

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

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

на тему: **«Дослідження впливу азотної 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

Берега Микола Михайлович

Керівник: Біда С.В.

Полтава 2024 року

## ВСТУП

Значна увага до проблеми довговічності бетону і залізобетону, яка диктується ведучою роллю цих матеріалів в сучасному будівництві, закономірна.

Передчасне руйнування залізобетонних конструкцій не тільки збільшує витрати на ремонт, відновлення, але й ставить не прості екологічні проблеми.

За останні роки прагнення максимально інтенсифікувати виробництво призвели до нехтування питаннями стійкості отриманих конструкцій. Інтенсифікація технологічного процесу за рахунок збільшення тонкості помолу цементу, збільшення температури теплової обробки, введення до складу в'язучого підвищеної кількості мінеральних добавок з метою економії цементу – все це не сприяє підвищенню якості і знижує опір бетону дії зовнішнього середовища.

В таких умовах всім аспектам довговічності конструкції повинна приділятися особлива увага.

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

В роботі : розглянуті види корозії бетону в агресивних середовищах; виявлені особливості взаємодії бетону залізобетонних конструкцій в середовищі мінеральних кислот; проаналізовані 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; проведена експериментальна перевірка отриманої залежності; досліджений вплив параметрів залежності на динаміку корозійних вражень; сформульовані висновки.

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Види корозії бетону

2+

3+

3+

2+

+

2+

2+

3+

3+

2+

4+

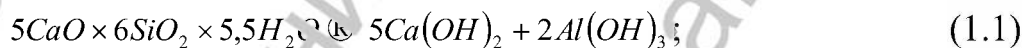
4+

2+

Використовують дві класифікації видів корозії бетону: за назвою агресивного середовища (класифікація В.В. Кінда) і за механізмом агресивного впливу середовища на матеріал.

Корозія бетону першого виду.

Відповідно до класифікації [12] до першого виду хімічної корозії бетону й залізобетону відносять корозію вилугування. Процес вилугування виникає в цементному камені, бетоні або залізобетоні при дії на них слабко мінералізованих вод. Вплив такого виду корозії зазнають наливні й ємкісні споруди, труби, греблі, мостові конструкції, причальні стінки морських і річкових портів, пади підвалів і т.п.). Вилугування виникає в цементному камені і бетоні при дії вод з малою тимчасовою жорсткістю, що призводить до фізико-хімічного розчинення продуктів гідратації цементу, а для конструкцій, які працюють під тиском такої вод спостерігається внос розчинених складових цементного каменю разом з водою, яка фільтрується крізь конструкції. Поки немає фільтрації, усі гідратні сполуки цементного каменю знаходяться в рівновазі із  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , розчинність якого досить висока і дорівнює 1,2 г  $\text{CaO}/\text{л}$ . У процесі фільтрації вапно вилугується і починається східчасте розчинення всіх гідратних сполук цементного каменю. Якщо 10% вапна виноситься, то міцність зменшується на 10%, якщо – 30%, то втрачається 30% міцності бетону і відбувається руйнування.



Відповідно агресивність води залежить від ступеня підвищення концентрації бікарбонат-іонів  $\text{HCO}_3^-$ . При зміні 1,05 моль/л  $\text{HCO}_3^-$  менше – вода є слабо агресивною стосовно бетону з водонепроникністю W4, при W6 – середньо вище прийнято вважати не агресивним.

Відомо, що головні компоненти цементного каменю (гідросилікати, гідроалюмінати, гідроферити, гідросульфалюмінати, гідроксид кальцію) є стабільними тільки в контакт з порцевою рідиною, в якій розчинено у певній концентрації вапно. При омиванні бетону водою або фільтрації води під тиском відбувається поступове вимивання вапна, тобто протікає процес вилугування. Такі втрати вапна відновлюються за рахунок східчастого гідролізу цементного каменю, але це призводить до його поступової деструкції. У першу чергу

руйнуються багато основні сполуки, виділяючи в розчин гідроксид кальцію. У зв'язку з цим знижується його концентрація в рідкій фазі і розчиненню піддаються вже менш основні гідратні сполуки цементу. Уже при величині  $\text{pH} < 10,17$  розчиняються основні продукти гідратації цементу.

