Стадія II.

Можливі два випадки положення граничної висоти стиснутої бетону відносно глибини фронту взаємодії:  $x_R < y(t)$  і  $x_R > y(t)$ .

Розрахункова схема перерізу залізобетонного елемента в стадії II наведена на рис. 3.

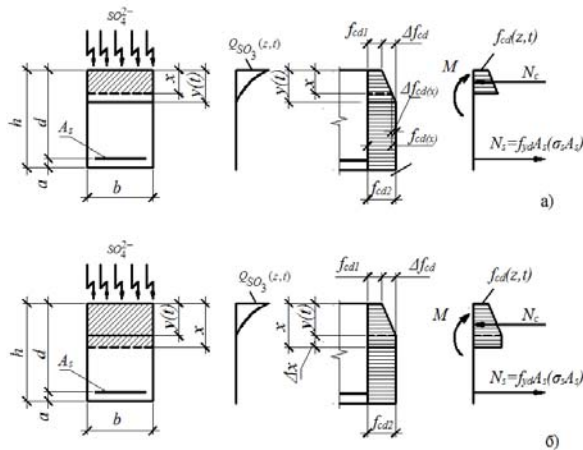


Рис. 3. Стадія II. Розрахункова схема елемента / Stage II. Calculation scheme of the cross section of the element:

а)  $x \leq y(t)$ ; б)  $x > y(t)$

У випадку, коли  $x_R < y(t)$  визначається механізм руйнування залізобетонного перерізу – по арматурі розтягнутої зони або бетону стиснутої зони. Зусилля в бетоні стиснутої зони визначається за формулою (11), приймаючи  $x = x_R$ :

$$N_c = x_R \cdot b \cdot f_{cd1} + 0.5 \cdot b \cdot \Delta f_{cd} \frac{x_R^2}{y(t)} \quad (11)$$

Якщо виконується умова:  $N_c > f_{yd} \cdot A_s$ , то має місце випадок, коли  $x < x_R$  і тоді, міцність залізобетонного перерізу визначається за формулою:

$$M = b \cdot x \cdot [f_{cd1} \cdot (d - 0.5x) + 0.5 \frac{x}{y(t)} \Delta f_{cd} (d - \frac{2}{3} x)] \quad (12)$$

де  $f_{cd1}$  – міцність бетону стиснутої зони:  $f_{cd1} = f_{cd} \cdot \gamma_{cs}$ ,  $\gamma_{cs}$  – коефіцієнт умови роботи бетону, який враховує результат взаємодії активних компонентів середовища і цементного каменю;

$$\Delta f_{cd} = f_{cd} \cdot (1 - \gamma_{cs}).$$

Висота стиснутої зони визначається за формулою (3), в якій значення  $A$  і  $C$  визначаються, відповідно за формулами (4) і (6), значення  $B$  приймається рівним:

$$B = b \cdot f_{cd1} \quad (13)$$

Якщо  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$ , то руйнування залізобетонного перерізу здійснюється по бетону стиснутої зони. Тоді міцність згинального елемента визначається за формулою (12), приймаючи  $x = x_R$ .

При умові, якщо  $x_R > y(t)$ , в залежності від ступеня армування перерізу можливі два випадки положення висоти стиснутої зони бетону відносно глибини фронту взаємодії:  $x < y(t)$  і  $x_R > y(t)$ . Для визначення розрахункового випадку приймаємо  $x = y(t)$  і обчислюємо зусилля, яке сприймає бетонний переріз:

$$N_c = b \cdot y(t) \cdot [f_{cd} - 0.5 \Delta f_{cd}] \quad (14)$$

Якщо  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$  при  $x = y(t)$ , то  $x > y(t)$ . В цьому випадку визначається механізм руйнування елемента – по арматурі або бетону стиснутої зони. Визначається зусилля, що сприймається бетоном стиснутої зони при  $x = x_R$  і порівнюється із зусиллям в арматурі:

$$N_c = f_{cd} \cdot b \cdot x_R - 0.5 \Delta f_{cd} \cdot b \cdot y(t) \geq f_{yd} \cdot A_s \quad (15)$$

При виконанні умови (15) маємо випадок руйнування залізобетонного перерізу по арматурі розтягнутої зони. Міцність елемента визначається за формулою:  $M = f_{cd} \cdot b \cdot x(d - 0.5x) -$

$$- 0.5 \cdot b \cdot \Delta f_{cd} \cdot y(t) \cdot (d - \frac{1}{3} y(t)) \quad (16)$$

де висота стиснутої зони визначається за формулою:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s + 0.5 \Delta f_{cd} \cdot b \cdot y(t)}{f_{cd} \cdot b} \quad (17)$$

Якщо умова (15) не виконується, то руйнування перерізу залізобетонного елемента здійснюється по бетону стиснутої зони. Міцність перерізу визначається за формулою (16), приймаючи  $x = x_R$ .

