

УДК 622.32:691.32:620.193

**ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ФІЗИЧНИХ ЧИННИКІВ НА  
КОРОЗІЮ БЕТОНУ ТА КОНТРАКЦІЙ ЦЕМЕНТНОГО ГЕЛЮ ЗА  
ЗАЛИШКОВИМ ВОДОЦЕМЕНТНИМ ВІДНОШЕННЯМ.**

*Й.Й. Лучко д.т.н., Б.Л.Назаревич ст. викладач,  
ДерждорНДІ, м. Київ  
НУ „Львівська політехніка”, м. Львів*

**Проблема.** Довговічність залізобетонних елементів конструкцій, а також відповідно будівельних споруд, визначається фізичним зношуванням, яке може розглядатись як результат взаємодії конструкцій і зовнішнього середовища, включаючи і силові навантаження. До цього часу, як правило, склад бетону при проектуванні підбирається за заданою механічною міцністю, найчастіше по опору стиску. При тому недостатньо враховується можливість контакту бетону з різними агресивними рідкими та газоподібними середовищами, а саме увага в таких випадках зосереджується на захисних покриттях поверхні, без врахування безпосередньо структурних особливостей бетону. Такий підхід часто веде до передчасної, особливо при пошкодженнях захисних покриттів, втрати експлуатаційних властивостей будівельних конструкцій, а в окремих випадках, за відсутності належного контролю за станом покриттів, може привести до катастрофічних руйнувань.

**Аналіз останніх досліджень по проблемі.** Отримана значна кількість результатів досліджень по вирішенню цієї проблеми [1-3], а саме методики кількісної оцінки вилуговування бетону, нейтралізації бетону кислотними газами повітря, поширення фронту корозійної деградації дозволяють проводити розрахунок ресурсу будівельних конструкцій із врахуванням напружено-деформованого стану в багатьох обмежених випадках. Обмеженість цих методик полягає у моделюванні корозійної деградації бетону як суцільного середовища, найчастіше цементного каменя, хоча цей матеріал є багатокомпонентним композитом. Зокрема такий підхід не дозволяє адекватно оцінити тріщино-тривкість бетону при дії агресивних середовищ.

**Мета.** Необхідно розробити методику теоретичної оцінки впливу фізичних чинників на корозію бетону та контракцій цементного гелю за залишковим водоцементним відношенням.

**Загальні основи теоретичної оцінки впливу фізичних чинників на корозію бетону.** До останнього часу, в основному, серед фізичних чинників впливу на корозію бетону при розрахунках увага зосереджувалась виключно на температурних впливах, які викликають термічні напруження. Однак на тепловий обмін між середовищем та бетонними і залізобетонними конструкціями суттєво впливають процеси масообміну, а також фазові перетворення, що відбуваються в бетоні.

Отже, тепловий потік в бетоні можна розглядати як складний, що складається з конструктивного та конвективного потоків. Окрім того, потік вологи в бетоні залежить як від градієнта вологи, так і від градієнта температури. Цілком природно, що при порушенні термовологої рівноваги

між середовищем і бетоном, залежно від величини перепаду температур і вологості в ньому виникнуть внутрішні напруження.

Відзначимо, що дуже часто для будівельних конструкцій, які наприклад експлуатуються в атмосферних умовах, зазначені фізичні чинники впливу мають циклічний характер.

Для однорідної стіни з бетону при сталому коефіцієнті теплопровідності із врахуванням нестационарності температурного поля розподіл температури можна описати рівнянням [4]:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad}T), \quad (1)$$

де  $c$  - питома теплоємність;  
 $\rho$  - густина;  
 $T$  - температура;  
 $t$  - час;  
 $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності.

При цьому підвищення і пониження температури всередині бетону супроводжується випаровуванням, конденсацією і замерзанням води, що приводить до зміни кількості тепла в системі. Також необхідно враховувати і молекулярне перенесення тепла, яке виникає за рахунок дифузійних і фільтраційних процесів. Враховуючи процеси масообміну рівняння (1) прийме вигляд:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + A_n u_n \frac{\partial W}{\partial t} - c_p \rho_p v_p \text{grad}T, \quad (2)$$

де  $u_n$  - питома теплота фазового перетворення (питома теплота випаровування або питома теплота плавлення льоду);  
 $W$  - об'ємна концентрація рідини в тілі (маса рідини в одиниці об'єму пористого тілі);  
 $A_n$  - коефіцієнт (при випаровуванні або конденсації пари дорівнює критерію фазового переходу);  
 $\rho_p, c_p$  - відповідно густина і питома теплоємність рідини (газу);  
 $v_p$  - лінійна швидкість руху рідини (газу).

Для розв'язання рівняння (2) необхідно знати кількість тепла, яке приймає участь у теплообміні із системою за рахунок фазових перетворень  $(\partial W / \partial t)$ . Цю величину визначають із диференціального рівняння масо-переносу:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div}(a_m \text{grad}W + a_m \delta \text{grad}T) + A_n \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (3)$$

де  $a_m$  - коефіцієнт потенціалопровідності масо-переносу;  
 $\delta$  - термоградієнтний коефіцієнт.