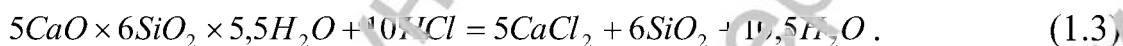
Швидкість корозії при вилугуванні залежить не тільки від швидкості розчинення складових частин цементного каменю, але й від хімічного складу води. Особливо важливий вміст у ній бікарбонату кальцію і вугільної кислоти. Так, якщо в контакт з бетоном знаходяться води з підвищеним вмістом бікарбонатів і карбонатів кальцію (жорсткі води), то накопичення карбонатів кальцію в капілярах призводить до підвищення щільності бетону і зменшенню швидкості фільтрації. У той же час м'які води розчиняють не тільки складові частини цементу, але навіть той карбонат, що утворився ще до контакту бетону з водою.

#### Корозія бетону другого виду.

За класифікацією другий вид корозії характеризується впливом на бетон розчинів кислот, лугів і магнезіальних солей. Корозія в мінеральних кислотах. Найбільш небезпечна і розповсюджена з них кислотна корозія, що виявляється при впливі на бетон розчинів мінеральних кислот типу  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  і органічних кислот: снігової, мурашиної, масляної, щавлевої та ін. Ці процеси характерні для підприємств хімічної і харчової промисловості, а також при дії стічних вод. Основним показником, характерним для цих середовищ є значення  $\text{pH}$  середовища тобто негативний логарифм концентрації водневих іонів:

- нейтральне середовище –  $\text{pH} (-\lg[\text{H}^+]) = 7$ ;  $[\text{H}^+] = 10^{-7}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ ;
- кисле середовище –  $\text{pH} = 1$ ;  $[\text{H}^+] = 10^{-1}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ ;
- лужне середовище –  $\text{pH} = 12$   $[\text{H}^+] = 10^{-12}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ .

Під впливом мінеральних кислот, наприклад, соляної, бетон розчиняється внаслідок утворення легкорозчинних сполук і швидко руйнується:



При  $pH < 4$  жоден зі звичайних видів цементу не витримує впливу кислих рідких середовищ. Звичайний портландцемент витримує вплив кислотої води із  $pH > 6$ , при цьому коефіцієнт фільтрації повинен складати менше 0,1 м/добу.

Отже, бетони на будь-яких видах цементу, що експлуатуються у водах із  $pH < 6,5$ , термодинамічно не стійкі, але по-різному. Кисла вода (2%-й розчин  $H_2SO_4$ ) виявилася агресивною для всіх мінералів цементного клинкеру, однак за 3-4 тижні найбільше зруйнувалися зразки з C3A, а зразки з C2S і C3S ще зберігали форму і деяку міцність. Знижена стійкість продуктів гідратації C3A спостерігається навіть у чистій воді. Експерименти показали, що 1 % розчин  $HCl$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  сильно роз'їдають бетон протягом декількох місяців. Фосфорна кислота менш агресивна щодо бетону через малу розчинність фосфату кальцію, що утворюється при цьому. Однак при підвищенні концентрації фосфорної кислоти до 5 % руйнування відбувається досить швидко.

Таким чином, продукти реакції цементного каменя з розчинами кислот з малозмінними концентраціями в основному розчиняються і виносяться потоком, а швидкість корозії визначається швидкістю підведення агресивного середовища і площею поверхні контакту його з бетоном.