### Стадія III.

Для стадії III, також, як і для стадій I і II, можливі два випадки положення граничної висоти стиснутої зони бетону  $x_R$  відносно глибини фронту взаємодії за вирахуванням зруйнованих шарів бетону:  $x_R < y(t)$  і  $x_R > y(t)$ .

Розрахункова схема перерізу залізобетонного елемента в стадії III наведена на рис. 4.

У випадку  $x_R < y(t)$  зусилля, яке сприймається бетоном стиснутої зони визначається за формулою (18) при  $x_R < y(t)$  і  $x_R > y(t)$ :

$$N_c = 0.5 \cdot b \cdot f_{cd} \frac{x_R^2}{y(t)} \quad (18)$$

Якщо виконувється умова:  $N_c > f_{yd} \cdot A_s$ , тоді  $x < x_R$ , висота стиснутої зони визначається за формулою (19), міцність перерізу залізобетонного елемента за формулою (20).

$$x = \sqrt{\frac{f_{yd} \cdot A_s \cdot y(t)}{0.5 \cdot b \cdot f_{cd}}} \quad (19)$$

$$M = 0.5 \cdot \frac{x^2}{y(t)} \cdot b \cdot f_{cd} \cdot (d - \frac{2}{3}x) \quad (20)$$

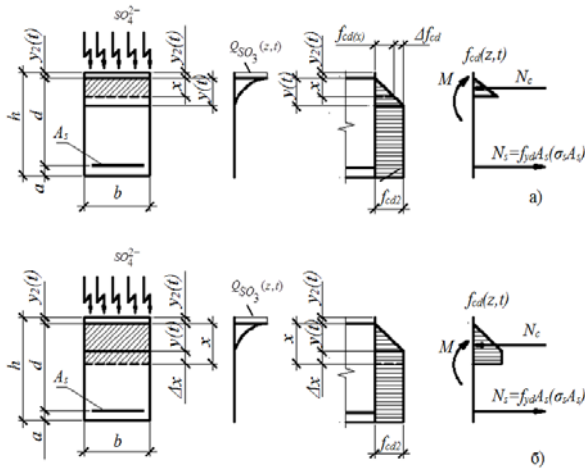


Рис. 4. Стадія III. Розрахункова схема елемента / Stage III. Calculation scheme of the cross section of the element:

а)  $x_R < y(t)$ ; б)  $x_R > y(t)$

Якщо  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$ , то зусилля, яке сприймається бетоном стиснутої зони визначається за формулою (18), а міцність перерізу залізобетонного елемента за формулою (20), приймаючи  $x = x_R$ .

У випадку, якщо  $x_R > y(t)$  можливі два випадки положення висоти стиснутої зони бетону відносно глибини фронту взаємодії:  $x < y(t)$  і  $x > y(t)$ . Для визначення розрахункового випадку приймається  $x = y(t)$  і обчислюється зусилля, яке сприймається бетоном стиснутої зони:

$$N_c = 0.5 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot y(t) \quad (21)$$

Якщо  $N_c > f_{yd} \cdot A_s$ , тоді  $x < y(t)$ , міцність перерізу залізобетонного елемента визначається згідно формули (20), а висота стиснутої зони визначається за формулою (19) при  $x = x_R$ .

У випадку, коли  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$ , то має місце випадок, коли  $x > y(t)$ . Для визначення механізму руйнування перерізу залізобетонного елемента визначається зусилля в бетоні стиснутої зони при  $x = x_R$ :

$$N_c = f_{cd} \cdot b \cdot (x_R - 0.5y(t)) \quad (22)$$

При  $N_c > f_{yd} \cdot A_s$ , міцність перерізу залізобетонного елемента визначається за формулою:

$$M = f_{cd} \cdot b \cdot (d - 0.5x) - 0.5 \cdot y(t) \cdot (d - \frac{1}{3}y(t)) \quad (23)$$

де висота стиснутої зони бетону:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s + 0.5 f_{cd} \cdot b \cdot y(t)}{f_{cd} \cdot b} \quad (24)$$

Для випадку  $N_c < f_{yd} \cdot A_s$ , міцність перерізу залізобетонного елемента визначається за формулою (23) при  $x = x_R$ .

