

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерно-технологічний  
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

на тему: **«Дослідження впливу концентрації  
соляної кислоти на корозійне руйнування  
бетону»**

КРМ.192 БЦмд\_21 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
«Технології будівельних  
конструкцій, виробів і матеріалів»  
спеціальності 192 «Будівництво та  
цивільна інженерія»  
ступеня вищої освіти магістр групи  
192БЦмд\_21  
Яколенко Максим Олександрович

Керівник: Бондар Л.В.

Полтава 2024 року



## Вступ

Залізобетон вже давно зайняв ведуче місце серед конструктивних будівельних матеріалів.

Однак, все частіше приводяться випадки, коли залізобетон виявився не довговічним і причиною тому є дія агресивних середовищ при їх експлуатації.

В даний час приводяться дослідження корозійних процесів в бетоні, які направлені на підвищення довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і скорочення витрат, пов'язаних із ремонтом та їх обслуговуванням.

Незважаючи на те, що бетони на портландцементі є нестійкими в кислому середовищі, в разі випадків вони використовуються в названих умовах і виникає необхідність в розрахунках.

Тому, дипломна робота, що направлена на прогнозування корозійного руйнування бетону при дії соляної кислоти є актуальною.

В роботі розглянуті види корозії бетону в агресивних середовищах. Виявлено особливості взаємодії бетону залізобетонних конструкцій в середовищі мінеральних кислот. Проаналізовано відомі моделі, що описують глибину руйнування бетону в середовищі сильних мінеральних кислот. Розроблені теоретичні залежності для прогнозування глибини корозійних вражень бетону в середовищі соляної кислоти, а також експериментальну перевірку отриманої залежності. Досліджено вплив параметрів залежності на динаміку корозійних вражень.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Особливості взаємодії бетону залізобетонних конструкцій з агресивним середовищем

Залізобетон - комплексний матеріал, в конструкціях з якого сталеві арматура сприймає зазвичай розтягуючу напругу, а бетон-стискаючу. У традиційних конструкціях бетон виконує роль захисту арматури від корозії і високих температур при можливій пожежі. Таким чином, в залізобетонній конструкції з оточуючим середовищем стикається бетон. Очевидно, що у агресивних умовах конструкція може бути довговічною, якщо бетон є досить стійким і тривало зберігає здатність захищати арматуру.

Багатолітній досвід виготовлення і експлуатації залізобетонних конструкцій показує, що щільний цементний бетон в своєму вихідному стані є середовищем, що сприяє збереженню сталеві арматури. Відомо, що тонкий наліт іржі, що часто є на арматурі при бетонуванні, неможливо виявити, якщо розкрити її, видаливши захисний шар бетону опісля декілька днів нормального твердіння або після пропарювання виробу. Іржа зникає, розчиняється в бетоні і зазвичай не з'являється знову. Дивлячись на те, що бетон, будучи капілярно-пористим гідрофільним тілом, містить вологу і пропускає кисень речовини, необхідні для електрохімічної корозії сталі.

Дослідження показують, проте, що картина значно складніша: не кожен бетон забезпечує первинне і тим більше тривале збереження арматури. У одних випадках вона може підлягати корозії відразу після виготовлення конструкції, в інших - через той або інший (часто вельми тривалий) час. Очевидно, що перше свідчить про явну недостатню захисну здатність, а може бути і про агресивність самого бетону. В даний час досліджені основні чинники, що перешкоджають первинному збереженню, тобто сприяють ранній появі корозії арматури в бетоні. Ці чинники можна назвати

внутрішніми, властивими самому бетону, вони пов'язані як із структурою, так і із складом його рідкої фази. Встановлено [1], що за умов високої лужності останньою в щільних цементних бетонах сталь пасивується, практично перестає розчинятися, посилає в електроліт іони заліза. В бетонах з пониженою лужністю (ліпсобетони, гіпсоцементнопуццоланові, авокавові, силікатні і деякі інші), з добавками хлоридів, з високою мірою пористості сталь не пасивується або знаходиться в нестійкому пасивному стані.

Питання забезпечення тривалого збереження арматури в таких бетонах освітлюють в багатьох роботах. Дія і розвиток корозії арматури після більш менш тривалого часу після виготовлення залізобетонної конструкції свідчить про втрату бетоном захисної здатності під впливом «зовнішніх» чинників. Такими чинниками можуть бути фізичні, хімічні і фізико-хімічні процеси.

До фізичних належать такі зовнішні дії, як механічні отколоти бетону, ерозійний знос, періодичне нагрівання і охолодження, заморозування і відтавання, що призводять до руйнування бетону в захисному шарі і оголення арматури, яка потім підлягає корозії при безпосередньому зіткненні з середовищем.

Хімічні і фізико-хімічні дії середовища на конструкцію виявляються двома: або вони безпосередньо руйнують бетон захисного шару з подальшими оголенням і корозією арматури, або, не руйнуючи бетон безпосередньо, настільки змінюють його рідку фазу, що корозія арматури починається усередині бетону.

При цьому її корозія часто йде значно швидше, ніж corroдує відкрита сталева конструкція в тих же умовах дії середовища. Це пояснюється тим, що при періодичному зволоженні в захисному шарі бетону і під ним на поверхні арматури плівка води, необхідна для електрохімічної корозії сталі, зберігається довше, ніж на поверхні сталевих конструкцій.

Продукти корозії сталі, що утворюються, займають в 2-2,5 разу більший об'єм, ніж шар прокородованого металу, і давлять на навколишній бетон. У бетоні розвивається розтягуюча напруга, що перевищує його міцність, в результаті утворюються тріщини в захисному шарі, орієнтовані уздовж прокородованих стрижнів. Утворення таких тріщин полегшує доступ агресивних агентів до арматури і прискорює, як правило, її корозію. Надалі, якщо не приймати міри, розвиток корозії арматури приведе до відколювання захисного шару, при цьому порушиться зчеплення її з бетоном і різко впаде несуча здатність конструкції. Для згинальних елементів, втрата несучої здатності, від порушення зчеплення арматури з бетоном, за даними [4], складає 30-35%.

Враховуючи, що класифікація середовищ необхідна для прогнозування довговічності конструкцій, при її розвитку не можна не враховувати відомі в теорії корозії металеві положення про контролюючі процеси або чинники. Ці положення в принципі поширюються і на корозію бетону, проте використання їх з метою прогнозування швидкості руйнування бетону доки лише починається.

Деякі достовірні рішення отримані [15] для тих випадків корозії бетону, швидкість яких визначається внутрішніми процесами масопереносу в його пористому тілі: розчинення цементного каменю, перенесення продуктів розчинення і агресивної речовини в зону реакції, їх взаємодію і перенесення продуктів реакції або їх відкладення. Отримані рішення охоплюють корозію бетону першого і другого виду, вилуження деякими водами і корозію кислими рідкими середовищами [12].

Перераховані елементарні процеси корозії бетону є зв'язаними, такими які по суті своїй можуть йти лише з швидкістю, що визначається протіканням найповільнішого процесу. Цей елементарний процес прийнято називати обмежуючим або контролюючим. Як показано в роботі [24], якщо продукти корозії бетону в кислому середовищі зберігаються на його поверхні, то вони

утворюють своєрідний буфер. На початку періоду швидкість корозії висока і обмежується лише розчиненням за рахунок опору при внесенні в буферному шарі продуктів корозії.

Отримані теоретичним шляхом в [10] розрахункові формули охоплюють 10 різновидів корозійних процесів залежно від вигляду руйнування (з буфером і без буфера), інтенсивності конвективного обміну, а також наявності або відсутності агресивної речовини в розчині. Для 3-го виду корозії бетону під дією солей, що кристалізуються в його порах, в даний час рішень немає [16]. Отримані рішення для 1-го і 2-го виду охоплюють лише постійну взаємодію рідкого середовища з бетоном. Практично ж для більшості промислових будівель характерна періодична дія на наземні будівельні конструкції рідких агресивних середовищ (наприклад, зволоження і висихування, утворення зон капілярного підсосу і випару), при якому корозія 2-го виду може супроводитися корозією 3-го виду з різною мірою впливу на руйнування бетону, а також може отримати відсереджаючий розвиток (стати контролюючим) процесу корозії арматури.

Тому розрахункові методи прогнозування глибини корозії бетону досить складні. В принципі ж вони, очевидно, придатні для досить масивних і не армованих або мало армованих конструкцій, за умовами служби що наближаються до промислового устаткування.

Безперечно, що розрахунковий метод може бути плідним для залізобетонних фундаментів, паль і подібних конструкцій, дозволяючи якимось обґрунтувати необхідність або непотрібність захисту бетону. Проте при цьому треба проявляти особливу обережність, якщо розрахунковий час його руйнування виявляється сумісним з товщиною захисного шару бетону, оскільки тоді необхідно оцінити небезпеку руйнування за рахунок корозії арматури, яка недопустима.

Для простих випадків поступової втрати бетоном під дією середовища здатності захищати арматуру також є теоретичні рішення, отримані з врахуванням обмежуючого елементарного процесу.

Зокрема, у повітряно-вологодому середовищі, коли бетон втрачає здатність пасивувати сталь в результаті карбонізації, корозія обмежується дифузією вуглекислого газу в шарі бетону, що карбонізує, а при дії на конструкцію розчинів хлоридів обмежує його перенесення через бетон у напрямі арматури. Згідно електрохімічної теорії корозії металів, пасивний стан сталі в бетоні пояснюється вільним анодним обмеженням, коли в результаті утворення на поверхні арматури стійких в рідкому середовищі фазових або адсорбційних плівок різко гальмується анодний процес переходу заліза в іонний стан.

При порушенні ж пасивного стану сталі в бетоні обмеження її корозії залежно від умов буде змішаним з переваганням анодного, катодного або омичного контролю, оскільки процес іонізації заліза (анодний), асиміляція електронів (катодний), що звільнилася, якою-небудь речовиною - катодним деполяризатором в прилеглому до поверхні сталі шарі електроліту і перенесення іонів в останньому є зв'язаними.

Забезпечення стійкості залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах повинне базуватися на використанні уявлень про обмежуючі процеси, впливаючи на яких, можна чим ефективніше підвищити довговічність конструкцій.

Практично зусірачаються всілякі дослідження вказаних дій. Наприклад, дуже поширене вельми небезпечне для арматури поєднання достійної дії газових середовищ з періодичним зволоження конструкцій розчинами, зокрема хлоридів.

Звергає на себе увагу універсальність такого засобу збільшення стійкості конструкцій, як підвищення щільності бетону. Її значення встановлене емпірично давно і підтверджено праць вав [15, 16, 17].

Враховуючи різноманіття конструкцій, середовищ і умов їх взаємодії, в загальному вигляді завдання забезпечення стійкості мінімальними засобами представляється досить складним. Проте досвід проектування і експлуатації конструкцій в різних галузях промисловості, накопичений до теперішнього часу, дозволяє декілька спростити завдання, виділивши такі конструкції, які в даних умовах мають бути обов'язково зольовані від прямої дії певних чинників середовища.

У одній і тій же будівлі різні конструкції і конструктивні елементи можуть піддаватися дії різних середовищ. Так, при морфних технологічних процесах практично неминучі притоки розчинів, а для їх видалення передбачають зазвичай змив. Тому підлоги і міжповерхові перекриття обладнують в таких випадках з надійною гідро- і хімізоляцією, досить стійкою до дії конкретних реагентів, щоб захистити від них ці і конструкції, що пролягають нижче (фундаменти, балки, колони). Проте наряд чи необхідний без спеціального обґрунтування захист нижньої поверхні перекриттів, стовпів, балок, колон (виключаючи місця примикання до підлоги), кроквяних ферм і балок, плит покриття. На переховані елементи будівлі як правило, діє агресивне середовище, при цьому по-різному на несучі і стороджуючі конструкції. У останніх агресивна дія середовища, як правило, посилюється за рахунок градієнтів вологості, температури і тиску по товщині конструкції, особливо, якщо створюються умови утворення конденсату на її поверхні.

Питання про захист від технологічних розчинів і рідин вирішуються у кожному конкретному випадку залежно від вірогідності їх попадання на конструкції і агресивності. Великі можливості економії на захисті конструкції закладені у вдосконаленні технологічних процесів, устаткування і його експлуатації.

Для безнапірних конструкцій в повітряному середовищі унеможлиблюється видалити з бетону фільтруючу воду — має місце перший

вид корозії бетону по З. М. Москвіну [15]. Другий вигляд корозії (хімічна взаємодія цементного каменя з середовищем, що супроводиться втратою його в'язучих властивостей) і третій (руйнування структури цементного каменя під тиском новоутворень, що кристалізуються в порах) можливі лише при наявності високій вологості повітря, коли агресивні, головним чином кислі, гази можуть розчинятися в плівках води, що утворюються в капілярах і порах цементного каменя. Можливо також агресивна дія на бетон розчинів, що утворюються при зволоженні пилю гігроскопічних солей за рахунок поглинання ними волога з повітря.

В більшості випадків, коли концентрації агресивної речовини, що діють на конструкції, близька до санітарних норм або перевищують їх в 2—3 рази (це часто буває в зоні під покриттям будівлі) швидкість корозії бетону виявляється незначною. У таких випадках корозійне руйнування бетону, неглибоке і відносно рівномірно розподілене по поверхні конструкції, як правило, не може стати причиною втрати несучої здатності. Така небезпека виникає зазвичай в результаті корозії арматури.

Розгляд в основному питань стійкості залізобетонних конструкцій у повітряно-вологих агресивних середовищах виправдане тим, що речовинні забруднення вельми всілякі по складу і концентрації; оцінці степені їх агресивності.

В нормах проектування [22] стійкість залізобетонних конструкцій доки недостатньо обґрунтована і може бути уточнена лише після детального вивчення особливостей їх дії на бетон і арматуру. Запропонована класифікація кислих розчинів, що враховує розчинність і об'єм продуктів їх взаємодії з бетоном, а також агресивності останніх до арматури.

Вивчення кінетики процесу нейтралізації бетону кислотними розчинами дозволяє, оперуючи щільністю і товщиною захисного шару, з врахуванням статистичної оцінки неоднорідності властивостей бетону і що допустимими нормами відхилень від проектного положення арматури, розрахувати і

забезпечити конструктивними і технологічними грифами необхідну довговічність конструкцій у повітряно-вологодому середовищі.

## 1.2. Корозія бетону в хімічно агресивному середовищі

Опис процесів корозії систематизовані далі відповідно до [15, 16] про три основні види корозії.