Особливий різновид корозії другого виду – вуглекислотна корозія. Показником агресивності цього виду корозії є вміст у воді агресивного вуглекислого газу  $CO_2$ , який міститься в більшості ґрунтових і січких вод. Якщо його концентрація знаходиться в межах 10-40 мг/л, то для бетону з показником водонепроникності W4 це середовище є слабко агресивним, при концентрації більше 40 мг/л для бетону з W4 – середньо агресивності, але неагресивне для бетону з показником водонепроникності W8. Вугільна кислота дисоціює у воді в два етапи:



Частина вугільної кислоти, що утворюється шляхом розчинення вуглекислого газу, називається вільною. Вміст її у природних водах не перевищує 150 мг/л. Характер дії води, що містить цю кислоту, залежить від багатьох факторів:

- концентрації розчиненої вугільної кислоти;
- вмісту іонів кальцію і бікарбонат-іонів у воді;
- умов опрацювання конструкції (під напором, без напору)
- властивостей бетону (його щільності і виду цементу).

Якщо цемент був вже частково карбонізований, корозія в чистому вигляді виявляється в розчиненні карбонатної плівки на поверхні бетону:



При відповідних умовах може бути досягнутий стан рівноваги. Але якщо вода, в якій розчинена вільна кислота, рухається від бетону, вкритого карбонатною плівкою, і концентрації  $Ca^{2+}$  і  $HCO_3^-$  не збільшуються, то карбонатна плівка розчиняється безперешкодно, бо вугільна кислота є агресивною кислотою для бетону. У всіх випадках, коли вміст вугільної кислоти у воді перевищує рівноважний, у шарах цементного каменя не утворюється карбонат кальцію з вапна і кислоти. Карбонат кальцію може утворитися тільки при концентраціях кислоти нижче рівноважних. За даними І. Тільманса, вода, в якій вміст бікарбонатів-іонів складає більше 100 мг/л, практично не агресивна щодо бетону. Характер контакту вод, що містять вуглекислоту, теж сильно впливає на механізм процесів взаємодії. Коли вода не рухається або рухається повільно, то між нею і твердою фазою цементного каменя може встановитися рівновага, агресивна кислота частково зв'язується з

утворенням бікарбонату, а інша частина її є рівноважною, тобто неагресивною. Якщо ж вода рухається з великою швидкістю, то рівновага не встановлюється і корозія розвивається по стадіях до повного руйнування бетону. Вона може дещо сповільнитися тільки за рахунок зменшення площі контакту бетону з агресивним середовищем. При наявності фільтрації крізь тіло бетону води, що містить вуглекислоту, спостерігається специфічний характер руйнування. Спочатку фільтруюча вода за допомогою вуглекислоти розчиняє  $\text{CaCO}_3$  цементний камінь поступово насичується бікарбонатом (зона руйнування). Потім гідроксид кальцію з бікарбонатом утворює важкорозчинний карбонат кальцію, який заповнює мікротріщини і капіляри бетону, ущільнюючи його (зона захисту). Далі вода в наступній зоні вилугує складові частини цементу, що йде за механізмом корозії першого виду. Щоб захистити бетон від руйнування під впливом вуглекислотної середовища, застосовують поземистий цемент. Менш стійким в цих умовах є портландський цемент, швидше всього руйнується звичайний портландський.

досних

ість. До

менше, швидше, вода, винна,

високою відносною молекулярною масою

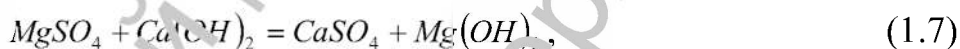
відносяться: олеїнова, стеаринова, пальмітинова і т.д. Для бетонів найбільш небезпечним є жири та рослинні олії, які при взаємодії з водою піддаються гідролізу, внаслідок чого утворюються гліцерин й жирні кислоти, які руйнують бетон.

З перерахованих органічних кислот найбільш агресивною є молочна кислота. Її розчин руйнує пуцоланові, шлакопортландцементи, звичайний портландцемент, а глиноземистий цемент стійкий тільки до  $\text{pH} = 4$ . Аналогічно діє і масляна кислота.