### Обґрунтованість і достовірність розробленої методики

Для верифікації розробленого інженерного методу розрахунку міцності перерізів залізобетонних елементів, нормальних до поздовжньої осі, порівнювалися результати розрахунків, отримані відомим чисельно-аналітичним методом із результатами, отриманими за розробленою методикою.

Розрахунки виконані для різних варіантів висоти перерізу залізобетонних елементів ( $h=10, 30$  і  $50$  см) з одиночним армуванням при різному проценту армування:  $\xi / \xi_R = 0,2; 0,6$ .

Варіювались:

- технологічні параметри первинного захисту:  $C_3A=5,7\%$ ;  $W/C=0,45; 0,55; 0,60$ ;

$SO_4^{2-}$  концентрація агресивного середовища:  $- 6; 8; 10; 12$  і  $14$  *гп./л*.

Зміна міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі елемента визначалась для періоду 100 років. У табл. 1 і на рис. 5 представлені результати розрахунку для залізобетонного елемента висотою перерізу 50 см.

Зіставлення результатів розрахунку міцності перерізів чисельно-аналітичним і інженерним методами свідчить, що максимальна похибка обчислень не перевищує 5,0% (табл. 1). Виходячи з цього можна вважати, що розроблений інженерний метод задовільно оцінює міцність перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів і може використовуватися для практичних розрахунків.

### Висновки

Розроблений інженерний метод розрахунку міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів при дії агресивного сульфатного середовища.

Для верифікації та обґрунтування розробленого інженерного методу виконані розрахунки міцності перерізів чисельно-аналітичним методом і за розробленою методикою.

На основі порівняння результатів розрахунку встановлено, що розроблений інженерний метод задовільно оцінює міцність перерізів, нормальних до

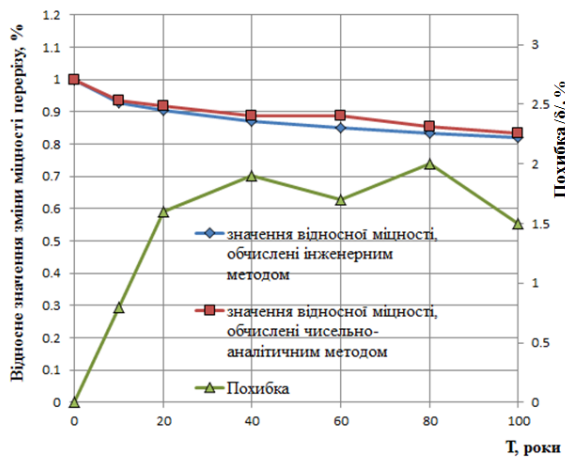
поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів (похибка обчислень 5%) і може використовуватися для практичних розрахунків.

Таблиця 1

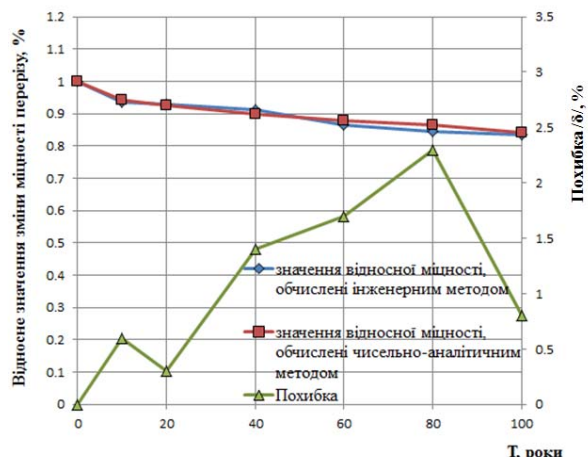
**Відносне значення зміни міцності перерізу згинального залізобетонного елемента висотою 50 см / Relative value of change in the durability of the cross section of binding reinforced concrete element height of 50 cm**