**Корозія I виду.** Гідратовані мінерали, які складають цементний камінь, в різній мірі розчиненні у воді. Можливість руйнування бетону унаслідок розчинення і виведення з його структури компонентів цементного каменя, що створюють його міцність, була навана корозією першого виду. Інтенсивність корозії I виду визначається умовами контакту води і цементного каменя. Одним з визначальних чинників можливості протікання корозії I виду є розчинність бетону для води і склад води, що контактує з бетоном. Сама по собі стійкість бетону залежить і від фазового складу цементного каменя, оскільки розчинність окремих його фаз істотно різна. Найбільш розчинним компонентом порцеляментного каменя є гідроксид кальцію. Розчинність гідроксиду кальцію залежить від температури, причому ця залежність аномальна, тобто розчинність знижується з підвищенням температури (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1. Розчинність гідроксиду кальцію залежно від температури

| Температура, °C                            | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 |
|--|---|----|----|----|----|----|----|
| Розчинність, г/л<br>(в розрахунках на CaO) |   |    |    |    |    |    |    |

Гідроксидати і гідроалюмінати кальцію, складові основного об'єму новоутворення, що створюють міцність цементного каменя, також піддаються розчиненню у воді. При цьому вони розчиняються з розкладанням (гідролізом). Міра гідролізу мінералів, складових цементного каменя, визначається концентрацією гідроксиду кальцію в розчині. Рівноважні

концентрації гідроксиду кальцію, необхідні для стабільного існування мінералів цементного каменя, змінюються в досить широких межах. Послідовність переходу в розчин окремих фаз цементного каменя залежатиме від концентрації гідроксиду кальцію в розчині.

Введення до складу цементу пухлякових добавок призводить до пониження основності новоутворень гідросилікатів і, як результат, до підвищення стійкості цементного каменя до вилугування. Наявність у воді різних електролітів впливає і на розчинність цементного каменя. Солі лужних металів натрію і калію підвищують розчинність гідроксиду кальцію і прискорюватимуть вилугування. Луги і солі кальцію збільшують розчинність гідроксиду кальцію, проте при оцінці характеру їх впливу на стабільність цементного каменя слід мати на увазі можливість їх хімічної взаємодії з гідроксидом кальцію з утворенням подвійних і важко розчинених солей типу оксихлорида кальцію тощо.

Луги впливають на концентрацію  $\text{Ca}^{2+}$  в розчині. Незалежно від вигляду катіона розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  зникається у декілька разів. Одночасне введення сульфатів натрію і калію збільшує концентрацію іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , проте це збільшення може бути пояснене наявністю гіпсу в розчині унаслідок взаємодії сульфату з гідроксидом кальцію. При введенні в розчин хлориду натрію розчинення гідроксиду кальцію посилюється.

Як вже наголошувалося, вилугування представляє найбільшу небезпеку при фільтрації води через тіло бетону.

Велике значення для підвищення стійкості бетону в умовах можливого вилугування має процес карбонізації поверхневого шару бетону. При карбонізації на повітрі утворюється важко розчинний карбонат кальцію, який одночасно ущільнює поверхневий шар бетону за рахунок збільшення об'єму на 11% під час переходу  $(\text{CaOH})_2$  в  $\text{CaCO}_3$ . Розчинність карбонату кальцію складає  $3 \cdot 10^{-4}$  г/л.

Дослідження розчинення цементного каменю проводиться, як правило, на зразках, роздроблених з метою збільшення поверхні контакту води з цементним каменем і відповідного прискорення випробувань. Проте результати таких випробувань важко моделюються і не можуть бути використані для здобуття даних про кінетичний процесу в реальних бетонних конструкціях. В той же час це зручний метод для отримання відомостей про порівняльну стійкість розчинів і бетонів на різних цементах. Визначена експериментально залежність міцності, що є основним показником стійкості бетону, від кількості води, що профільтрувалася через бетон, показує, що при корозії першого виду величина корозійних пошкоджень знаходиться в складній залежності від кількості видаленого з цементного каменя найбільш реактивного компонента — гідроксиду кальцію. Відносне зниження міцності цементного розчину після певного початкового періоду обганяє відносну кількість видаленого гідроксиду кальцію. В той же час в бетоні падіння міцності при видаленні до 20% гідроксиду кальцію йде сповільнено, а потім починається швидке падіння міцності.

Міра небезпеки процесів випробування визначається умовами взаємодії конструкції і води. Найбільш небезпечна фільтрація води через тіло бетону під натиском. Проникаючи всередину бетону, вода приходить в зіткнення з величезною внутрішньою поверхнею цементного каменя, при цьому міра насичення її вапном збільшується.

Концентрація вапна при фільтрації води через бетон залежить від тривалості контакту води з поверхнею цементного каменя (швидкості і дороги фільтрації) і кількості води, яка пройшла через даний перетин бетону. Вміст вапна у воді, що фільтрує, з часом поступово зменшується, оскільки знижується концентрація гідроксиду кальцію.

У роботах було показано, що лімітуючою ланкою в процесі випробування є дифузія вапна з глибинних шарів цементного каменя до каналів, тріщин або пор, по яких рухається вода, що фільтрує. Тому для

визначення інтенсивності вилугування необхідне визначення коефіцієнтів дифузії вапна і в цементному камені розчину або бетону.

Вміст вапна буде тим більше, чим повільніше йде фільтрація, або чим більший шлях води, що фільтрується, а отже, і час зіткнення води і цементного каменя.

У присутності вільного гідроксиду кальцію концентрація насиченого розчину буде близько 1,3 г/л з розрахунку на СаО. Проте після того, як деяка кількість СаС розчиниться, починається зниження концентрації.

Інтенсивність розчинення гідроксиду кальцію із зразків цементного розчину і бетону, за даними різних авторів, характеризує кінетику корозії І виду. А отримані кількісні співвідношення вилугування гідроксиду кальцію можуть бути використані для підрахунку орієнтовної стійкості бетону проти вилугування.

При повному затуренні бетону у воду і вільному обмиванні компоненти цементного каменя, що залишаються після розчинення гідроксиду кальцію, служать перешкодою для дифузії вапна з глибших шарів цементного каменя бетону і процес йтиме відповідно до закономірностей дифузії, при наростаючому шарі, тобто із закономірністю убавання швидкості процесу пропорційно кореню квадратному з часу. Велику небезпеку поверхневе вилугування може мати в спорудах, поверхневий шар яких піддається дії вільного потоку води, що супроводиться механічною дією як струменів води, так і зважених у воді наносів. Найбільш небезпечна фільтрація води через бетон. Для терміну служби в цьому випадку вирішальне значення матиме коефіцієнт фільтрації бетону. Головний засіб запобігання вилугуванню бетону — це надання йому достатньої непроникності і морозостійкості. Проте стійкість компонентів цементного каменя також істотно впливає на стійкість бетону. При однаковій швидкості фільтрації води через бетон стійкішим буде матеріал, в якому цементний камінь менш розчинний у воді. Так, наприклад, сульфатостійкий портландцемент і шлакопортландцемент при гідратації

утворюють з'єднання менш розчинні у воді, ніж продукти гідратації портландцементу. Цементний камінь на цих цементах містить менш основні гідросилікати, ніж цементний камінь портландцементу, тому рівноважна концентрація винищити для них нижче і інтенсивність вилугування менша. Розчин гідроксиду кальцію після виходу з бетону піддається дії вуглекислоти повітря. При цьому утворюється стійкіше, менш хімічно активне і менш розчинне, чим  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , з'єднання — вуглекислий кальцій. Для армостінних конструкцій поява нальотів вуглекислого кальцію може свідчити про небезпечний розвиток процесу. Правильно оцінити можливу небезпеку процесу вилугування можна на підставі аналізу характеру фільтрації через бетони (розосереджена або місцева фільтрація) і визначення зміни в інтенсивності фільтрації в часі.

Фільтрація через місцевий дефект укладання, або, що часто спостерігається, через робочий шов бетонування, або по тріщинах, з точки зору процесу вилугування менш небезпечна для збереження бетону, ніж розосереджена фільтрація через товщу щільного бетону. При розосередженій фільтрації буде збіднюватимуться рівном поверхня стінки дефектного місця, і кількість вапна, що виноситься з бетону, швидко падає. Якщо сам дефект не представляє небезпеки для загальної стійкості споруди і якщо фільтрація води через дефектне місце не перешкоджає нормальній експлуатації споруди (наприклад, у водопропускних трубах), то вилугування не буде небезпечним.

Якщо фільтрація відбувається через тіло бетону, то має бути вивчена кінетика цього процесу. А саме, залежно від жорсткості води, що фільтрується, і від інтенсивності фільтрації можливий розвиток в часі процесу вилугування в одному з двох напрямів. При сильно фільтруючому бетоні постійному припливі води, що, наприклад, може мати місце в гідротехнічних напірних спорудах, фільтрація йтиме з незгасаючою швидкістю, і щільність, а отже, міцність бетону, падатимуть. У багатьох

випадках спостерігається навіть при постійному натиску поступове загасання процесу фільтрації зважаючи на явища самоущільнення бетону і кольматації його пор.

При повільному доступі до відкритої поверхні розчину вапна можливе його відкладення в порах поверхнього шару бетону унаслідок випаровування води. Це ж може відбутися і при вищій температурі зовнішньої поверхні, чим в товщі бетону, оскільки розчинність вапна знижується з підвищенням температури. Самоущільнення бетону при фільтрації через нього води було встановлено в багатьох дослідженнях. Ущільнення відбувається як за рахунок хімічної взаємодії між мінералами цементного каменя і солями, розчиненими у воді, що фільтрується через бетон, так і за рахунок відкладення в порах бетону найдрібніших, зважених у воді, мінеральних часток. З цих причин у багатьох випадках, особливо в тунельних спорудах, відбувається поступова кольматація бетону, і фільтрація через нього з часом затухає.

Здібність бетону до самоущільнення за рахунок хімічної взаємодії гідроксиду кальцію з речовинами, розчиненими у воді, перш за все з бікарбонатами кальцію і магнію, визначає принцип нормування міри агресивності природних вод за цією ознакою. Вода, що має високий вміст карбонатів при фільтрації через бетон, швидко ущільнює його і тому не представляє небезпек для стійкості споруд. Слід мати на увазі, що фільтрація води, що має підвищену жорсткість, безпечна лише при помірній фільтрації її через бетон.

У нормативах агресивності води – середовища для бетону, приведені диференційовані норми граничного вмісту бікарбонатів (двовуглекислих солей) кальцію і магнію, нижче за яке вода стає агресивною за цією ознакою. Природно, що цей показник найбільш небезпечний для чапирних споруд. Для споруд, лише омиваних водою, без натиску і тим більше, що постійно знаходяться в ґрунті, зітчення з водою низької жорсткості не представляє

істотної небезпеки. Розчинення вапна і винесення його можуть здійснюватися в цьому випадку лише через зовнішню поверхню конструкції.

**Корозія II виду.** Корозія II виду відрізняється від корозії першого вигляду тим, що пошкодження бетону визначається не лише розчиненням компонентів цементного каменя, але і їх хімічною взаємодією з агресивними компонентами, що містяться у воді з утворенням розчинних продуктів корозії або з виділенням важко розчинних з'єднань у вигляді рихлих включень. Якщо при корозії I виду її інтенсивність обмежується низькою розчинністю основного компонента цементного каменя — гідроксиду кальцію, — те при корозії II виду міра корозійного пошкодження визначається реакційною ємкістю розчину і властивостями продуктів корозії. Залежно від другого чинника корозійний процес може йти з поступовим посиленням у міру руйнування цементного каменя, а може і затухати, якщо продукти корозії нерозчинні і створюють важко розчинну оболонку на зовнішній поверхні бетону або на внутрішній поверхні парового простору. У всіх випадках накладення хімічного процесу на процесі розчинення гідроксиду кальцію значно підсилює корозійний процес.

Лужна природа цементного каменя обумовлює перелік з'єднань агресивних по II виду корозії. Найбільшою агресивністю володіють кислоти, плагікислі солі і деякі з'єднання, здатні реагувати з компонентами структури цементного каменя.

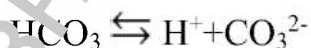
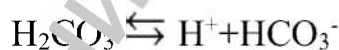
Інтенсивні дослідження кінетики корозійних процесів при контакті кислот різного виду з цементним каменем, виконані під керівництвом В.М. Москвина, дозволили підійти до кількісної оцінки інтенсивності корозійних процесів. Вивчення кислотної корозії в умовах повного занурення проводилося і раніше.

У роботах було показано, що досить швидко при незначному поглибленні фронту взаємодії кислоти і цементного каменя корозійний процес починає йти з дифузійним обмеженням в умовах наростаючого шару

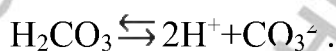
продуктів реакції, що утрудняють доступ кислоти до компонентів структури цементного каменя. Дослідження продуктів реакції показали, що їх склад змінюється залежно від виду кислоти і головним чином залежить від розчинності кальцієвої солі даної кислоти, оскільки основний процес — це нейтралізація кислоти при реакції з гідроксидом кальцію.

**Вуглекислотна корозія.** Найбільш поширеним процесом корозії II виду в природних умовах є взаємодія вуглекислоти повітря з гідроксидом кальцію цементного каменя (процес карбонізації бетону).

Цей процес в значній мірі визначає терміни збереження захисних властивостей бетону по відношенню до арматури. Процес карбонізації призводить до двох результатів — ущільнення і підвищення стійкості бетону під час переходу гідроксиду кальцію в карбонат кальцію і негативного впливу карбонізації захисного шару бетону біля арматури на стійкість залізобетонної конструкції унаслідок депасивації арматури і можливостей корозії. Агресивна дія вуглекислоти на бетон можлива і при її підвищеному вмісті у воді. Вугільна кислота у воді диссоціює в два рівні:



Отже, у воді встановлюється рухлива рівновага між



Чим більше у воді міститься  $\text{HCO}_3^-$ , тим більше в рівновазі з цим іоном має бути і  $\text{CO}_2$ . Якщо ж кількість  $\text{CO}_2$  перевищує рівноважне, то воно здатне реагувати з цементним каменем з утворенням нових кількостей  $\text{CaCO}_3$ , тобто така вуглекислота буде агресивною.

Для стійкого стану  $\text{HCO}_3^-$  у присутності іонів необхідна деяка кількість  $\text{CO}_2$ .

При контакті з поверхнею бетону води, що містить вуглекислоту, нейтралізуватиметься гідроксид кальцію з утворенням карбонату кальцію, а потім нові кількості вуглекислоти розчинятиме і карбонат кальцію, що знов

утворився, і що існував в поверхневому шарі — як результат карбонізації цементного каменя вуглекислою повітря. Процес йтиме з поверхні вглиб бетону і його інтенсивність визначатиметься концентрацією вуглекислоти у воді-середовищі. Небезпека вуглекислотної корозії істотно розрізнятиметься залежно від умов контакту води і бетону. При вільному обмиванні водою поверхні досить масивних споруд, коли процес корозії відбувається при дифузійному контролі потоку гідроксиду кальцію з глибини до поверхні бетону, вміст у воді вуглекислоти підсилюватиме розчинювальну дію води пропорційно вмісту вуглекислоти. При цьому, оскільки  $\text{CO}_2$  виводить в розчин  $\text{Ca}^{2+}$ -іон у вигляді  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  на кожен моль віддалятиметься 1/2 моля  $\text{Ca}^{2+}$ , або з розрахунку на співвідношення по масі — на кожних 100 мг  $\text{CO}_2$  в розчині віддалятиметься 64 мг  $\text{CaO}$ .