Таким чином, дія тепла навколишнього середовища на бетон приводить до появи в ньому у загальному випадку нестационарних потоків тепла і речовини, включаючи потік газів (зокрема і водяної пари).

При порушенні рівноваги вологи між бетоном і середовищем через нерівномірне протікання дифузії вологи в об'ємі бетону, в ньому можуть виникати значні градієнти вологи. Це приводить до появи усадочних деформацій (при висушуванні) і деформацій набухання (при насиченні бетону водою). Окрім того величина усадки включає в себе усадку за рахунок контракційних явищ і процесів хімічної взаємодії складових частин бетону і середовища (наприклад, за рахунок карбонізації).

Таким чином, аналітичні розв'язки рівнянь (2), (3) практично неможливо отримати через складність вказаних процесів тепломасопереносу та відсутність однозначних даних для розрахунку теплофізичних коефіцієнтів. Для вирішення даної проблеми представляє практичний інтерес наближена формула обчислення максимально допустимого перепаду вмісту вологи між цементом і поверхнею бетону [2]:

$$\sigma_p = \frac{2}{3} \frac{\beta E (W_u - W_n)}{(1-\nu)(1+\beta W_0)}, \quad (4)$$

де  $\sigma_p$  – напруження розтягу на поверхні;

$W_u, W_n, W_0$  – вміст вологи відповідно в центрі, на поверхні і у початковий момент часу;

$\beta$  – коефіцієнт лінійної усадки (коефіцієнт об'ємної усадки наближено дорівнює  $3\beta$ );

$E$  – модуль пружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

**Теоретична оцінка контракцій цементного гелю за залишковим водоцементним відношенням.** При контракції об'єму цементного гелю можна вважати, що суцільність середовища не порушується, а відбувається об'ємна пластична деформація. Зміну контракційного об'єму цементного гелю в залежності від водоцементного відношення оцінимо аналітично за допомогою наступної моделі.

Розглянемо посудину, заповнену цементним гелем, і умови рівноваги вміщеної в ній призми з основою площею  $S = 1 \times 1 \text{ см}^2$  і висотою  $z$  (рис.1).

Якщо  $\rho_u$  - густина цементного геля, а  $\tau_o$  – опір зсуву структури гелю, то тиск  $p_u$  від власної маси приведеної призми, що припадає на  $1 \text{ см}^2$  основи наближено виражається співвідношенням [4]:

$$p_u = z\rho_u - 4z\tau_o. \quad (5)$$

У зв'язаній системі, якою є цементний гель, тиск від маси вищого шару може передаватись на нижчий шар тільки при деформації структури цементного геля, що виникає при напруженнях зсуву  $\tau$ , які перевищують граничне значення  $\tau_n$  (границю пружності).

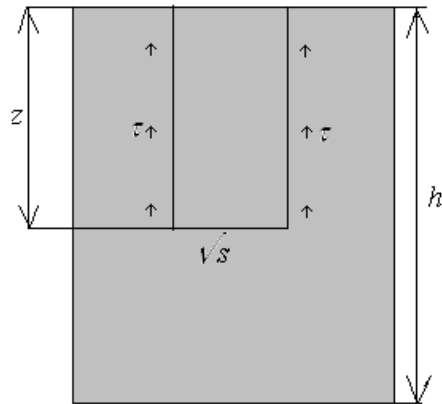


Рис. 1. Розрахункова схема виникнення напружень зсуву для стовпчика цементного гелю

Через те, що  $\tau_o \approx 2\tau_n$  можна записати формулу:

$$p_u = z(\rho_u - 2\tau_o). \quad (6)$$

З виразу (6) випливає, що при руйнуванні структурних зв'язків  $\tau_o = 0$  і  $p_u = z\rho_u$ , тобто внутрішній тиск буде рівний статичному тиску стовпчика гелю висотою  $z$ . Якщо ж опір зсуву  $\tau_o \geq \frac{1}{2}\rho_u$ , то в системі не буде внутрішнього тиску, бо  $p_u \leq 0$ . Аналіз показує, що за своїми фізичними властивостями цементний гель займає деяке проміжне положення між твердими тілами, для яких  $p_u = 0$  і безструктурними рідинами, для яких  $p_u = z\rho_u$ .

У пружному та в'язкопластичному стані внутрішній тиск, під дією якого може проявитись деформація контракції цементного гелю, буде завжди меншою  $z\rho_u$ . Величини гелестатичного тиску при  $z=1$  при зміні значень водоцементного відношення зображено на рис. 2.

Якщо виділити елементарний об'єм цементного гелю і розглянути вплив нормального тиску від вищих шарів, то абсолютна деформація стиску в напрямку сили тяжіння [4] може для даного елементарного об'єму виражатись формулою:

$$d\lambda = \frac{\varepsilon_0 - c}{1 + \varepsilon_0} \left[ 1 - \left( \frac{p_o}{(\rho_u - 2\tau_o) + p_o} \right)^{0,18} \right], \quad (7)$$

де  $\varepsilon_0$  - коефіцієнт пористості перед прикладенням навантаження стиску;  
 $p_o$  - величина внутрішнього опору ( $p_o + p_u$  - гідростатичний тиск);  
 $c$  - граничне значення пористості.