| $\frac{C_{3A}}{CaS}$ , % | $\xi/\xi_R$ | W/C  | $SO_4^{2-}$ , гр/л | Термін експлуатації T, роки |              |                       |              |                       |              |                       |              |                       |              |                       |              |                       |              |
|--------------------------|-------------|------|--------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|                          |             |      |                    | 0                           |              | 10                    |              | 20                    |              | 40                    |              | 60                    |              | 80                    |              | 100                   |              |
|                          |             |      |                    |                             | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |                       | $\delta$ , % |
| $\frac{7}{65}$           | 0,20        | 0,55 | 14                 | $\frac{1,00}{1,00}$         | 0            | $\frac{0,928}{0,936}$ | 0,8          | $\frac{0,903}{0,918}$ | 1,6          | $\frac{0,872}{0,889}$ | 1,9          | $\frac{0,851}{0,866}$ | 1,7          | $\frac{0,835}{0,852}$ | 2,0          | $\frac{0,821}{0,834}$ | 1,5          |
|                          |             | 0,60 | 10                 | $\frac{1,00}{1,00}$         | 0            | $\frac{0,936}{0,942}$ | 0,6          | $\frac{0,929}{0,926}$ | -0,3         | $\frac{0,912}{0,899}$ | -1,4         | $\frac{0,864}{0,879}$ | 1,7          | $\frac{0,846}{0,866}$ | 2,3          | $\frac{0,833}{0,840}$ | 0,8          |
| $\frac{50}{50}$          |             | 0,45 | 12                 | $\frac{1,00}{1,00}$         | 0            | $\frac{0,971}{0,945}$ | -2,7         | $\frac{0,959}{0,930}$ | -3,1         | $\frac{0,944}{0,907}$ | -4,1         | $\frac{0,934}{0,895}$ | -4,3         | $\frac{0,926}{0,887}$ | -4,4         | $\frac{0,919}{0,877}$ | -4,8         |
| $\frac{7}{65}$           | 0,60        | 0,55 | 14                 | $\frac{1,00}{1,00}$         | 0            | $\frac{0,906}{0,864}$ | -4,8         | $\frac{0,850}{0,827}$ | -2,8         | $\frac{0,820}{0,782}$ | -4,8         | $\frac{0,790}{0,751}$ | -5,2         | $\frac{0,762}{0,727}$ | -4,8         | $\frac{0,740}{0,708}$ | -4,5         |
|                          |             | 0,60 | 10                 | $\frac{1,00}{1,00}$         | 0            | $\frac{0,830}{0,874}$ | 5,0          | $\frac{0,799}{0,836}$ | 4,4          | $\frac{0,755}{0,793}$ | 4,8          | $\frac{0,734}{0,763}$ | 3,8          | $\frac{0,716}{0,744}$ | 3,7          | $\frac{0,693}{0,723}$ | 4,1          |

Примітка: у чисельнику наведені значення відносної міцності, обчислені інженерним методом, в знаменнику - чисельно-аналітичним;  $\delta$  – похибка обчислень.



а)



б)

Рис. 5. Графік зміни міцності перерізу згинального залізобетонного елемента висотою 50 см при сульфатній корозії бетону і похибка обчислень / Graph of change in the durability of the cross section of binding reinforced concrete element in height of 50 cm with sulfate corrosion of concrete and error of calculations:

а)  $C_{3A}=5,7\%$ ;  $CaS=65\%$ ;  $\xi/\xi_R=0,2$ ;  $W/C=0,55$ ;  $SO_4^{2-} - 14$  гр./л.;

б)  $C_{3A}=5,7\%$ ;  $CaS=65\%$ ;  $\xi/\xi_R=0,2$ ;  $W/C=0,60$ ;  $SO_4^{2-} - 10$  гр./л.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384:2008, NEQ): ДСТУ Б В.2.6-145:2010 / Мінрегіонбуд України – Укрархбудінформ. – Київ, 2010. – 52 с.
- Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування: ДБН В.2.6-98:2009 / Мінрегіонбуд України. – Укрархбудінформ. – Київ, 2011. – 71 с.
- Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 / Мінрегіонбуд України – Укрархбудінформ. – Київ, 2011. – 118 с.
- Савицкий Н. В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах : дис. докт. техн. наук : 05.23.01 ; 05.23.05 / Н. В. Савицкий ; Днепропетр. инж.-строит. ин-т. – Днепропетровск, 1994. – 400 с.
- Бліхарський З. Я. Міцність нормальних перерізів залізобетонних балок при локальних та суцільних корозійних пошкодженнях / З. Я. Бліхарський, Р. С. Хміль, Р. В. Вашкевич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. – Львів, 2004. - №495. – С.27-32.