Якщо врахувати середню розчинність у воді  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  — 1200 мг/л (з розрахунку на  $\text{CaO}$ ), то слід визнати, що за цих умов присутність  $\text{CO}_2$  у воді трохи (приблизно на 5%) буде збільшувати агресивність води. Інша справа у випадках, коли карбонатна плівка на поверхні бетону захищає його від корозійної дії інших речовин, агресивних по відношенню до каменя, наприклад в морській воді. В цьому випадку практично нерозчинний у воді  $\text{CaCO}_3$  що становить плівку, розчиняється у воді, що містить вуглекислоту, і захищаюча дія карбонатної плівки знищується. При фільтрації води під натиском через тонкостінні залізобетонні конструкції взаємодія  $\text{CO}_2$  з  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в первинний момент підтримуватиме бетон, але потім корозійна дія води, що містить  $\text{CO}_2$ , посилюватиметься за рахунок інтенсивнішого руйнування цементного каменя в результаті не лише розчинення гідроксиду кальцію, але і обмінних реакцій між мінералами цементного каменя і вуглекислою.

При фільтрації води, що містить вуглекислоти, через бетон по складу фільтрату можна судити про характер процесу. Якщо у фільтраті міститься  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , це означає, що вуглекислота затримується в бетоні у вигляді  $\text{CaCO}_3$ , що повинне його ущільнювати. Але якщо у фільтраті виявляється  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,

можна чекати посилення фільтрації за рахунок розчинення як карбонату кальцію, так і гідроксиду кальцію. В цьому випадку існує небезпека корозійної дії вод, що містять вуглекислоту. Схема дії  $\text{CO}_2$  на бетон при фільтрації представлена на В.М. Москвину.

У лабораторних умовах, як правило, дослідження проводили при досить високих концентраціях агресивного розчину, наприклад 300 мг/л. Випробування на зразках малого розміру з великою питомою поверхнею приводили до результатів, які в значній мірі відображали задуговую дію води, що підсилюється розчиненням захисних плівок карбонату кальцію. Ці результати можуть бути використані для оцінки порівняльної стійкості бетону на різних цементах, проте, з обов'язковим обліком щільності — пористості цементного каменя, яка залежить і від водопотреби цементу. Так, було показано, що в розчинах вуглекислоти пуццоланові портландцементи не мають особливих переваг перед портландцементом. Дифузія гідроксиду кальцію їх цементного каменя пуццоланового портландцементу йде повільніше, ніж з цементного каменя портландцементу унаслідок меншого вмісту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Зниження міцності, аналогічне по величині міцності портландцементу, досягається при меншій кількості виділеного  $\text{CaO}$ . Проведено значне число досліджень за оцінкою міри агресивності дії вуглекислоти на бетон. Інтенсивне руйнування бетону спостерігається на спорудах, в яких зберігається або переміщується вода, насичена вуглекислотою (нарзанові джерела).

В той же час взаємодія бікарбонату з гідроксидом кальцію, що приводить до ущільнення бетону, була встановлена на класичному прикладі самолікування бетону Баку—Шолларського водовода. В цьому випадку труби були виконані з монолітного недостатньо щільного бетону. При пуску водовода частковому заповненні прісною водою почалася корозія бетону за рахунок проникнення в товщу бетону зовнішніх мінералізованих вод на

ділянках, де проходили траса по ґрунтах, оводнених мінералізованими водами.

Після пуску водоводу при повністю загвоєненому внутрішньому перетині і натиску води, що мала жорсткість 13,7°Н почалося поступове ущільнення бетону, а надалі повне ущільнення бетону за рахунок коагуляції пір відкладеннями карбонату кальцію.

У нормах агресивності води по відношенню до бетону в ЧССР були вельми жорсткі вимоги — вода вважалася агресивною при вмісті  $\text{CO}_{2\text{агр}}$  більше 10 мг/л. У стандарті СЭВ ця норма збільшена до 20 мг/л. В той же час є дані про можливість збільшити мінімальний вміст агресивної вуглекислоти, при якому вода може вважатися агресивною, до 100 мг/л. Міра агресивності води залежатиме від умов контакту води і бетону споруди. У нашій практиці це наголошувалося агресивною дією підземних вод з вмістом агресивної вуглекислоти до 200 мг/л, наприклад на бетон залізобетонних паль. Це можна пояснити швидким утворенням поверхневої захисної кірки в щільному ґрунті в поверхневому шарі бетону, що складається з карбонату кальцію і продуктів корозії, що залишаються на поверхні бетону. Позитивне розчинення карбонатної плівки вимагає інтенсивної зміни води, що містить агресивну вуглекислоту.

### 1.3. Особливості корозії бетону в сильних мінеральних кислотах

**Дія мінеральних кислот.** Інтенсивність корозійного процесу визначається найменшою швидкістю процесів: зовнішньої дифузії (швидкістю підведення агресивної розчину до поверхні споруди), внутрішньої дифузії іонів в пористий цементного каменя і хімічною реакцією.

При взаємодії агресивних середовищ з цементним каменем бетону в поверхневому шарі утворюються продукти корозії. Інтенсивність корозії залежить від щільності — проникності цього шару. Склад і властивості

продуктів корозії, що утворюються, залежать від вигляду і концентрації кислоти.

Питання про міру безпеки пошкодження бетону мінеральними кислотами, використання яких поширене в різних галузях промисловості, досліджувалося експериментально і теоретично. У роботах Г.В. Дубарської були отримані кількісні характеристики ефективних коефіцієнтів дифузії кислот і запропоновано розділяти кислоти на три групи по розчинності їх кальцієвих солей.

До I групи відносяться кислоти, в результаті дії яких на цементний камінь бетону утворюється шар продуктів корозії, що складається з гелів кремнієвої кислоти, гідроксиду заліза, гідроксиду алюмінію і незначної кількості кристалічних включень — солей кальцію. Це соляна, азотна, хлористоводнева та інші сильні мінеральні кислоти.

До II групи відносяться кислоти з розчинністю кальцієвих солей менше 1 г/л, який при невеликих концентраціях утворює шар продуктів корозії, що складається з тих же продуктів корозії, що і при дії кислот I групи, а при високих концентраціях — шар, що складається з тих же солей (кремнієвої кислоти,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) із значним вмістом солей кальцію в твердій фазі, що можливо при перевищенні концентрації аніона кислоти над розчинністю її кальцієвої солі. Присутність солей кальцію підвищує щільність шару продуктів корозії і знижує швидкість корозійного процесу. До цієї групи відносяться фосфорна, сірчана, сірниста та інші кислоти.

До III групи відносяться кислоти, розчинність кальцієвих солей яких менше 0,002 г/л. Кислоти, створюючи при всіх значеннях концентрацій шар продуктів корозії, що складається з гелів кремнієвої кислоти і гідроксидів заліза і алюмінію, ущільнених нерозчинними солями кальцію. До цієї групи відносяться шавлева, фтористоводнева і кремнефтористоводнева кислоти.

Продукти корозії, що утворилися на поверхні бетону, перешкоджають доступу агресивного середовища до внутрішніх, ще не пошкоджених частин

цементного каменя і значно знижують швидкість корозійного процесу. У початковий період часу, коли шар продуктів корозії ще незначний, інтенсивність корозії визначається швидкістю хімічної реакції — процес знаходиться в кінетичній області. У міру зростання шару продуктів корозії на поверхні бетону процес сповільнюється і при подальшому збільшенні шару продуктів корозії інтенсивність корозії визначається лише дифузійною агресивних іонів через прокородований шар до ще не пошкодженого бетону — процес переходить в дифузійну область.

Кислоти утворюють при взаємодії  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і  $\text{CaCO}_3$  добре розчинні гігроскопічні кислоти, що приєднують при кристалізації значну кількість води.

Розглянемо дію на бетон кислот. Найбільш поширеними з них є соляна кислота. Соляна кислота взаємодіє з гідроксидом кальцію і утворює хлористий кальцій. Проникаючи в глиб бетону, де зберігається висока лужність, соляна кислота може утворювати основні солі — оксихлориди гідрохлоралюмінію, стабільні лише при певній високій концентрації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . У міру просування зони нейтралізації і пониження концентрації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ці з'єднання руйнуються. Хлористий кальцій володіє високою гігроскопічністю; рівномірна відносна вологість над насиченим розчином  $\text{CaCl}_2$  дорівнює 30—35% залежно від температури. Кристалізація його з приєднанням до 6 молекул води можлива лише при меншій вологості. При вологості більше 30—35% кристалічний хлористий кальцій поглинає вологу з атмосфери і утворює розчин. У рівноважному стані концентрація розчину  $\text{CaCl}_2$  залежить від вологості повітря. При малому вмісті хлористого кальцію в поверхневих шарах бетону і постійної вологості повітря перенесення кислоти в глиб бетону здійснюється за рахунок дифузії в рідкій фазі. Утворившись у великих кількостях і поглинувши відповідно більший об'єм води, соляна кислота може переміщатися в глиб бетону шляхом капілярного всмоктування розчину. З ще більшою швидкістю вона проникає

в бетон при періодичному зволоженні поверхні конденсацією, технологічними рідинами. Як показують досліди, при дії соляної кислоти міцність бетону знижується. Розчин хлористого кальцію, що утворюється, за рахунок капілярного всмоктування переміщується в глиб бетону. В результаті переходу твердих фаз цементного каменя в рідину поверхневий шар бетону стає пористішим. У цьому шарі залишається гель кремнекислотний і гідрооксиди алюмінію і заліза. Спостереження за цементно-піщаними розчинами бетону, що експлуатуються в цехах з виділенням пари соляної кислоти, показують, що поверхневий шар їх з часом втрачає міцність, злущується, при натисканні пальцем розсипається. Навіть при нормальній вологості повітря зруйнований шар має у вологій масі, що пов'язане з присутністю в ньому розчину соляної кислоти.

Пошкодження залізобетонних конструкцій відбувається тим швидше, чим вище концентрація соляної кислоти і вологість середовища. Чим вище концентрація НСІ, тим інтенсивніше його привід для реакуючої поверхні бетону. Корозія бетону в середовищі соляної кислоти з підвищенням вологості прискорюється. Це пов'язано принаймні з двома обставинами. По-перше, підвищення об'єму води в бетоні збільшує масу розчиненої соляної кислоти, отже, при капілярному всмоктуванні розчину велика кількість НСІ реагуватиме з основними мінералами цементного каменя, по-друге, велика міра заповнення пор рідиною полегшує дифузю розчиненого хлористого кальцію в глиб бетону.

#### **1.4. Основні положення математичного моделювання процесу деструкції бетону при корозії в кислих середовищах**

Прогнозування довговічності будівельних конструкцій в агресивних умовах – одне з основних завдань, вирішення якого необхідне для оптимального проектування будівель і споруд. Проте це можливо лише за

умови, що є кілька рішень з конкретною вказівкою очікуваного терміну служби конструкції або глибини корозійного руйнування бетону.

Визначення швидкості корозії бетону викликає значні труднощі у зв'язку з тим, що число чинників (постійних і змінних), що роблять вплив на кінетику процесу, дуже велике (більше десяти). Для вирішення таких завдань використовують теорію моделювання, внаслідок чого отримують безрозмірні комплекси, що виражають фізичну і хімічну суть явищ, і це дозволяють звести експериментальні роботи до вивчення впливу всього двох-трьох комплексних чинників. Методи моделювання при дослідженні корозії залізобетону ще недостатньо широко застосовують на практиці, хоча їх перевага очевидна.

У основу моделювання фізико - хімічних процесів типу корозії бетону складено три принципи, які зводяться до наступного: однорідність ділянок, що розглядаються при рішенні задачі. При корозії бетону в рідкому кислому середовищі, наприклад, таких ділянок три: у першому відбувається дифузія агресивної речовини, в другому – розчиненої вихідної речовини, а в третьому – дифузія і розчинення вихідної твердої фази; принцип доступності Франка – Каменського, що свідчить про те, що всі поверхні, що розглядаються в даному процесі, рівно доступні. Таке наближення впливає на точність рішення лише в межах абсолютного значення безрозмірного множника; адитивність окремих явищ. Так якщо речовина переноситься в результаті дифузії в конвекції, то сумарна швидкість перенесення дорівнює сумі індивідуальних.

Проілюструємо сказане прикладом з області корозії бетону в агресивному кислому рідкому середовищі. Вирізуємо в ділянках з тіла бетону перпендикулярно до вищої поверхні призму з поперечним перетином  $1 \text{ см}^2$  і

розглядаємо зміну концентрації на ділянці  $\delta x$  (рисунок 1.1).

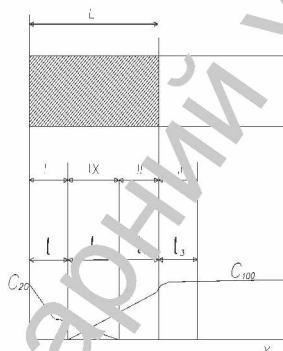


Рисунок 1.1 Ділянки корозійного руйнування.

Приймаємо, що кількість, яка могла розчинитися вже проникла на деяку глибину (ділянки 1 і 2). На цих ділянках та речовина яка могла розчинитися, вже повністю розчинилась. В третій області відбувається: розчинення твердої фази і дифузійне відведення речовини справа наліво. На другій ділянці спостерігається лише дифузія розчиненої речовини, на першій ж агресивна речовина рухається назустріч цьому потоку з результатом конвективної дифузії. При зустрічі двох потоків відбувається їх взаємодія. При цьому між ділянками 1 і 2 утворюється область, але її ширина дуже мала (соті долі міліметра), тому можна вважати, що вона сконцентрована в точці. У будь-якому даному перетині кожної ділянки (області) концентрація речовин змінюється з часом. У третьої області воно виражається формулою:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = SK_1(C_{1\infty} - C) + \text{ПД} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \text{СП} \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (1.1)$$

де  $S$  – питома поверхня вихідної фази;

$K_1$  – константа швидкості розчинення;

$C_{1\infty}$  – розчинність;

$\Pi$  – пористість;

$D$  – коефіцієнт дифузії;

$U$  – швидкість конвективного потоку.

Перший член правої частини рівняння виражає швидкість вступу речовини в розчин, другий, враховує перенесення речовини в даному порегині унаслідок дифузії. Як видно даним вираженням є залежність між двома шуканими змінними  $C$  і  $x$  і п'ятьма параметрами з яких  $K_1$ ,  $D$  і  $C_{1\infty}$  є функціями температури, а  $S$  і  $\Pi$  в ході процесу поступово змінюється.

Розділивши всі члени рівняння з  $\Pi D$ , запишемо для квазістаціонарного режиму диференціальне рівняння:

$$x^2(1-\eta) + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} - Pe \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = 0, \quad (1.2)$$

де  $x^2 = \frac{SK_1 L^2}{\Pi D}$  – відношення швидкості розчинення до швидкості дифузії;

$Pe = \frac{UL}{D}$  – відношення швидкості конвекції до швидкості дифузії (число Пекла);

$\eta = \frac{C - C_{1\infty}}{C_1 - C_{1\infty}}$  – міра перенасичення розчину;

$\xi = \frac{x}{L}$  - відстань від зовнішньої поверхні.