Оцтова кислота теж має агресивну дію. У 5 % розчині оцтової кислоти бетон руйнується вже через кілька місяців. Трохи стійкіший до її дії пуцолановий цемент і шлакопортландцемент, а глиноземистий стійкіше звичайного портландцементу тільки при концентрації кислоти до 0,5 %.

Слабкі розчини вуглевої кислоти не викликають помітних руйнувань бетону, а яблучна кислота більш агресивна і навіть у невеликих концентраціях може призвести до серйозних руйнувань. Розчини щавлевої кислоти незначно впливають на бетон, оскільки утворюють на поверхні і в порах бетону нерозчинний оксалат кальцію. Всі органічні кислоти з високими відносними молекулярними масами мають на явну виражену агресивну дію, сила якої збільшується зі збільшенням відносної молекулярної маси. Руйнування від дії цих кислот буває більш сильним, коли бетон експлуатується в повітряному, а не у водному середовищі. Дія цих кислот викликає значне зниження значення  $\text{pH}$  цементного каменя. Так, бензойна кислота знижує  $\text{pH}$  порової рідини з 12,5 до 11,95, малеїнова - до 9,5.

Магнезіальна корозія. Магнезіальна корозія цементного каменя є дуже специфічною. З основи цього процесу лежать наступні реакції:



У результаті цих реакцій в обох випадках утворюється важкорозчинний осад у вигляді  $Mg(OH)_2$  (його розчинність дорівнює 18,2 мг/л). Крім цього знижується рН порової рідини до 10, що створює сприятливі умови для розчинення гідролізу гідратних ново утворів цементного каменю. Підтримка величини рН відбувається за рахунок гідролізу і дифузії гідроксиду кальцію з глибших шарів, але вже при 0,26% концентрації  $MgSO_4$  весь гідроксид кальцію буде повністю витрачений. Експериментально встановлено, що чим більше агресивного розчину приходится на одиницю маси цементного каменя, тим більш низькою має бути концентрація  $MgSO_4$ , при якій цілком зникає  $Ca(OH)_2$ .

При дії розчинів  $MgSO_4$  треба враховувати специфічний вплив на цементний камінь не тільки іону магнію, але і сульфат-іонів. Він полягає в тому, що в поверхневих шарах бетону в основному протікають обмінні реакції іонів  $Mg^{2+}$  і  $OH^-$  з утворенням  $Mg(OH)_2$ , а в внутрішніх шарах відбувається сульфоалюмінатна або гіпсова корозія.

У 1-2% розчинах  $MgCl_2$  реакційна ємність порівняно невелика, і реакція між іонами магнію і  $OH^-$  звичайно здійснюється на зовнішній поверхні бетону, при цьому в порах бетону  $Mg(OH)_2$  утворює пухкий шар, що не є перешкодою для дифузії  $Ca(OH)_2$  до поверхні бетону. У зв'язку зі зниженням лужності в внутрішніх шарах бетону розвиваються процеси, характерні для корозії випуговування (т.зв. корозія першого виду). При цьому в першу чергу руйнуються багато основні гідросилікати і гідроалюмінати кальцію, а потім менш основні і т.д. Тому введення в цемент активних мінеральних добавок сприяє підвищенню його корозійної стійкості в розчинах  $Mg(OH)_2$  низької концентрації.

Якщо концентрація розчину  $Mg(OH)_2$  досягає 5%, то реакційна ємність системи стає настільки великою, що гідроксиду кальцію, який надходить із глибших шарів до поверхні бетону, уже недостатньо для своєчасної

нейтралізації  $MgCl_2$ . Тоді іони магнію дифундують углию бетону і руйнують усі гідратні новоутвори цементного каменю.