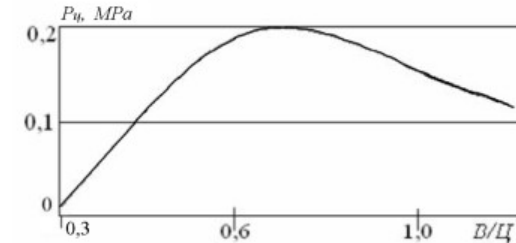


Рис. 2. Залежність тиску  $p_u$  від водоцементного відношення

Враховуючи, що тиск зростає із збільшенням висоти стовпця  $z$ , проінтегруємо (3) в межах від 0 до  $h$ :

$$\int_0^{\Delta} d\lambda = \frac{\varepsilon_0 - c}{1 + \varepsilon_0} \int_0^h dz - p_o^{0,18} \int_0^h \frac{dz}{[z(\rho_u - 2\tau_o) + p_o]^{0,18}}, \quad (8)$$

а в результаті отримаємо величину відносної деформації  $\delta_x = \frac{\Delta}{h}$ :

$$\delta_x = \frac{\varepsilon_0 - c}{1 + \varepsilon_0} \left[ 1 - \frac{1}{0,82h(\rho_u - 2\tau_o)} \left\{ [p_o + h(\rho_u - 2\tau_o)] \cdot \left( \frac{p_o}{(\rho_u - 2\tau_o) + p_o} \right)^{0,18} - p_o \right\} \right]. \quad (9)$$

Цементний гель може зазнавати пластичних деформацій при коагуляційному самоущільненні лише в тому випадку, якщо з нього буде витискатись рідина, що роз'єднує сольватовані частинки рідкої фази. Граничне значення  $B/C$ , при якому практично вже не відбувається самовільне коагуляційне стягування об'єму цементного геля дорівнює одиниці. Тому цьому значенню відповідає коефіцієнт пористості  $c$ . Коагуляційне ущільнення концентрованих гелів внаслідок зближення частинок сприяє зменшенню пористості  $\varepsilon_n$ . Тому, враховуючи [5,6] можна записати рівність:

$$\varepsilon_n = c + (\varepsilon_0 - c) \left[ \frac{1}{0,82h(\rho_u - 2\tau_o)} \left\{ [p_o + h(\rho_u - 2\tau_o)] \cdot \left( \frac{p_o}{(\rho_u - 2\tau_o) + p_o} \right)^{0,18} - p_o \right\} \right] \quad (10)$$

Обчисливши за формулою (10) значення коефіцієнта пористості, можна визначити залишкову величину водоцементного відношення  $W_0$  за

формулою:

$$W_0 = \frac{\rho_p}{\rho_{ц}} \varepsilon_n. \quad (11)$$

Відповідно до теоретичних даних за математичними залежностями, і експериментальних даних можна зробити висновок, що пористість сформованої коагуляційної структури цементного гелю визначається залишковим значенням  $\frac{B}{Ц}$ . Сформоване до даного моменту просторове взаємне розташування частинок твердої фази в стадії твердіння цементного гелю зберігається. При тому змінюється в основному структура пор через те, що по мірі оточення цементних ядер (непрогідратованих до кінця частинок) кристалогідратними утвореннями поперечні перерізи пор зменшуються. Це підтверджує відомий факт, що сформована коагуляційна структура цементного гелю, визначає в значній мірі фізико-механічні властивості цементного каменю.

**Висновки.** Показано, що підвищення опору бетону стосовно циклічних температурно-вологих та корозійних впливів можна досягти регулюванням пористості коагуляційної структури цементного гелю. Отримано співвідношення для розрахунку пористості та залишкового водоцементного відношення на основі розв'язку задачі теоретичної оцінки контракцій цементного гелю. Такий підхід дозволяє оптимізувати бетонну структуру ще на стадії виготовлення з метою забезпечення корозійної тривкості із врахуванням температурно-вологих та силових експлуатаційних факторів.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Лучко Й.Й., Глагола І.І., Назаревич Б.Л. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд/ НАН України; Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 1999.–229с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. / Под. общ. ред. В.М. Москвина. – М.: СТройиздат, 1980. – 536 с.
3. Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. Изд. СССР - ЧССР – ФРГ / С.И. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, Л.Шиссль. – М.: СТройиздат, 1990. – 320с.
4. Аквердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: СТройиздат, 1981.- 464с.
5. Звіт № держ. Рег. 01020002680 по темі: Оптимізація складу бетону для виготовлення корозійно стійких залізобетонних конструкцій мостів. Розробка методу оптимального з'єднання арматури. – Львів: Фізико – механічний інститут НАН України. – 2004. – 195 с.
6. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия. – М. СТройиздат, 1966. – 432с.