Таким чином, надалі маємо справу лише з безрозмірними параметрами, які з'являються з рівняння (1.1), мають певну фізичну сутність, отже, носять об'єктивний характер. Розглянувши як застосовуються принципи моделювання в області корозії, покажемо, що результати, що отримуються з вирішення диференціальних рівнянь, мають універсальний характер і виражають фізико-хімічну суть процесу в явній формі. Наприклад, при корозії бетону в рідкому кислому середовищі можна отримати універсальну формулу для визначення швидкості просування кривої корозійного руйнування. Залежно від інтенсивності конвективного потоку, концентрації агресивного середовища і наявності буферної ділянки загальне рішення може бути представлене у вигляді різних часткових виразів, які згруповані в таблиці.

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Загальне рішення   | $x=L=\varphi[\sqrt{Kx^2L+1}-1]$ |
| Глибина урощення залежно від вигляду руйнування  |                                 |
| Те саме при інтенсивності конвективного потоку:<br>$Pe = 0$<br>$Pe > 1$<br>$Pe > 1$        |                                 |
| Константи процесу $K$ при концентрації середовища:<br>$C_{\infty} > 0$<br>$C_{\infty} = 0$ |                                 |

у приведених залежностях прийняті наступні позначення:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,25P_e^2 - 0,5P_e}} - \text{безрозмірний комплекс, що враховує вплив}$$

конвекції;

$L$  – глибина ураження;

$K$  – константа процесу корозії;

$D_1, D_2$  – коефіцієнт дифузії вихідної і агресивної речовини;

$\Pi_1, \Pi_2$  – пористість вихідного матеріалу і буферного шару;

$C_\infty$  – концентрація агресивного середовища;

$\gamma_1$  – щільність вихідного матеріалу;

$\mu$  – стехіометричний коефіцієнт;

$t$  – час;

Приведені в таблиці вирази до точності можна прирівняти, наприклад до формул опору матеріалів. Тому при прогнозуванні довговічності, як і при розрахунку міцності конструкцій, необхідно вводити коефіцієнт запасу. Універсальна формула для опису практично всіх випадків корозії бетону I і II видів (1.1). В умовах хімічних виробництв найбільш поширений випадок корозії бетону з утворенням буферного шару при вільному обмиванні конструкції агресивним середовищем, тобто при  $P_e = 0$ . Формула  $L = \sqrt{Kt}$ , що відображає цей процес, отримана експериментальним шляхом і в даний час досить широко застосовується. Константи швидкості корозійного процесу для цих умов, визначені для основних неорганічних кислот, табульовані і приведені в (1.2).

Деякий інший підхід використовували при визначенні довговічності залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в середовищі агресивних газів (1.3). Як приклад розглянули процес корозії залізобетону в середовищі хлористого водню, хоча в принципі такий підхід застосовний до всіх видів корозії в газовому середовищі (1.3). За даними дослідів, газ,

проникаючи в паровий простір, навіть при невеликій вологості бетону, із-за значної площі його внутрішньої поверхні глибоко розчиняється. Розрахунки, виконані на ЕВМ, показали, що при вологості довкілля більше 60% всього проникаючого газу розчиняється на глибині 1-2мм. Потім зони нейтрального розчину  $\text{CaCl}_2$ , що утворився, дифундують в поровій рідині бетону до арматури. Коли концентрація хлоридів в поверхні арматури досягає критичного значення, сталь де пасивується і на металі виникає очаг корозії. Термін експлуатації конструкції до початку корозії арматури і був прийнятий за довговічність.

Для опису розподілу конструкції використовується залежність:

$$C_4 = \gamma(t) \left[ 1 - \frac{x}{\lambda(t)} \right]^n \quad (1.3)$$

функція  $\gamma(t)$  і  $\lambda(t)$  показує зміну конструкції агресивних іонів на поверхні бетону і глибину їх проникнення, визначали теоретично виходячи з динамічної рівноваги всіх наявних потоків причому виявилася:

$$\lambda = \sqrt{2D_4 t}; \quad (1.4)$$

$$C_{40} = \mu_4 q_1 \sqrt{\frac{t}{D_4}}; \quad (1.5)$$

$$C_4 = C_{40} \left( 1 - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (1.6)$$

де  $\lambda$  - глибина проникнення агресивних іонів;

$D_4$  - коефіцієнт дифузії;

$q_1$  – кількість агресивного газу, що поглинається одиницею поверхні бетону в одиницю часу;

$C_{40}$  – концентрація агресивних іонів на поверхні бетону;

$\mu_4$  – стехнометричний коефіцієнт;

Отримані вирази дозволили оцінити критичний термін служби конструкцій:

$$t_k = \frac{1}{2} \left( \frac{C_{4k}/\sqrt{D_4}}{\mu_4 \cdot 1} + \frac{X_n}{\sqrt{D_4}} \right)^2, \quad (1.7)$$

де  $C_{4k}$  – гранично – допустима концентрація хлоридів,

$X_n$  – глибина заложення арматури.

Теорія моделювання гідравлічних ає і динамічних і фізико – хімічних процесів даєно застосовується в різних прикладних науках. Доцільно використовувати її і в теорії корозії. Окремі результати математичного моделювання повинні отримати своє віддзеркалення і у відповідних нормативних документах.

### **1.5. Методи прогнозування глибини руйнування бетону в кислих середовищах**

#### **Кінетика корозії бетону.**

При корозії I і II видів відбувається поступове руйнування бетону з поверхні в глибину матеріалу. Інтенсивність руйнування бетону залежить від механізму перенесення розчинів калієт і їх взаємодії з компонентами бетону, голо зним чином цементним каменем, який в більшості випадків є найбільш слабким з точки зору корозії компонентом бетону.

Для розвитку процесів корозії необхідна постійна дія агресивного середовища на компоненти бетону, у тому числі на внутрішні шари, коли фронт корозії переміщується в глиб матеріалу. В процесі корозії бетону мають місце різні механізми перенесення агресивних речовин до поверхні

корозії. У підземних, наземних конструкціях переважає дифузійне перенесення агресивних речовин. Це найбільш поширений процес при кислотній корозії бетону. При однобічному натязку, температурному або вологосному перепадах або капілярному підсосі маємо фільтраційний механізм перенесення агресивного середовища.

Швидкість корозії бетону зазвичай швидко розривається в початковий період і поступово затуляє в часі. Зміна швидкості корозії пов'язана з відкладенням на реакційній поверхні продуктів корозії, які гальмують доступ до неї агресивних речовин. Спочатку швидкість корозії визначається швидкістю взаємодії розчину кислоти з компонентами бетону або швидкістю розчинення. Проте дуже швидко на реакційній поверхні з'являються продукти корозії і на швидкість корозії починає впливати також дифузія кислоти до реакційної поверхні. В цей період, умовно названий дифузійно-кінетичним, швидкість корозії визначається як швидкістю хімічної взаємодії, так і дифузією реагуючих речовин. Із збільшенням глибини враження бетону і величини шару продуктів корозії вирішальне значення набуває дифузія розчину кислоти до поверхні корозії. Цей період називають періодом внутрішньої дифузії, і для нього характерна лінійна залежність глибини руйнування. Дифузійний опір продуктів корозії визначається структурою кристалічної складової і підвищується із збільшенням щільності шару продуктів корозії. Найменшим опором володіють продукти у вигляді гелю.

Товщина шару продуктів корозії залежить від умов експлуатації і схильності продуктів корозії утримуватися в порах бетону або на його поверхні. При вільному обміганні конструкції водно-середовищем товщина шару продуктів корозії зазвичай встановлюється постійною, оскільки частина продуктів корозії змивається і вносився водою. В цьому випадку процес корозії може протікати а як по дифузійно-кінетичному, так і по дифузійному механізмі перенесення речовини. На

конструкціях, що знаходяться в ґрунтах, продукти корозії, як правило, залишаються на місці. При цьому відбувається поступове збільшення товщини шару продуктів корозії і підвищення його щільності. В цих умовах швидкість реакції корозії і глибина руйнування бетону визначаються дифузійно реагуючих речовин і мірою їх агресивності. В цементному камені або бетоні при дії розчинів кислот відбувається пошарове руйнування матеріалу з утворенням наступних зон: продуктів корозії, безпосередньо корозії і бетону, в якому не сталася яких-небудь фазових перетворень. З часом відбувається поступове пересування зон в глибину бетону, але навіть при значній мірі руйнування матеріалу зберігається чіткий кордон між доброякісним бетоном і зонами корозії.

#### Аналіз методів прогнозування глибини руйнування бетону

В роботі Глазюла І.І. [5] розраховують глибини руйнування  $G_p$  бетону розраховується по наступній формулі:

$$G_p = \frac{\sum PCaO}{Ц\beta} \quad (1.8)$$

де  $\sum PCaO$  – кількість цементного каменю, що прореагував, в перерахунку на  $CaO$ , віднесене до одиниці площі реагуючої поверхні зразків, визначається експериментально,  $г/см^2$ ;

$Ц$  – кількість цементу в  $1\text{ см}^3$  досліджуваних зразків розраховується по фактичному складу зразків,  $г/см^3$ .

$\beta$  – вміст  $CaO$  в цементі, %, визначається за результатами хімічного аналізу цементу.

При прогнозуванні глибини руйнування бетону у внутрішній дифузійній області використовується залежність  $\sum PCaO = f(\sqrt{\tau})$  виражена формулою:

$$\sum PCaO = a + K\sqrt{\tau} \quad (1.9)$$

де  $a$  – постійна, та  $a$ , що враховує вплив процесів, що протікають в дифузійно-кінетичній області;

$K$  – експериментальна величина, визначена, як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис на графіках  $\sum PCaO - \sqrt{\tau}$ ,  $\frac{2}{\text{см}^2 \sqrt{\text{доба}}}$ .

Для обліку погрішності в розрахунках замість  $a$  вводиться множник  $(1-\alpha)$ , в якому введений поправочний коефіцієнт  $\alpha$ .

Коефіцієнт  $\alpha$  розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{\sum P_1 CaO}{\sum P_2 CaO} \quad (1.10)$$

де  $\sum P_1 CaO$  – кількість цементного каменю в перерахунку на  $CaO$ , що увійшло до взаємодії з агресивним середовищем в дифузійно-кінетичній області (до встановлення прямолінійної залежності)  $P_1 CaO = f(\sqrt{\tau})$ ;

$\sum P_2 CaO$  – кількість цементного каменю в перерахунку на  $CaO$ , що увійшло до взаємодії з агресивним середовищем з початку експерименту до терміну глибини руйнування, що розраховувався. Величина коефіцієнта  $\alpha$  враховується тільки при значенні більше 0,1.

Прогнозування глибини руйнування бетону робиться по формулах:

$$r_r = (1 - \alpha) \frac{K\sqrt{\tau}}{C\beta} \quad (\text{при } \alpha > 0,1), \quad (1.11)$$

$$\Gamma_p = \frac{K\sqrt{\tau}}{C\beta} \quad (\text{при } \alpha > 0,1); \quad (1.12)$$

де  $\tau$  – час, для якого прогнозується глибина руйнування, доба.

Розрахунок глибини руйнування при проліканні процесів корозії в дифузійно-кінетичній області розраховується по формулі :

$$I = \frac{v\tau}{C\beta}, \quad (1.13)$$

де  $v$  – постійна швидкість в дифузійно-кінетичній області,  $\frac{rCaO}{\text{см}^2 \cdot \text{доб}}$ .

Експериментальні визначення в кислому середовищі глибини корозійної поразки в часі підтвердили, що характер кривої  $\xi = f(\sqrt{\tau})$  з часом змінюється.

Під час переходу процесу в дифузійну область між глибиною корозійної поразки  $\xi$  і коренем квадратним з часу встановлюється прямолінійна залежність [21]. На залежність швидкості процесу від часу вигляду  $V = A\sqrt{\tau}$  вказували також автори [20].

Згідно з проведеними експериментальними дослідженнями в координатах-  $\sqrt{\tau}$  досліджені залежності також виражаються прямими лініями:

$$\xi = -\alpha + A\sqrt{\tau}. \quad (1.14)$$

де  $A$  - коефіцієнт пропорційності (дорівнює тангенсу кута нахилу прямої, є характеристикою інтенсивності процесу), залежний від складу цементного каменя, міри агресивності розчину кислоти середовища, проникності шару продуктів корозії;  $\alpha$  - коефіцієнт що враховує розвиток процесу в кінетичній і дифузійнокінетичних областях: чисельне значення коефіцієнта  $\alpha$  дорівнює відрізку, що відкладається прямими при їх

продовженні на осі ординат. При великих значеннях  $\tau$  коефіцієнтом  $\alpha$  можна нехтувати. Відоме рівняння Таммана [1], що описує гетерогенні хімічні реакції з врахуванням опору дифузії шару продуктів реакції. Рівняння має вигляд:

$$y = \sqrt{2DC_0\tau}. \quad (1.15)$$

де  $y$  - товщина шару продуктів реакції, мм;  $D$  - коефіцієнт дифузії,  $\text{см}^2/\text{діб}$ ;  $C_0$  - концентрація дифундуючого компонента, заг. в. відсотки;  $Z$  - час, днів. На основі рівняння (1.5.8) було отримано вираз:

$$\xi = \sqrt{\frac{2D^*C_0}{u}} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1.16)$$

де  $\xi$  - глибина корозійного руйнування, см;  $D^*$  - ефективний коефіцієнт дифузії,  $\text{см}^2/\text{год}$ ;  $C_0$  - концентрація агресивної речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\tau$  - час, год;  $u$  - кількість речовини, що доводиться на одиницю об'єму вихідного матеріалу і вступаючого в хімічну взаємодію з кислим середовищем,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Величина  $u$  може бути визначена як  $u = \frac{C \cdot K}{\rho}$ , де  $C$  - витрата цементу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $K$  - вміст  $\text{CaO}$  в цементі, %. При даних характеристиках матеріалу - ефективному коефіцієнті дифузії  $D^*$ , кількості речовини  $u$ , що прореагувала з агресивним середовищем, в даному випадку з кислотою, рівняння (1.16) може бути записане у вигляді:

$$\xi = A\sqrt{C_0\tau}. \quad (1.17)$$

Величина  $A$ , розрахована за даними для  $C = 0,1, 0,3$  і  $0,5$  н. розчинів НСІ при  $\tau = 25$  діб складає  $0,012-0,011$ , що вказує на пряму лінійну залежність  $\xi$  від  $\sqrt{C_0}$ .

При розрахунку враховується глибина руйнування в період протікання процесу в кінетичній і дифузійно-кінетичній областях, що може бути відбите у вигляді додаткового члена в формула (1.17) набере вигляду:  $\xi = -\alpha + A\sqrt{C_0}$ .

Значення коефіцієнтів  $a$  для 0,5; 0,3 і 0,1 н. розчинів HCl складають відповідно:  $\alpha_1=0,4$ ,  $\alpha_2=0,3$  і  $\alpha_3=0,15$ .