Корозія в лужних середовищах. Для бетону небезпечні розчини лугів з концентрацією  $> 50$  г/л. У результаті дії на бетон таких розчинів розчинність  $Ca(OH)_2$  значно знижується, але одночасно різко зростає розчинність кремнезему і полутвердих оксидів. Найбільш агресивно на бетон діють розчини  $NaOH$ , потім розчини  $KOH$ , аміаку і  $Na_2CO_3$  [29].

Найбільшу стійкість до розчинів лугів мають бетони на пуцоланових і шлакопортландцементях. Вибираючи склад бетонів для таких середовищ, необхідно приділяти увагу вибору заповнювачів. При високих концентраціях лугів найбільш ефективні щільні карбонатні породи.

## **1.2. Агресивні рідкі середовища, що діють на бетон залізобетонних конструкцій**

Агресивність зовнішнього середовища - умовне поняття, яке може бути конкретизовано тільки тоді, коли ми будемо розглядати і оцінювати взаємодію зовнішнього середовища і конкретного бетону. При нормувальній агресивності і оцінці ступеня агресивності слід завжди мати на увазі, по відношенню до якого матеріалу, яким бетоном ця агресивність визначається і оцінюється.

В різних країнах діють нормативні документи, що класифікують агресивні середовища за ступенем їх руйнівного впливу на бетон і залізобетон. При цьому прийняті норми, найбільш деталізовані, містять показники агресивності і оцінку її ступеня стосовно до бетонів різної проникності, виготовленим на різних цементах. При цьому вони диференційовані для бетону і залізобетону. У нормах прийняті три ступеня агресивності: слабка, середня і сильна. Потім вказуються межі вмісту агресивного агента в навколишньому середовищі, при якому дане середовище ставитися до того чи іншого ступеня агресивності по відношенню до бетону на певному цементі при певній його проникності. Для рідкого середовища враховуються також умови його контакту

з бетоном. Виходить досить складна система, в якій середовище, визначене як слабе, середнє або сильне, і є таким тільки до певного бетону, і в певних умовах. Це створює деякі труднощі при оцінці агресивності середовища, так як пов'язано з необхідністю одночасно з проектом конструкції пред'являти вимоги до бетону, обмежуючи вибір способу надання стійкості в даному середовищі.

У проекті стандарту ISO на класифікацію зовнішнього середовища, що впливає на бетон, прийнятий більш суворий підхід. У першій частині стандарту класифікується середовище за хімічним (корозійним) агресивним впливом на бетон. При цьому кожен клас характеризується видом агресивного з'єднання і його концентрацією в повітрі, ґрунті або воді. У другій частині стандарту класифікується зовнішнє середовище за кліматичним впливом. Вимоги до бетону, призначеного для роботи в середовищах того чи іншого класу повинні бути унормовані в іншому стандарті, де вказується можливість надання стійкості бетону засобами первинного захисту: вибором цементу, зниженням проникності бетону, введенням спеціальних добавок. У стандарті РЕВ такі засоби також перераховані, але без вказівки зв'язку з цим або іншою агресивністю середовища.

Найбільшу небезпеку для бетону і залізобетону представляють рідкі середовища, що постійно або періодично діють на конструкції, так як більшість корозійних процесів є хімічними реакціями, для проходження яких при звичайних температурах необхідне рідке середовище.

Про неминуче погіршення бетонних споруд при контакті з водою ще в 20-ті роки відомий дослідник в області цементу і бетону академік А. А. Байков писав, що всі бетонні споруди з портландцементу неминуче повинні піддаватися процесу вилуговування загна і після закінчення відомого часу втрачати всяку зв'язність і руйнуватися.