6. Яременко А.Ф. О применении диаграмм деформирования материалов к расчету строительных конструкций // А. Ф Яременко, Е. А. Яременко // Бетон и железобетон в Украине. – 2004. – №2. – С. 8-12.
7. Ягупов Б.А. Расчетные предпосылки комплексной оценки силового сопротивления железобетонных конструкций при интенсивных коррозионных воздействиях / Б. А. Ягупов // Бетон и железобетон. – 2008. – № 3 (552). – С. 16-18. Режим доступа: <http://www.cstroy.ru/files/beton/bet308.pdf>. – Название с экрана. – Проверено: 18.08.2017.
8. Hanjari, K. Z. Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures / K. Z. Hanjari, P. Kettil, K. Lundgren // ACI Structural Journal. – 2011. – Vol. 108, № 5. – P. 532-541.
9. Инженерная методика расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций заглубленных зданий с учетом сульфатной коррозии бетона / Т. Д. Никифорова, Н. В. Савицкий, И. Н. Матюшенко, А. Е. Бардах и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 56 : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – С. 299-305.
10. Никифорова Т. Д. Научные основы и методы расчета конструкций заглубленных зданий с учетом внешних воздействий : дисс. ... д-ра. техн. наук : 05.23.01 / Т. Д. Никифорова ; ГБУЗ Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск., 2016. – 346 с.

## REFERENCES

1. Minrehionbud Ukrainy. *Konstruktivni budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktiv vid korozivni. Zahal'ni tekhnichni vymohy (GOST 31384:2008, NEQ): DSTU B V.2.6-145:2010* [National standard of Ukraine B V.2.6-145:2010. Structures of buildings and structures. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements]. Kyiv, 2010. 52 p.
2. Minrehionbud Ukrainy. *Konstruktivni budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktivni. Osnovni polozhennya proektuvannya: DBN V.2.6-98:2009*. [State Building Codes V.2.62-98:2009. Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete constructions. Basic of design]. Kyiv, 2011. 71 p.
3. Minrehionbud Ukrainy. *Konstruktivni budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktivni z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannya: DSTU B V.2.6-156:2010* [Structures of buildings and structures. Concrete and concrete constructions made of heavy concrete. Design rules]. Kyiv, 2011. 118 p.
4. Savytskyi N.V. *Osnovi rascheta nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruktiv v agressivnykh sredakh* Dokt. Diss. [Fundamentals of calculating the reliability of concrete structures in aggressive environments. Doct. Diss.]. – Moscow., 1994. – 400 p. (in Russian).
5. Blikhars'kyy Z. Ya., Khmil' R. Ye. Vashkevych R. V. *Mitsnist' normal'nykh pereriziv zalizobetonnykh balok pry lokal'nykh ta sustil'nykh korozivnykh poskodzhennyakh* [Strength of normal sections of reinforced concrete beams at local and continuous corrosion damages]. *Visnyk Natsional'noho universytetu "Lvivs'ka politekhnika": Teoriya i praktyka budivnytstva* [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Theory and Practice of Construction.]. Lviv, 2004. no.495, pp.27-32. (in Ukrainian).
6. Yaremenko A. F. and Yaremenko E. A. *O primenenii diagramm deformirovaniya materialov k raschetu stroitelnykh konstruktiv* [On the application of material deformation diagrams to the calculation of building structures]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2004, no.2, pp. 8-12. (in Ukrainian).
7. Yagupov B.A. *Raschetnyie predposylki kompleksnoy otsenki silovogo soprotivleniya zhelezobetonnykh konstruktiv pri intensivnykh korrozionnykh vozdeystviyah* [Estimated prerequisites for a comprehensive assessment of the strength resistance of reinforced concrete structures under intense corrosive influences]. [Electronic resource] / *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2008, no. 3 (552), pp. 16-18. Available at: <http://www.cstroy.ru/files/beton/bet308.pdf>.
8. Hanjari K. Z., Kettil P. and Lundgren K. / *Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures*. ACI Structural Journal. 2011, v.108, no. 5, pp. 532-541. Available at: [http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/145262/local\\_145262.pdf](http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/145262/local_145262.pdf).
9. Nikiforova T. D., Savitskiy N. V., Matyushenko I. N. and Bardah A. E. *Inzhenernaya metodika rascheta prochnosti i deformatsiy zhelezobetonnykh konstruktiv zaglublennykh zdaniy s uchetom sulfatnoy korrozii betona* / [Engineering methodology for calculating the strength and deformations of reinforced concrete structures of earth sheltered buildings taking into account the sulfate corrosion of concrete]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* – [Construction, materials science, mechanical engineering]. PGASA. Dnepropetrovsk, 2010, no. 56, pp. 299-305. (in Ukrainian).
10. Nikiforova T. D. *Nauchnye osnovy i metody rascheta konstrukcij zaglublennykh zdaniy s uchetom vneshnih vozdeystvij* Dokt. Diss. [Scientific bases and methods of calculation of structures of earth sheltered buildings taking into account external influences. Doct. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2016. – 346 p. (in Ukrainian).

Стаття рекомендована до друку д-ром. техн. наук, проф. Савицьким М.В. (Україна);  
Поступила в редколегію 20.08.2017