Прямолінійна залежність глибини руйнування від кореня квадратного з часу і концентрації для процесів корозії при різних концентраціях HCl, показує застосовність рівняння Таммана для опису корозійних процесів на моделі - роздробленому цементному камені.

Виконана робота показала, що дослідження кінетики корозійних процесів при корозії другого виду можна проводити на даній моделі і для розрахунку інтенсивності корозії (глибини руйнування) може бути використана залежність (1.16).

Використовуючи (1.16) при відомих  $C_0$ ,  $C$ ,  $K$  були визначені  $D^*$  - ефективні коефіцієнти дифузії в продуктах корозії для 0,1 і 0,5н. розчинів HCl, які склали відповідно 0,044 і 0,032 см<sup>2</sup>/год. або  $1,2 \cdot 10^{-7}$  і  $0,9 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, що близько до результатів, отриманих в [18] ( $1,6-1,7 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с).

Використовуваний [18] стаціонарний метод показує величину ефективного коефіцієнта дифузії для гелю, що повністю сформувався, тоді як в реальних умовах величина його визначатиметься не лише проникністю гелю, але і кристалічною складовою, хоча і в невеликій кількості, але все таки присутній в продуктах гелів корозії.

Для підтвердження правомірності використання формули (1.16) і значень  $D^*$ , при описі корозійних процесів були проведені розрахунки з використанням літературних даних по експериментальному дослідженню корозійного руйнування цементного каменя в розчинах HCl різних концентрацій [1]. При розрахунках була прийнята середня величина  $D^*$ ,

рівна  $0,038 \text{ см}^2/\text{год.}$ ; величини  $S_0$ ,  $\Psi$ ,  $K$  відомі з умов проведення експерименту.

Результати розрахунків виконані по формулі (1.16), добре узгоджуються експериментальними дослідженнями, проведеними на цементному камені.

При виведенні розрахункової формули для визначення глибини корозійного пошкодження бетону (розчину) вважаємо, що ефективний коефіцієнт дифузії агресивної речовини через шар продуктів корозії цементного каменя в бетоні і в камені в цементному камені один і той же. Тоді з врахуванням площі, зайнятої заповнювачем і поверхні, що доводиться на одиницю  $S_3$ , коефіцієнт дифузії в бетоні може бути обчислений за формулою.

$$D_6 = D^* (1 - S_3),$$

або, вважаючи пористість за площею рівній пористості за об'ємом:

$$D_6 = D^* (1 - V_3), \quad (1.18)$$

де  $V_3$  - доля об'єму інертних заповнювачів в одиниці об'єму бетону, визначається по формулі:

$$V_3 = \frac{G_3}{\rho_3}, \quad (1.19)$$

де  $G$  - витрата заповнювачів на одиницю об'єму бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho$  - щільність заповнювачів,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

З обліком (1.18) і (1.19) з формули (1.16) отримаємо:

$$\xi = \sqrt{\frac{2C_0 D^* (1 - \frac{G_3}{\rho_3})}{C \cdot K}} \cdot \sqrt{\tau} \quad (1.20)$$

Хороший збіг результатів розрахунку, отриманого по формулі (1.20) з даними, приведеними в [1], підтверджує правомірність використання даної формули для розрахунків глибини корозійного пошкодження бетонів.

У [5] вивчено кінетику корозійного руйнування бетону, для чого використано рівняння дифузії з урахуванням зміни коефіцієнта дифузії внаслідок корозійної деградації структури цементного каменю (бетону). Це дало змогу визначити коефіцієнт пропорційності  $\beta$ , який зв'язує величину корозійної деградації бетону з тривалістю дії агресивного середовища за теоретичними розрахунками на основі даних про дифузійні властивості нормальної та деградованої структур бетону.

Коефіцієнт  $\beta$  обчислено з характеристичного рівняння

$$\frac{\sqrt{D_1} (C_{\min} - C_n)}{\operatorname{erf} \beta / 2 \sqrt{D_1}} \exp\left(-\frac{z_1^2}{D_1}\right) - \frac{\sqrt{D_2} C_{\min}}{\operatorname{erfc} \beta / 2 \sqrt{D_2}} \exp\left(-\frac{z_1^2}{D_2}\right) = \frac{\lambda \rho_2 \sqrt{\pi}}{2} \beta. \quad (1.21)$$

Нехай  $C_2(x, t) = C_{\min}$ , тобто в початковий момент концентрація агресивної речовини однакова по глибині. Якщо функції  $\exp z_1^2$  і  $\operatorname{erf} z_1$ , де  $z_1 = \beta / 2$ , розкласти в ряди й обмежитись першими членами, то

$$\beta = \sqrt{\frac{2\rho_1 (C_{\min} - C_n)}{\lambda \rho_2}}. \quad (1.22)$$

Як бачимо, коефіцієнт  $\beta$  залежить від фізико-хімічних (дифузійно-реактивних) параметрів нормального та прокорозьованого бетону. Якщо взяти два члени розкладу  $\exp z_1^2$  й обмежитись першими членами розкладу  $\operatorname{erf} z_1$ , отримавмо:

$$\beta = \left[ \frac{2D_1(C_{\min} - C_n)}{\lambda\rho_2} \left/ \left( 1 + \frac{D_1\rho_1(C_{\min} - C_n)}{2\lambda\rho_2} \right) \right. \right]^{1/2}. \quad (1.23)$$

Отже, у наступному наближенні цей коефіцієнт залежатиме і від густини бетону після корозійного руйнування.

Використавши підстановку Больцмана  $(z/\sqrt{t})$  та функцію Крампа  $\operatorname{erf}(x)$ , рівняння (1.23) стало можливим розв'язати відносно коефіцієнта  $\beta$  і виконати аналітичну оцінку корозійної деградації бетону і за нього бетону в кислотному середовищі, а саме за формулою

$$\beta = \frac{D_2(C_n - C_{\text{ед}})}{r\rho t \sqrt{D_2\pi}} \pm \sqrt{\frac{D_2^2(C_n - C_{\text{ед}})^2}{\pi r^2 \rho^2 t^2 D_2} + \frac{2D_1(C_{\text{ед}}C_n)}{r\rho t}}. \quad (1.24)$$

За фізичним змістом формули (1.24) слід вибрати корінь

$$\sqrt{\frac{D_2^2(C_n - C_{\text{кр}})^2}{\pi r^2 \rho^2 t^2 D_2} + \frac{2D_1(C_{\text{кр}} - C_n)}{r\rho t}} > 0.$$

Розу́с залізобетонного елемента  $t$  можна визначити з урахуванням корозійної деградації корозійного шару арматури  $\varepsilon_0$ . Підставивши значення  $\beta$ , обчислене за формулою (1.24), у співвідношення

$$\varepsilon = \beta\sqrt{t}, \text{ одержимо}$$

$$t = (\varepsilon_0 / \beta)^2. \quad (1.25)$$

На основі формули (1.25) можна счати ресурс корозійної тривкості бетонних та залізобетонних конструкцій у кислотному середовищі.

$$L = \sqrt{Kt + h_{\text{пр}}^2 - h_{\text{тв}}^2} \quad (1.26)$$

де  $h_{\text{пр}}$  - приведена товщина граничного шару рідини біля поверхні бетону, см:

$$h_{\text{пр}} = 1,06 \frac{D_{1\delta}^*}{D_{1A}} \sqrt{\frac{l D_{1A}^*}{v_{\infty}}} \quad (1.27)$$

де  $D_{1\delta}^*$ ,  $D_{1A}^*$  - ефективні коефіцієнти дифузії гідроксиду кальцію в буферному (прокорродованому) шарі бетону і прилеглому ґрунті відповідно,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $l$  - характерний розмір конструкції, об'єкта, що перебуває в агресивному середовищі, м;  $v_{\infty}$  - швидкість переміщення середовища в ґрунті, м/с,  $K$  - константа швидкості дифузії,  $\text{см}^2/\text{год}$ ;  $t$  - розрахунковий термін експлуатації конструкції, год.

Ефективний коефіцієнт дифузії  $D^*$  може бути виражений через молекулярний  $D$  залежністю виду  $D^* = a P_c D$  ( $P_c$  - наскрізна пористість капілярнопористого тіла,  $a$  - коефіцієнт, що характеризує звивистість капілярів і ступінь впливу поверхні пор на дифузію речовини). Тоді рівняння (1.27) можна представити у вигляді

$$h_{\text{пр}} \approx 1,06 \dot{I}_{\text{нв}} \sqrt{\frac{1 D_1}{\dot{I}_{\text{нв}} v_{\infty}}} \quad (1.28)$$

де  $P_{c\delta}$ ,  $P_{cA}$  - наскрізна пористість буферного шару бетону і ґрунта відповідно. Якщо конструкції експлуатуються в об'ємі розчину

(водоймищі), то  $\Pi_{сг} = 1$ ;  $D_1$  - молекулярний коефіцієнт дифузії гідроксиду кальцію у воді,  $\text{см}^2/\text{р}$ . При  $t = 20^\circ\text{C}$   $D_1 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{см}^2/\text{с} = 0,88 \text{см}^2/\text{добу}$  [3].

Константа швидкості корозії залежить як від властивостей бетону, так і від характеристик агресивного середовища:

$$K = \frac{2D_{2a}^* \tilde{N}_{2\infty}}{\mu m_0} \left(1 + \mu \frac{D_{1a}^* \tilde{N}_{1\infty}}{D_{2a}^* \tilde{N}_{2\infty}}\right), \quad (1.29)$$

де  $D_{2a}^*$  - ефективний коефіцієнт дифузії кислоти в буферному шарі бетону,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $C_{2\infty}$  - концентрація кислоти в ґрунтовій воді,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $C_{1\infty}$  - розчинність гідроксиду кальцію в поровій рідині бетону,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $m_0$  - реакційна ємність бетону,  $\text{г}/\text{см}^2$ . Якщо заповнювачі в бетоні інертні до кислоти, наприклад кварцовий пісок, тоді  $m_0 = \beta G_{ц}$  ( $G_{ц}$  - витрата цементу,  $\text{кг}/\text{см}^3$ ;  $\beta$  - масова частка оксиду кальцію в цементі);  $\mu$  - стехіометричне число, що враховує кількість кислоти, нейтралізуюче одиницю маси гідроксиду кальцію.

Приймаючи в першому наближенні, що крізна пористість прямо пропорційна загальній пористості, тобто  $\Pi_{сб} = \Pi_2 \cdot \text{const}$ , отримуємо для  $K$

$$\hat{E} = \hat{E}_0 \tilde{I}_2 \frac{\rho_{ц}}{G_0}, \quad (1.30)$$

де  $\rho_{ц}$  — щільність цементу,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $K_0$  — умовна константа корозії, яка не залежить від параметрів структури бетону:

$$\hat{E}_0 = \frac{D_2 C_{2\infty}}{\mu \beta \rho_{ц}} \left(1 + \mu \frac{\tilde{N}_{1\infty} D_1}{C_{2\infty} D_2} \text{const}\right) \quad (1.31)$$

де  $D_2$  — молекулярний коефіцієнт дифузії кислот у воді. Для соляної кислоти при  $t = 20^\circ\text{C}$   $D_2 = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  [3].

За умови  $C_{2\infty} \gg C_{1\infty}$  рівняння (6) набирає вигляду:

$$K_0 = \frac{D_2 C_{2\infty}}{\mu \beta \rho_0} \text{const}, \quad (1.32)$$

а при  $C_{1\infty} \gg C_{2\infty}$  константа швидкості корозійного процесу постійна і не залежить від концентрації кислоти (корозія бетону I виду по класифікації [16]).

Графік залежності  $K_0 = f(C_{2\infty})$  у діапазоні рН менше 2 є прямою, що пересікає осі координат під кутом  $45^\circ$ , а в інтервалі рН = 4—7 — пряму, паралельну осі абсцис.

Структура бетону залежить від його складу (витрати цементу і водоцементного відношення (IV) і міри ущільнення бетонної суміші ( $k_y$ ). Пористість бетону після його твердіння рівна

$$I_1 = (1 - k_y) \frac{G_0}{\rho_0} \left[ W \frac{\rho_0}{\rho_A} - \theta(\delta - 1) \right], \quad (1.33)$$

а пористість прокопозованного (буферного) шару

$$I_2 = (1 - k_y) \frac{G_0}{\rho_0} \left[ W \frac{\rho_0}{\rho_A} - \theta(\delta - 1)(1 - \beta) + \beta \right], \quad (1.34)$$

де  $\rho_0$  — щільність води, г/см<sup>3</sup>;  $G_0$  — міра гідратації цементу;  $\delta$  - коефіцієнт збільшення об'єму мінералів цементного клінкеру при їх гідратації.

Значення коефіцієнтів в рівнянні (1.34) змінюються в межах  $\delta = 1,5—1,6$ ;  $\beta = 0,6-0,8$   $\Theta = 0,6—0,8$  [5]. Тоді приблизно

$$K = K_0 \left[ (1 - k_y) \frac{\rho_{\delta}}{G_{\delta}} + W \frac{\rho_{\delta}}{\rho_{\delta}} + \sigma_{\delta} \right] \quad (1.55)$$

У випадку контакту бетону із кислими ґрунтовими водами, рівняння для розрахунку глибини корозії бетону має вид (1.16)

При розрахунках глибини руйнування бетону в окремих запропонованих залежностях необхідні додаткові експериментальні дослідження. Наприклад, в [5] запропонована залежність вимагає експериментального визначення кількості цементного каменю, що прореагував, в перерахунку на CaO; вміст CaO в цементі, постійної швидкості в дифузійно-кінетичній області та ін.

У формулі (1.17) виникають складності у визначенні коефіцієнту пропорційності А, коефіцієнту  $\alpha$ .

Зміна глибини корозії бетону за часом в залежності (1.5.18) пов'язана через коефіцієнт  $\beta$  який вимагає громіздких розрахунків для його визначення.

Теж можливо і для залежності (1.17) константи швидкості корозії бетону К визначається з деяким наближенням, використовується приведена товщина граничного шару агресивної рідини.

## ГОЗДІЛ 2

### МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### **Мета роботи:**

Експериментально – теоретичним шляхом дослідити глибину корозійного руйнування цементного бетону при дії розчинів соляної кислоти.

#### **Об'єкт дослідження:**

Глибина корозійних вражень бетону залізобетонних конструкцій в середовищі розчинів соляної кислоти.

#### **Предмет дослідження:**

Прогнозування глибини корозійного руйнування цементного бетону залізобетонних конструкцій в середовищі соляної кислоти

#### **Задачі дослідження:**

- 1) Проаналізувати відомі моделі, що описують глибину руйнування бетону в середовищі сильних мінеральних кислот
- 2) Розробити теоретичні залежності для прогнозування глибини корозійних вражень бетону в середовищі соляної кислоти.
- 3) Провести експериментальну перевірку сформованої залежності
- 4) Дослідити вплив параметрів залежності на динаміку корозійних вражень.
- 5) Сформулювати висновки

### РОЗДІЛ 3

#### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод досліджень полягав в розробці математичної моделі корозії бетону в розчині кислоти і експериментальній перевірці отриманої моделі.