Питання корозії бетону в рідких середовищах з загальних позицій були розглянуті в [16]. В роботі підкреслювалося, що дія на бетон в великих

кількостях рідини завжди призводить до корозії. На кінетику корозії впливають наступні фактори:

- вид в'язучого, добавок і заповнювачів;
- хімічний і петрографічний склад в'язучого і заповнювачів;
- гранулометричний склад в'язучого і заповнювачів;
- спосіб приготування склад бетонної суміші та умови її твердіння;
- строки твердіння і впливу під час твердіння (карбонізації та ін);
- стан поверхні дотику бетону з рідиною,
- вид, хімічний склад (концентрація розчинів) і кількість рідини по відношенню до бетону;
- умови дії рідини з бетоном (швидкість руху рідини, наявність зміни або без зміни обсягу дотичної з бетоном рідини, постійна або змінна дія);
- механізм реакції, розчинення, обмін підставами, гідроліз, утворення і ріст кристалів, утворення комплексів, утворення згущених (пухких) структур або щільних плівок-оболонки;
- хімічні властивості продуктів реакції;
- різні зовнішні впливи (газове середовище, мікроорганізми);
- температура, її рівномірність, величина;
- тривалість впливу.

Цей перелік охоплює практично всі основні фактори, що впливають на корозійні процеси при контакті бетону з рідиною.

Надалі впливові фактори та викликані ними корозійні процеси були класифіковані В. М. Москвіним на три основних види по механізму корозійного процесу [14]. Класифікація процесів корозії на три види дозволяє згрупувати випадки до бетону і показати клас агресивності середовища на підставі уявлень про механізм корозійних процесів. До I виду корозії віднесені усі випадки дії води і водних розчинів, при яких відбувається розчинення і винос із структури бетону розчинених компонентів цементного каменю, що призводить до зниження його міцності.

До II типу віднесені процеси корозії в результаті хімічної взаємодії компонентів зовнішнього середовища з утворенням розчинних чи нерозчинних сполук, але не утворюють змінюючих структурних елементів у результаті корозійного процесу. Це в основному дію на бетон кислот і кислих солей. До III типу корозії відносяться процеси, при яких руйнування - зменшення міцності обумовлене виникненням внутрішніх напруг внаслідок утворення в цементному камені нових сполук із збільшенням об'єму твердої фази або кристалізації сполук з навколишнього водного розчину. Це найбільш складний і поширений вид корозії, часто зустрічається разом з I або II видами. На підставі класифікації корозійних процесів під керівництвом В. М. Москвіна вперше в світі були розроблені норми оцінки агресивності різних середовищ по відношенню до бетону і залізобетону.

Показники агресивності по I типу - визначення агресивності - дано у вигляді обмеження мінімальної бікарбонатної жорсткості, при якій вода має небезпечну для довговічності бетону розчинювальну здатність. Такою межею прийнято вміст іона  $\text{HCO}_3^-$  (не більш 1,05 мг-екв/л). Вода, що має жорсткість менше 1,05 мг-екв/л або 3 град при водопрохідності бетону W4 віднесена до слабоагресивного середовища. При підвищенні марки бетону по водонепроникності до W6 і більше вода за цим показником вважається неагресивною. Дійсно, досвід довготривалих досліджень в натурних умовах показує, що щільні бетони на портландцементі при відсутності інших впливів (заморожування і відтавання, стирання) витримують тривалі терміни без руйнування, при контакті з природними м'якими водами, наприклад водами від танення снігу, дощовими. За даними про стан бетону гребель в Норвегії, розташованих на гірських річках, вода яких має мінімальну жорсткість, знос бетону водозливних граней не перевищував 1 мм в рік - це в умовах постійного видалення поверхневого пошкодженого шару. Ми спостерігали збереження поверхневого шару (видалення тільки поверхневої шліпки цементного каменю) бетону водопропускних труб на Кольському півострові після експлуатації

протягом 25 років, при дії вод від танення снігу. За даними роботи [14], після 25 років випробувань у потоці м'якої води зразків бетону на портландцементі глибина їх пошкоджень не перевищував 2 мм, в той час як зразки з більшою проникністю були пошкоджені на 5-6 мм.