Метод математичного моделювання ґрунтувався на аналізі природи корозійних процесів, що виникають при контакті розчину кислоти з бетоном. Враховувалося, що інтенсивність корозійних процесів визначається інтенсивністю проникнення розчину кислоти в парову структуру бетону.

Рух середовища на зовнішній поверхні велич бетону здійснюється під дією молекулярної дифузії і капілярності.

Таке представлення кінетики процесу дозволило для стаціонарних умов розробити математичну модель для кількісних розрахунків величини потоку розчину кислоти через поверхню бетону, оцінити його вплив на стан бетону для простих граничних умов, розрахувати глибину деструкції бетону в часі.

Для підтвердження відповідності запропонованій математичній моделі проведені експериментальні дослідження. При розробці методики експерименту враховувалося, що зона реакції дії кислоти на бетон має незначні розміри (глибину) і поверхневий шар, що руйнується, чітко відділяється від бетону незачепленою корозією, що дозволяє приймати в цьому випадку глибину руйнування як міру пошкодженості бетону.

Підтвердження розрахункової математичної моделі виконане на бетонних кубиках розміром  $2 \times 2 \times 2$  різного складу і В/Ц при повному зануренні в розчин кислоти із врахуванням дифузійного механізму проникнення агресивних іонів в поровий простір структури бетону.

Дослідження проводилися в лабораторних умовах. Після формування зразків розміром 2x2x2 з різним В/Ц та витримки 28 діб, зразки були виміряні штангенциркулем і їх розміри були занесені до таблиці (3.1) і перераховані на площу зразків.

Таблиця 3.1. Розміри та площа експериментальних зразків.

| Зразок,<br>В/Ц | Розміри<br>зразка, мм | Площа<br>поверхні<br>кубика<br>мм <sup>2</sup> | Зразок,<br>В/Ц | Розміри<br>зразка, мм | Площа<br>поверхні<br>кубика<br>мм <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------|--|----------------|-----------------------|--|
| 1:1            |                       |  | 1:2            |                       |  |
| 0,3            |                       |  | 0,3            |                       |  |
| 0,6            |                       |  | 0,6            |                       |  |
| 0,8            |                       |  | 0,8            | 17,5                  |  |
|                |                       |  |                | 20,7                  |  |

Перед зануренням у кислоту, яка була попередньо розведена до вибраної концентрації, а саме 0,001 г розчину HCl 0,0365 г/м<sup>3</sup>, дані кубики були повністю занурені на 102 дні (рис.3.1)

Рисунок 3.1. Занурення зразків в соляну кислоту на 102 дні.

Після витримки на протяж 102 днів зразки підлягали почерговому кип'ятінню у воді в термостійкому стакані на протяжі 30 хвилин для відщеплення прореагованого із кислотою цементного каменю ( рис 3.2).

Рисунок 3.2. Кип'ятіння зразка у воді.

Осад який залишився в стакані був відфільтрований на фільтрувальний папір за допомогою лійки і колби по скляній паличці. Щоб весь осад зі стакану потрапив на фільтрувальний папір стакан ще кілька разів змочувався водою і осад знову відфільтровувався (рис 3.3)

Рисунок 3.3. Фільтрування осаду.

Наступним кроком було висушування в сушильній шафі фільтрувального паперу з осадом і зважування на аналітичних вагах отриманої маси після сушіння (рис 3.4).

Рисунок 3.4. Результат висучування.

## РОЗДІЛ 4

### ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Соляна кислота**  $\text{HCl}$  — це безбарвний з гострим задушливим запахом розчин хлористого водню ( $\text{HCl}$ ) у воді; домішки надають їй жовтого чи, рідше, зеленуватого кольору. Соляна кислота сильно «димить» на повітрі внаслідок виділення хлористого водню та утворення з вологою повітря дрібних крапель «туману». Хлористий водень у звичайних умовах — безбарвний газ, який обмежено розчиняється у воді. Так, при кімнатній температурі та нормальному тиску його максимальна розчинність становить 42%, тому товарні види соляної кислоти, які випускаються промисловістю, мають концентрацію значно меншу, ніж сірчана та азотна кислоти (максимально 35—36%). Її густина та температура кристалізації, як і інших кислот, залежить від концентрації.

Соляна кислота — одна з найсильніших кислот. Вона розчиняє всі метали, що стоять у ряді напруги до водню. Хлориди утворюються і при взаємодії соляної кислоти з оксидами і гідроксидами металів. З сильними окислювачами соляна кислота поводить себе як відновник, наприклад:



Виробництво соляної кислоти у промисловості включає дві стадії: здобуття  $\text{HCl}$  і його абсорбцію водою. Основний спосіб здобуття  $\text{HCl}$  — синтез з  $\text{Cl}_2$  і  $\text{H}_2$ . Великі кількості  $\text{HCl}$  утворюються як побічний продукт при хлоруванні органічних сполук:  $\text{R-H} + \text{Cl}_2 = \text{RCl} + \text{HCl}$ , де  $\text{R}$  — органічний радикал.

Технічна, що випускається, соляна кислота має міцність не менше 31%  $\text{HCl}$  (синтетична) і 27,5%  $\text{HCl}$  (з  $\text{NaCl}$ ). Торгівельну кислоту називають розбавленою, якщо вона містить, наприклад, 12,2%  $\text{HCl}$ ; при вмісті 24% і більше  $\text{HCl}$  її називають концентрованою. У лабораторній

практиці 2н. НСІ (7%-ну, щільність 1,035) зазвичай називають розбавленою соляною кислотою.

Соляна кислота — найважливіший продукт хімічної промисловості. Вона йде на здобуття хлоридів різних металів і синтез органічних продуктів. Соляну кислоту застосовують для травлення металів для очищення різних судин, обсадних труб бурових свердловин від карбонатів, скотів і ін. опадів і забруднень. У металургії використовують для обробляють руди, в шкіряній промисловості — шкіру перед дублінням. Соляна кислота — важливий реактив в лабораторній практиці. Транспортують у скляних бутлях або гумованих (покритих шаром гуми) металевих судинах.

Для випробувань було використано **портландцемент** ПЦ1-500 Ч, що відповідає вимогам ДСТУ Б В. 2.7-112-2002 [7].

В лабораторних умовах було виготовлено зразки 4x4x16 см для визначення марки цементу. Для цього попередньо проведено перевірку нормальної консистенції цементного розчину. Розплив конусу на струшувальному столику з В/Ц=0,39 становив 108 мм, що є не менше 106 мм, що задовольняє вимоги ДСТУ Б В. 2.7-187-2009 [8]. Результати випробувань занесені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Результати випробувань балочок на стиск та згин

| 2 доби                        | 7 діб | 28 діб |
|-------------------------------|-------|--------|
| Межа міцності на згин, МПа    |       |        |
|                               |       |        |
| Межа міцності при стиску, МПа |       |        |
|                               |       |        |

Випробування міцності на згин проведені на зразках-балочках розміром 4x4x16 см та міцності на стиск половинск балочок у віці 2, 7, 28 днів, що зберігались у вазні з питною водою.

*Дрібним заповнювачем* був кварцовий пісок з модулем крупності  $M_{кр}=1$ , насипною густиною  $\rho=1,42 \text{ г/см}^3$  та вологістю  $W=0\%$ . Основні характеристики піску визначали відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-32:95 [9].

Результати визначення модуля крупності кварцового піску занесені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Зерловий склад піску

| Показник         | Одиниця виміру | Розміри отворів сит, мм |      |      |       |      | Пройшло крізь сита |
|------------------|----------------|-------------------------|------|------|-------|------|--------------------|
|                  |                | 2,5                     | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 |                    |
| Часткові залишки | г              |                         |      |      |       |      |                    |
| Часткові залишки | %              |                         |      |      |       |      |                    |
| Повні залишки    | %              |                         |      |      |       |      |                    |

Модуль крупності  $M_{кр}=1$

*Вода* бралася питна, що відповідає ДСТУ Б.В.2.7-273:2011 [10].

## РОЗДІЛ 5

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 5.1 Дослідження математичної моделі

Для процесів корозії, що перебувають у дифузійній області, справедливо рівняння, отримане на основі опису кінетики гетерогенної реакції (рівняння Тамана), яке може бути записано в даному випадку в наступному вигляді:

$$\delta = A_{\delta} \sqrt{D^* \cdot C_0 \cdot \tau}, \quad (5.1)$$

де  $\delta$  - глибина корозійного пошкодження;  $A_{\delta}$  - коефіцієнт, постійний для даного складу бетону  $\text{м}^2/\text{кг}^{1/2}$ ;  $D^*$  - ефективний коефіцієнт дифузії агресивного речовини через шар продуктів корозії,  $\text{см}^2/\text{год}$ ;  $C_0$  - концентрація агресивного речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\tau$  - хімічний еквівалент, який представляє собою співвідношення мас оксиду кальцію і кислоти, що вступають у взаємодію, що визначається за рівнянням

$$\tau = m M_{CaO} / n M_{HCl} \quad (5.2)$$

де  $m$  і  $n$  - стехіометричні коефіцієнти рівняння реакції між кислотою і оксидом кальцію, а  $M_{CaO}$  і  $M_{HCl}$  - молекулярні маси оксиду кальцію і кислоти;  $\tau$  - час впливу агресивного середовища на бетоні, *год*.

Виходячи з рівності потоку агресивного речовини і кількості оксиду кальцію, який пішов на його нейтралізацію, можна наступним розрахунком підтвердити придатність рівняння (5.1) (1.5.9).

Згідно з рівнянням хімічної реакції в разі дії на цементний камінь, наприклад розчину HCl, має місце

$$\frac{m \cdot M_{CaO}}{q_1} CaO + 2 \frac{n M_{HCl}}{q_2} HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O$$

Виділимо в цементному камені кубічний об'єм з довжиною ребра, рівній одиниці ( $\delta = 1$ ). За рівнянням хімічної реакції для потоку агресивної речовини, що пройшов через цей об'єм, можна записати

$$q_2 = q_1 \frac{nM_{HCl}}{mM_{CaO}} \quad (5.3)$$

При цьому  $q_1$  - кількість CaO, яке містилося в одиничному об'ємі цементного каменю і вступило в хімічну взаємодію з агресивним середовищем, може бути визначено як  $C \cdot k$ , де  $C$  - вміст цементу,  $\text{кг/м}^3$ ,  $k$  - вміст CaO в цементі, долях одиниці.

Тоді кількість агресивної речовини  $q_2$ , увійшло у взаємодію з  $q_1$ , визначиться як

$$q_2 = \ddot{O}k \frac{nM_{HCl}}{mM_{CaO}} \quad (5.4)$$

Згідно з рівнянням Фіка для потоку агресивної речовини  $q_2$  з концентрацією  $C_0$  можна записати

$$q_2 = D C_0 / \delta \quad (5.5)$$

Для  $\delta \neq 1$

$$\frac{\ddot{O}knM_{HCl}}{mM_{CaO}} d\delta = D^* \frac{C_0}{\delta} dt, \quad (5.6)$$

звідки

$$\delta d\delta = \frac{D^* C_0 mM_{CaO}}{\ddot{O}knM_{HCl}} \tau. \quad (5.7)$$

Інтегруючи (5.7), отримаємо

$$\frac{\delta^2}{2} = \frac{D^* C_0 mM_{CaO}}{\ddot{O}knM_{HCl}} \tau + \ddot{N}. \quad (5.8)$$

При  $\tau = 0$  маємо  $\delta = 0$ , так як шар продуктів корозії ще не утворився. Тоді постійна інтегрування  $C = 0$ .

Вирішуючи (5.8) щодо  $\delta$  і ввівши позначення

$$\dot{Y} = \frac{mM_{CaO}}{nM_{HCl}},$$

можна записати

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^*C_0\dot{Y}\tau}{C}}. \quad (5.9)$$

Враховуючи, що  $C\left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{B}{C\rho_s}\right) = 1$ , формула для визначення глибини корозійного ураження цементного каменю в кислих середовищах може бути представлена в наступному вигляді:

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^*C_0\dot{Y} \cdot \left(1/\rho_s + \frac{B}{C\rho_s}\right)\tau}{k}}. \quad (5.10)$$

Глибина корозійного пошкодження бетону може бути визначена з урахуванням того, що ефективний коефіцієнт дифузії агресивного речовини через заспівай продуктів корозії цементного каменю в бетоні і власне в цементному камені одна і той же. Експериментальні дані по визначенню глибини руйнування бетону при дії HCl підтвердили придатність рівняння Таммана (5.9). З урахуванням площі, зайнятої заповнювачем і припадає на одиницю поверхні  $S_3$ , коефіцієнт дифузії в бетоні може бути обчислений за формулою

$$D_s^* = D^*(1 - S_3), \quad (5.11)$$

або, вважаючи, що пористість по площі дорівнює пористості по об'єму, отримаємо

$$D_s^* = D^*(1 - V_3), \quad (5.12)$$

де  $V_3$  - обсяг заповнювачів в одиниці об'єму бетону, який визначається за формулою

$$V_3 = q_3 / \rho_3. \quad (5.13)$$

З урахуванням (5.12) і (5.13) з формули (5.10) отримаємо

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^* C_0 \varepsilon \cdot (1 / \rho_u + B / C \rho_B) \tau}{k}}. \quad (5.14)$$

Виразивши  $(1 - q_3 / \rho_3)$  через  $C(1 / \rho_u + B / C \rho_B)$ , отримаємо залежність (5.10). Ввівши коефіцієнт  $A_6$ , отримаємо рівняння (5.1).

Для цементного каменю, розчину і бетону  $A_6$  розраховується за формулою

$$A_6 = \sqrt{\frac{2(1 / \rho_u + B / C \rho_B)}{k}}. \quad (5.15)$$

Крім того, для розчину і бетону  $A_6$  можна розраховувати за формулою

$$A_6 = \sqrt{\frac{2(1 - q_3 / \rho_3)}{Ck}}. \quad (5.16)$$

У формулах (5.15), (5.16) :  $A_6$  - коефіцієнт, постійний для даного складу бетону,  $\text{м}^3/\text{кг}^{1/2}$ ;  $\rho_u$ ,  $\rho_v$ ,  $\rho_3$  - істинна щільність цементу, води, заповнювачів;  $q_3$  - витрата заповнювачів,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Кінцева математична модель для визначення за часом глибини корозії бетонного зразка при дії розчину соляної кислоти буде:

$$\dot{Y} = \frac{mM_{\text{CaO}}}{nM_{\text{HCl}}} = \frac{56}{2 \cdot 36,5} = 0,767, \quad (5.17)$$

$$\delta_{\text{HCl}} = A_6 \sqrt{D^* \cdot C_0 \cdot 0,767 \tau} \quad (5.18)$$

## 5.2 Розрахунки за розробленою моделлю

За формулою (5.16) визначаємо глибину корозії бетону склад 1:2,3:3,67 з витратою цементу  $C_c=350$  кг/м<sup>3</sup> при  $t_1=0,01$  н розчину HCl протягом 102 днів. Щільність заповнювачів (піску і щебеню) складає 2650 і 2610 кг/м<sup>3</sup> відповідно. Визначим значення  $A_g$ . Розрахунки занесемо до таблиці 5.2.

$$B/C=0,6$$

$$A_g = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - 2,3 \cdot \frac{350}{2650} - 3,67 \cdot \frac{350}{2610})}{350 \cdot 0,63}} = 4,3 \cdot 10^{-2}$$

Глибина корозії складає:

$$\delta = 4,3 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,08 \text{ см.}$$

Таким же чином розраховуються і наступні експериментальні зразки з іншим складом бетону і B/C з постійною дифузцією  $D^* HCl = 0,047$  см<sup>2</sup>/год.

$$B/C=0,7:$$

$$A_g = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - 2,2 \cdot \frac{350}{2650} - 5,9 \cdot \frac{350}{2610})}{350 \cdot 0,63}} = 2,8 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta = 2,8 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,05 \text{ см.}$$

$$B/C=0,8:$$

$$A_g = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - 1,62 \cdot \frac{350}{2650} - 1,94 \cdot \frac{350}{2610})}{350 \cdot 0,63}} = 6,9 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta = 6,9 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,1 \text{ см.}$$

Для складу бетону 1:1 можна розрахувати  $A_g$  за формулою (5.15).

Для В/Ц=0,3:

$$A_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,3) \cdot 1000}{0,63}} = 3,2 \cdot 10^{-2}.$$

Звідси:

$$\delta = 3,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,06 \text{ см.}$$

Для В/Ц=0,6:

$$A_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,6) \cdot 1000}{0,63}} = 4,05 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,07 \text{ см.}$$

Для В/Ц=0,8:

$$A_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,8) \cdot 1000}{0,63}} = 4,4 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta = 4,4 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 102 \cdot 24} = 0,08 \text{ см.}$$

Розраховуємо глибину корозійного руйнування бетону з різним В/Ц і предії на нього різної концентрації розчину НСІ на період 25 років.

Розрахунки наведені в таблиці 5.1.

Для В/Ц 0,4

$$A_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,4) \cdot 1000}{0,63}} = 3,59 \cdot 10^{-2};$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 3,65 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 6,1 \text{ см;}$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 1,9 \text{ см}$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,6 \text{ см;}$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,00365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,2 \text{ см.}$$

Для В/Ц 0,5

$$A_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,5) \cdot 1000}{0,63}} = 3,84 \cdot 10^{-2};$$

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 3,65 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 6,6 \text{ см};$$

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 2,1 \text{ см};$$

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,7 \text{ см};$$

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,00365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,3 \text{ см}.$$

Для В/Ц 0,6

$$A_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,6) \cdot 1000}{0,63}} = 4,05 \cdot 10^{-2};$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 3,65 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 7 \text{ см};$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 2,2 \text{ см};$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,7 \text{ см};$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,00365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,3 \text{ см}.$$

Для В/Ц 0,7

$$A_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 3100 + 0,7) \cdot 1000}{0,63}} = 4,26 \cdot 10^{-2};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 3,65 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 7,3 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 2,4 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,0365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,8 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,00365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,2 \text{ см.}$$

Таблиця 5.1. Глибина корозійного руйнування бетону на 25 років з різним В/Ц при дії HCl різної концентрації.

| Концентрація, HCl |     | Коефіцієнт $A_6$ | Глибина корозійного руйнування, см, при В/Ц бетону |     |     |     |
|-------------------|-----|------------------|--|-----|-----|-----|
| нормальність      | г/л |                  | 0,4  | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
|                   |     |                  |  |     |     |     |
|                   |     |                  |  |     |     |     |
|                   |     |                  |  |     |     |     |
|                   |     |                  |  |     |     |     |

### 5.3 Експериментальне дослідження

При розрахунку площі в таблиці (3.1) з трьох даних розмірів зразка при відповідному В/Ц розраховуємо середнє арифметичне значення грані кубика.

для В/Ц=0,6 при співвідношенні складу бетону 1:1

$$a = \frac{18,7 + 20,2 + 20,2}{3} = 19,7 \text{ мм}$$

де  $a$  – грань кубика

Потім згідно формули площі куба  $S = a^2$  отримаємо :

$$S = 19,7^2 \cdot 6 = 2330 \text{ мм}^2 = 23,3 \text{ см}^2$$

Після сушіння осад в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,43$  г, звідси маючи масу і густину цементу, яка становить  $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3 = 3,1 \text{ г/см}^3$ , для зразка зі співвідношенням складу цементу 1:1 і В/Ц=0,6 можемо розрахувати об'єм даного кубика за формулою:

$$m \cdot \rho = V,$$

$$V = 0,43 \cdot 3,1 = 1,33 \text{ см}^3$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином НСІ за формулою:

$$h = \frac{V}{S}$$

$$h = \frac{1,33}{23,3} = 0,057 \text{ см}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому 0,07  $\approx$  0,057 см.

Для В/Ц=0,3

$$a = \frac{19,7 + 20,7 + 20,2}{3} = 20,2 \text{ мм}$$

$$S = 20,2^2 \cdot 6 = 2448 \text{ мм}^2 = 24,48 \text{ см}^2$$

Після сушіння осад в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,373$  г.

$$V = 0,373 \cdot 3,1 = 1,156 \text{ см}^3$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином НСІ за формулою:

$$h = \frac{1,156}{24,48} = 0,047 \text{ см}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому  
 $0,06 \approx 0,047$  см.

Для В/Ц = 0,8

$$\bar{a} = \frac{20,7 + 16,7 + 21}{3} = 19,47 \text{ мм},$$

$$S = 19,47^2 \cdot 6 = 2275 \text{ мм}^2 = 22,75 \text{ см}^2.$$

Після сушіння осаду в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,412$  г.

$$V = 0,412 \cdot 3,1 = 1,277 \text{ см}^3.$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином HCl за формулою:

$$h = \frac{1,277}{22,75} = 0,056 \text{ см}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому  
 $0,08 \approx 0,073$  см.

Для В/Ц=0,6 при співвідношенні складу бетону 1:2

$$\bar{a} = \frac{19,2 + 20 + 20,5}{3} = 19,9 \text{ мм},$$

$$S = 19,9^2 \cdot 6 = 2376 \text{ мм}^2 = 23,76 \text{ см}^2.$$

Після сушіння осаду в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,481$  г.

$$V = 0,481 \cdot 3,1 = 1,49 \text{ см}^3$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином HCl за формулою:

$$h = \frac{1,49}{23,76} = 0,063 \text{ см}.$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому  
 $0,1 \approx 0,073$  см.

Для В/Ц=0,3

$$\bar{a} = \frac{20,2 + 20 + 20,5}{3} = 20,23 \text{ мм}.$$

$$S = 20,23^2 \cdot 6 = 2456 \text{ мм}^2 = 24,56 \text{ см}^2.$$

Після сушіння осаду в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,221$  г.

$$V = 0,221 \cdot 3,1 = 0,685 \text{ см}^3$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином HCl за формулою:

$$h = \frac{0,685}{24,56} = 0,028 \text{ см.}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому  $0,05 \approx 0,028$  см.

Для В/Ц = 0,1,

$$\bar{a} = \frac{20,5 + 17,5 + 20,7}{3} = 19,57 \text{ мм,}$$

$$S = 19,57^2 \cdot 6 = 2298 \text{ мм}^2 = 22,98 \text{ см}^2$$

Після сушіння осаду в сушильній шафі його маса становить  $m = 0,541$  г.

$$V = 0,541 \cdot 3,1 = 1,68 \text{ см}^3.$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином HCl за формулою:

$$h = \frac{1,68}{22,98} = 0,073 \text{ см.}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює розрахунковому  $0,1 \approx 0,073$  см.





## ГОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

#### 6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які діють на працюючих

Розглядаючи умови праці, слід звернути увагу на такі елементи умов праці, які безпосередньо визначають ці умови на робочих місцях:

- недостатнє освітлення робочого місця;
- електричний струм;
- хімічні речовини;

Раціональне освітлення виробничих приміщень справляє позитивний психофізичний вплив на працюючих, сприяє підвищенню продуктивності праці, забезпеченню його безпеки, збереженню високої працездатності. В механічних цехах збільшення освітленості з 100 до 200 лк викликало збільшення продуктивності праці на 4,3%, знизило брак на 1,2%. Надзвичайно сильно впливає освітленість на продуктивність праці для технологічних процесів з великим об'ємом зорової праці. Збільшення освітленості сприяє збільшенню працездатності навіть в тих випадках, коли процес праці практично не залежить від зорового сприйняття. При недостатньому освітленні швидше втомлюється, збільшується небезпека помилкових дій. До 5% травм обумовлене недостатнім чи нераціональним освітленням. Погане освітлення може призвести до професійних захворювань – короткозорість та ін.

У зв'язку з цим до освітлення виробничих приміщень ставляться цілком визначені вимоги.

Шкідливі речовини можуть надходити в організм людини через органи дихання, шкіру. Особливо активно хімічні речовини потрапляють в організм робітника при високій температурі повітря: шкірні судини розширюються, збільшується потовиділення, частішає дихання

працюючого, що прискорює проникнення шкідливих речовин в організм призводить до ураження верхніх дихальних шляхів і загально токсичного впливу при всмогтуванні речовин через кров. При вдиханні парів кислоти відзначаються ураження слизової оболонки носоглотки і гортані, що може призвести до хронічного захворювання і руйнуванню зубної емалі. При виконанні ручних операцій з кислотою і лугом шкідливі речовини проникають через шкіру і можуть виклати роздратування і хімічні опіки шкірного покриття робітника. Опіки лугами протікають значно важче. Усі кислоти, луги та органічні розчинники знежирюють шкіру. Це призводить до порушення її захисних функцій і в результаті одночасного або подальшого контакту з нікелем, сприяє розвитку шкірних захворювань.

Аналіз нещасних випадків в промисловості, свідчить про те, що кількість травм, викликаних дією електрики, порівняно невелика і складає 0,5-1% від загальної кількості нещасних випадків. Проте з загальної кількості нещасних випадків зі смертельним наслідком на виробництві 20-40% трапляється внаслідок ураження електрострумом, що більше, ніж в наслідок дії інших причин, причому близько 80% смертельних уражень електричним струмом відбувається в електроустановках напругою до 1000 В.

Проходячи через тіло людини, електричний струм справляє термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

Термічна дія струму проявляється через опіки окремих ділянок тіла, нагрівання до високої температури кровоносних судин, нервів, серця, мозку та інших органів, котрі знаходяться на шляху струму, що викликає в них суттєві функціональні розлади.

## **6.2 Технічні засоби і організаційні заходи із усунення дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів**

### **6.2.1 Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих при недостатньому освітленню робочого місця**

Освітленість на робочих місцях повинна відповідати характеру зорової роботи. Збільшення освітленості робочих поверхонь покращує умови бачення об'єктів, підвищує продуктивність праці. Однак існує межа, при якому подальше збільшення освітленості майже не дає ефекту і є еквівалентно недоцільною.

Досить рівномірний розподіл яскравості на робочій поверхні. При нерівномірній яскравості в процесі роботи очі змушені переадаптовуватися, що веде до стомлення зору.

Відсутність різких тіней на робочих поверхнях. В поле зору людини різкі тіні створюють розміри і форми об'єктів розрізнення, що підвищує стомлення зору, а рухомі тіні можуть призвести до травм.

Відсутність блискоті. Блискотість викликає порушення зорових функцій, засліпленість, яка призводить до швидкого стомлення і зниження працездатності.

Сталість освітленості в часі. Коливачтя освітленості викликають переадаптацію очей, призводять до значного стомлення.

Правильна передача кольору. Спектральний склад світла повинен відповідати характеру роботи.

Забезпечення електро-, вибухо- та пожежобезпеки.

Економічність. Для виконання зазначених вимог при проектуванні установок виробничого освітлення та їх експлуатації проводять такі заходи: вибір типу та виду освітлення, джерела світла та освітлювальної

установки, рівня освітленості, а також своєчасне обслуговування освітлювальних установок.

За типом освітлення прийнято ділити на природне, штучне і змішане.

За призначенням виробниче освітлення ділять на робоче, охоронне, аварійне та евакуаційне. Відповідно загальне рівномірне робоче освітлення будівельних майданчиків і ділянок має бути не менше 2 лк, за винятком автодріг.

Для зхорони будівельного майданчика з робочого освітлення виділяють частину освітлювальних установок, що забезпечують горизонтальну; на рівні землі або вертикальну на площині огорожі освітленість, рівну 0,5 лк.

Аварійне освітлення влаштовують в місцях виконання робіт з бетонування особливо відповідальних конструкцій в тих випадках, коли перерва в укладанні бетону неприпустимий. При цьому освітленість бетонування залізобетонних конструкцій повинна бути 3лк, а на ділянках бетонування масивів - 1лк.

Евакуаційне освітлення повинні влаштовувати в місцях основних шляхів евакуації, а також у місцях проходів, де існує небезпека травматизму. Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати всередині будівлі не менше 0,5лк, а поза будівлею-0,2лк.

### **6.2.2 Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих електричного струму**

Виділяють три системи засобів і заходів забезпечення електробезпеки:

- система технічних засобів і заходів;
- система електрозахисних засобів;
- система організаційно-технічних заходів і засобів.

***Система технічних засобів і заходів електробезпеки***

Технічні засоби і заходи з електробезпеки реалізуються в конструкції електроустановок при їх розробці, виготовленні і монтажі відповідно до чинних нормативів. За своїми функціями технічні засоби і заходи забезпечення електробезпеки поділяються на дві групи:

- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок,
- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при аварійних режимах роботи електроустановок.

Основні технічні засоби і заходи забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок включають:

- ізоляцію струмопровідних частин;
- недоступність струмопровідних частин;
- засоби орієнтації в електроустановках,
- виконання електроустановок, ізольованих від землі;
- захисне розділення електричних мереж;
- компенсацію ємнісних струмів замикання на землю;
- вирівнювання потенціалів.

Із метою підвищення рівня безпеки, залежно від призначення, умов експлуатації і конструкції, в електроустановках застосовується одночасно більшість з перерахованих технічних засобів і заходів.

#### ***Система електричних засобів***

Електрозахисні засоби - це технічні засоби, що не є конструктивними елементами електроустановок і використовуються при виконанні робіт в електроустановках з метою запобігання електротравм.

НПА ЄП 40.1-1.07-01 (ДНАСГ 1.1.10-1.07-01) Провіла експлуатації електричних засобів:

... чинний нормативний документ, в якому наведено перелік засобів захисту, вимоги до їх конструкції, обсягів і норм випробувань, порядку застосування і зберігання, комплектування засобами захисту

електроустановок та виробничих бригад. Засоби захисту, що використовуються в електроустановках, повинні відповідати вимогам чинних державних стандартів, технічних умов щодо їх конструкції.

Електрозахисні засоби поділяються на ізолювальні (ізолюючі шнурки, кліщі, накладки, діелектричні рукавичі тощо), огорожувальні (огороження, шпалери, ширми, плакати) та запобіжні (окуляри, каски, запобіжні пояси, рукавиці для захисту рук).

Ізолюючі електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові.

Основні ізолюючі електрозахисні засоби розраховані на напругу установок і при дотриманні вимог безпеки щодо користування ними забезпечують захист працівників.

Додаткові електрозахисні засоби навіть у разі дотримання функціонального їх призначення не забезпечують надійного захисту працюючих і застосовуються одночасно з основними для підвищення рівня безпеки. У разі застосування основних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб для захисту працівників від напруги кроку достатньо використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів.

#### ***Система організаційно-технічних заходів і засобів***

Основні організаційно-технічні заходи і засоби щодо попередження електротравм регламентуються ДНАОП 0.00-0.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [12], за якими відповідальність за організацію безпечної експлуатації електроустановок покладється на власника.

Згідно з чинними вимогами власник повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електроустановок (далі — відповідальний за електрогосподарство);

- створити і укомплектувати відповідно до потреб електротехнічну службу;
- розробити і затвердити посадові інструкції працівників електротехнічної служби та інструкції з безпечного виконання робіт в електроустановках з урахуванням їх особливостей;
- створити на підприємстві такі умови, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування електроустановок, відповідно до чинних вимог, своєчасно здійснювали їх огляд, профілактичні, протиаварійні та приймально-здавальні випробування;
- забезпечити своєчасне навчання і перевірку знань працівників з питань електробезпеки.

### **6.2.3 Техніка безпеки при роботі з хімічними речовинами**

Хімічні речовини, що застосовуються в лабораторних і виробничих умовах, можна розділити на три групи:

- 1) отруйні,
- 2) вогнебезпечні та вибухонебезпечні,
- 3) викликають хімічні опіки.

Окрему групу утворюють речовини, що випромінюють заряджені частинки.

Такий поділ досить умовно, оскільки одна і та ж речовина може проявляти себе по-різному.

Горючі гази, пари легкозаймистих рідин і горючий пил за певних умов утворюють вибухонебезпечні суміші з повітрям. Голмежують нижній і верхній концентраційні межі вибуховості, поза якими суміші не є вибухонебезпечними. Ці межі змінюються залежно від потужності і характеристик джерела займання, температури і тиску суміші, напрямку поширення полум'я, змісту інертних речовин.

У цьому розділі наведено основні відомості про токсичність і вогнебезпечності найбільш уживаних хімічних речовин, а також основні заходи з охорони праці та надання першої допомоги.

Забезпечення нормальних умов в лабораторних і виробничих приміщеннях передбачається для усунення шкідливих газів, а також підтримки певної температури і вологості повітря.

Повітрообмін в приміщеннях передбачається для усунення шкідливих газів, а також підтримки певної температури і вологості повітря. У випадку видалення струйних газів об'єм свіжого повітря, що подається в приміщення, залежить від кількості виділяються в одиницю часу шкідливих газів і гранично допустимих концентрацій (див. п. 1). При підтримці певної температури і вологості в приміщенні повітрообмін залежить від кількості виділяючи в одиниць часу тепла і вологи.

В якості засобів індивідуального захисту крім зазначених у п. 5 протигазів, захисних окулярів, різного типу масок і екранів застосовуються також гумові рукавички, фартухи та ін.

У лабораторних і виробничих приміщеннях повинна бути аптечка з ліками та медичними засобами для надання першої допомоги.

При виконанні робіт з уготування і використання хімічних добавок необхідно дотримуватися правил техніки безпеки.

Нітрит натрію, нітрит калію повинні збергатися на індивідуальному складі. Забороняється їх зберігати в одному приміщенні з кислотами.

Забороняється палити і вести роботи з відкритим полум'ям (газова зварка, газопий різак та ін.) в приміщенні, де зберігається кристалічний нітрит натрію. Горючі продукти пророчені розчином цієї солі, легко займаються і важко піддаються гасінню. Для гасіння не можна застосовувати воду, а потрібно користуватися вогнегасником або піском.

У відділеннях приготування розчинів добавок і бетонної суміші, особливо при застосування нітриту натрію, нітриту кальцію, нітрит-

нітрату кальцію або нітрир-нітрат-хлориду кальцію, необхідно передбачати штучну вентиляцію.

На ємностях передбачених для зберігання чи приготування розчинів нітриту натрію, повинен бути попереджувальний напис «Отрута».

При укладанні бетонної суміші особливо увагу потрібно звертати на відповідний технічний стан електроприладів і дротів діючим правилам техніки безпеки внаслідок підвищеної електропровідності бетонної суміші з добавками прискорювачами твердіння.

Робітників зайнятих приготуванням розчинів добавок, необхідно спеціально інструктувати і забезпечувати гумовими чоботами та печатками, а також захисти окулярами.

Забороняється приймати їжу в приміщеннях, де зберігаються чи готуються розчини добавок. Необхідно остерігатися попадання розчинів добавок, особливо нітриту натрію, на шкіру і їжу.

До робіт по приготуванню водних розчинів добавок не можна допускати осіб, які мають ураження рук і обличчя, а нітриту натрію, окрім того, осіб молодших 16 років.

### **6.3. Заходи пожежної безпеки в цеху**

Нідрюватий бетон є негорючим і не вибухонебезпечним матеріалом.

Системи пожежної безпеки - це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежі та збитків від неї.

Пожежна безпека об'єкта - стан об'єкта, за якого з регламентованою імовірністю виключається можливість виникнення і розпиту пожежі та впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків. Об'єкти повинні мати системи пожежної безпеки, спрямовані на запобігання пожежі, дії на людей та матеріальні цінності небезпечних факторів пожежі, в тому числі

їх вторинних проявів. До таких факторів, належать: полум'я та іскри, підвищена температура навколишнього середовища, токсичні продукти горіння й термічного розкладу матеріалів і речовин, дим, знижена концентрація кисню.

Вторинними проявами небезпечних факторів пожежі вважаються: уламки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій; радіоактивні та токсичні речовини і матеріали, викинуті зі зруйнованих апаратів та установок; електричний струм, пов'язаний з переходом напруги на струмопровідні елементи будівельних конструкцій, апаратів, агрегатів внаслідок пошкодження ізоляції під дією високих температур; небезпечні фактори вибухів, пов'язаних з пожежами вогнегасні речовини.

Вибухопожежна безпека об'єкта забезпечується системами:

- попередження вибухів і пожеж;
- протипожежного та противибухового захисту;
- організаційно-технічних заходів.

**Система попередження вибухів і пожеж** має за мету не допустити виникнення вибухів і пожеж.

Вихідні положення системи попередження пожежі (вибухів):

- пожежа (вибух) можливі за наявності трьох чинників: горючої речовини, окиснювача і джерела запалювання;
- за відсутності будь-якого зі згаданих чинників, або обмеження його визначального параметра безпечною величиною, пожежа неможлива.

Горюча речовина і окиснювачу за певних умов утворять горюче (вибухонебезпечне) середовище. Тоді попередження пожеж (вибухів) буде зводитись до:

- попередження утворення горючого середовища;

або попередження виникнення у горючому середовищі або внесення в це середовище джерела запалювання.

**Система протипожежного та противибухового захисту** являє собою, так би мовити, другий ешелон забезпечення пожежної безпеки, яка починає діяти з виникненням перших ознак пожежі.

Система спрямована для створення умов обмеження розповсюдження і розвитку пожежі і вибухів за межі зони ризику при їх виникненні, на виявлення та ліквідацію пожежі, на захист людей та матеріальних цінностей від дії шкідливих та небезпечних факторів пожежі і вибухів.

Обмеження розповсюдження та розвитку пожежі, загалом, забезпечується: потрібного вогнестійкістю будівель та споруд; використанням негорючих матеріалів для внутрішнього оздоблення приміщень; використанням антипіренів і вогнегасних сумішей; улаштуванням протипожежних відстаней між будівлями та спорудами; улаштуванням протипожежних перешкод; встановленням граничнодопустимих за техніко-економічними розрахунками площ і поверхів виробничих будівель та поверховості будівель і споруд; улаштуванням протипожежних відсіків та секцій; улаштуванням аварійного відключення та перемикання установок та комунікацій; використанням засобів, що запобігають або обмежують розлив і розтікання пожежонебезпечної рідини під час пожежі; використанням вогнеперешкоджуючих пристроїв в устаткуванні; локалізацією пожежі вогнегасними речовинами, автоматичними установками пожежогасіння, а також шляхом утворення розривів горючого середовища випацюванням вибуховими речовинами, розбиранням (віддаленням) горючого матеріалу.

**Система організаційно-технічних заходів** є невід'ємною складовою загальної системи забезпечення пожежної безпеки об'єкта.

Складність та різноманітність завдань, пов'язаних з організацією забезпечення пожежної безпеки, зумовлюють необхідність безпосередньої участі в цьому процесі всіх державних, господарських, комерційних та громадських організацій, окремих громадян. Залежно від призначення та

функцій відповідні організації наділяються певними повноваженнями, а власники підприємств, орендарі та громадяни – обов'язками, розподіл яких встановлено Законом України «Про пожежну безпеку».

Проблеми пожежної безпеки на державному рівні належать до компетенції Кабінету Міністрів України (КМУ) і уповноваженого КМУ центрального органу виконавчої влади, яким з 2003 р. є Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків чорнобильської аварії (МНС). До складу цього органу входить Департамент пожежної безпеки.

Згідно з Законом України «Про пожежну безпеку» центральні органи виконавчої влади забезпечують:

- проведення єдиної політики в галузі пожежної безпеки;
- визначення основних напрямів розвитку науки й техніки, координацію державних, міжрегіональних, регіональних і наукових досліджень у галузі пожежної безпеки, керівництво відповідними науково-дослідними установами;
- розробку та затвердження державних стандартів, норм і правил пожежної безпеки;
- встановлення єдиної системи обліку пожеж;
- організацію навчання спеціалістів у галузі пожежної безпеки, керівництво пожежо-технічними навчальними закладами;
- оперативне управління силами і технічними засобами, які долучаються до ліквідації великих пожеж;
- координацію роботи щодо створення і випуску пожежної техніки та засобів протипожежного захисту, встановлення державного замовлення на їх випуск і постачання;
- співробітництво з органами пожежної безпеки інших держав.

## РОЗДІЛ 7

### ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджена математична модель корозії бетону в соляній кислоті. Дана модель отримана на основі опису кінетики гетерогенної реакції та виходячи з рівності потоку агресивної речовини і кількості оксиду кальцію, який пішов на його нейтралізацію.

Математична модель дозволяє прогнозувати глибину корозійних вражень бетону за часом. Дана модель підтверджена експериментальним дослідженням. Дослідження показали:

- достатню збіжність результатів за експериментом і за розробленою моделю.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що:

- із збільшенням В/Ц глибина корозійних руйнувань збільшується.

На глибину корозії має вплив склад бетону:

- при збільшенні дрібного заповнювача відносно до в'язучої речовини глибина корозії зростає.

Був встановлений вплив концентрації соляної кислоти на глибину корозійних втрат. Дослідження показала, що:

- зі збільшенням концентрації кислоти глибина корозійних руйнувань зростає.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Байрачний Б. І., Тульський Г. Г., Штефан Р. В., & Токарева І. А. Технічна електрохімія. Частина V. Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин: підручник. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. 271 с.
2. Плугін А.Д., Плугін А.М., Кагановський О.С., Градобосев О.В. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігаючих мінеральних в'язучих речовин та високоефективних композиційних матеріалів на їх основі. URL: [https://kort.edu.ua/wp-content/uploads/2020/06/tit\\_1\\_138.pdf](https://kort.edu.ua/wp-content/uploads/2020/06/tit_1_138.pdf) (дата звернення: 01.09.2024)
3. Дворкін Л.Й. Будівельні розчини: навч. посібник. Київ, Карасела, 2021. 222 с.
4. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гурка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник :Харків, ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с. ISBN 978-966-285-548-7
5. Валовой, О. І., Валовий М. О., & Сіяноко, В. Г. (2022). Захист металевих будівельних конструкцій від корозії (Doctoral dissertation, Крайовський національний університет).
6. В.Г. Поклонський, О.А. Фесенко, В.Г. Герасюк та ін. Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 2. Практичний посібник. Київ: Інтертехнологія, 2016. 83 с. ISBN 973-966-97486-0-7 [http://pb.nczu.edu.ua/images/pnp/MetodVudavnDiya1/12\\_.pdf](http://pb.nczu.edu.ua/images/pnp/MetodVudavnDiya1/12_.pdf)
7. ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови.
8. ДСТУ Б В. 2.7-187-2009/2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск»
9. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.

10. ДСТУ Б В. 2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови»

11. О.Г.Левченко, С.І.Полукаров, В.В.Защерний, Ю.О.Полукаров, О.В.Землянська Охорона праці та цивільний захист: підручник, Київ: Основа, 2019. 472 с.

12. ДБН А.3.2.2-2009 «Охорона праці та промислова безпека у будівництві». ЧПАОП 40.1-1.07-01 (ДНАОП 1.1.10-1.07-01) Правила експлуатації електрозахисних засобів:

13. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-161:2010. — (Чинний від 2011-09-01). — К.: Мінрегіонбуд України, — 102 с. — (Державні будівельні норми України)

14. М. В. Бик, С. І. Букет, Г. С. Засильєв. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс]: підручник для студ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/991b35bf-dc45-4053-b67a-557187e95891/content>

15. Л.І. Дворкін. Гідротехнічні бетони : навч. посібник. Київ : Карпати, 2023. 285 с.

[https://ep3.nuwm.edu.ua/26303/1/%D0%93%D0%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96\\_%D0%B7%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8\\_2023%20%D0%B7%D0%F0%D1%85.pdf](https://ep3.nuwm.edu.ua/26303/1/%D0%93%D0%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96_%D0%B7%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8_2023%20%D0%B7%D0%F0%D1%85.pdf)

16. Бондар Л. В., Горшеніна Т. О., & Гроздь, А. В. (2016). Улаштування та розрахунок систем електрохімічного захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів із збірних ребристих плит. ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2(47), 117-124.

17. Виробництво залізобетонних конструкцій і виробів: довідник/ під заг. редакцією Гоца В.І.-К.: Основа, 2019. — 464 с.

18. О. М. Пшінько, М. В. Савицький, А. М. Зінкевич. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій : навчальний посібник. Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2018. 220 с. ISBN 978-966-8471-86-5.

<https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi71/0051990.pdf>

19. М. Д. Бодечин, Я. М. Черненко, А. В. Іванченко, М. А. Слїйник. Технологія неорганічних речовин. Частина 3. Мінеральні добавки: навчальний посібник. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. 35+ с.

20. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилук П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник Київ: Основа, 2016. 568 с.

21. О.Г. Хоменко. Залізобетонні конструкції: навч. посібник. Глухів, 2017. 208 с.

22. ДСТУ Б-Е.2.6-145:2010. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії.

23. Блажівський К.І., Буклів Р.Л. Хімічна технологія оснотних солей і мінеральних добрив. Частина 1: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 220 с.

24. І.М. Астрелін, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Я. Лобойко. Технологія фосфорвмісних добрив, кислот і солей: Підручник Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХП»», 2011. 288 с.