Встановлена норма щодо жорсткості води є лише нагадуванням про необхідність при контакті бетону з м'якими водами звертати увагу на надання бетону гарантованої зниженої проникності з тим щоб така проникність бетону була не тільки в зразках, але і в спорудженні.

Сприятливий вплив жорсткості води - вміст у ній бікарбонатів, насамперед, кальцію, потім магнезій проявляється, як це було встановлено дослідженнями, проведеними останнім часом, і при вмісті у воді сульфатів найбільш поширених агресивних по відношенню до бетону компонентів. У присутності бікарбонатів створені на поверхні бетону важкорозчинні плівки і такі тільки знижують агресивну дію, перешкоджаючи проникненню вмісту сульфатів-іонів в глиб бетону, що показники агресивності за вмістом сульфатів змогли бути підвищені в нормах в два рази для вод з бікарбонатної лужністю від 3 до 6 мг-екв/л і в 4 рази для вод з бікарбонатної лужністю понад 6 мг-екв/л.

Наступними показниками що характеризують агресивність води, є концентрація водневих іонів - рН і вміст вуглекислоти. Водневий показник характеризує концентрацію дисоційованих кислот. Бетон на звичайних цементах піддається дії будь-якої кислоти, але агресивність кислот залежить від їх концентрації і від розчинності їх кальцієвих солей, так як утворюється в процесі корозії плівка продуктів корозії буде по-різному гальмувати процес корозії, створюючи перешкоду проникненню (дифузії) кислоти в глиб бетону. Кінетика цих процесів при відомих умовах контакту кислоти з бетоном піддається розрахунку. Тому, спираючись на експериментальні дані, можливо розрахувати глибину руйнування в заданий термін експлуатації. Крім того, при повному зануренні бетону в кислоту в умовах збереження поверхневого шару

продуктів реакції відомі закономірності процесу та її особливості, які полягають у різкій межі фронту реакції і малій ширині реакційної зони.

Показник рН є десятковим логарифмом з оберненим знаком фактичної концентрації водневих іонів кислоти, тому зниження показника на одиinicю свідчить про зміну концентрації у 10 разів. Особливо слід мати на увазі недостатність показника рН для оцінки агресивності важкодисоціюючих кислот (багатьох органічних) і при високих концентраціях кислоти. У інтервалі концентрацій, при якому середовище відноситься до сильноагресивних, наприклад для бетону водонепроникністю W4 ступінь агресивності і, відповідно, способи захисту будуть суттєво змінюватися в інтервалі показників рН від 6 до 4. Виникали дискусії при визначенні нормативів по оцінці ступеня агресивності вуглекислоти, розчиненої у воді. На підставі фізико-хімічних досліджень рівноваги в системі  $\text{CaCO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$  було встановлено, що агресивною є лише частина вільної вуглекислоти, що міститься в розчині. Розрахунковий вміст вуглекислоти в кількох десятках міліграмів у літрі незначно збільшує розчинувальна дія води, яка і без  $\text{CO}_2$  може розчинити близько 1200 мг гідроксиду кальцію (у розрахунку на  $\text{CaO}$ ). Мабуть, підвищена агресивність слабких розчинів визначається їх розчинною дією на плівку карбонату кальцію, що утворюється на поверхні бетону і підвищує стійкість бетону не тільки до розчиненої дії води, але і до дії розчинених солей, зокрема, сульфатів, про що було сказано вище.

Аналогічно дії кислот за таким же механізмом обмінних реакцій з гідроксидом, силікатів і алюмінатами кальцію діють і солі кислот при катіонах магнію та амонію. У першому випадку корозійна дія зумовлена тим, що незалежно від аніону утворюється важко розчинний гідроксид магнію, що надає процесу незворотний характер. Залежно від аніону утворюються розчинні солі кальцію (хлорид кальцію, нітрат кальцію та ін.), які можуть бути агресивними по відношенню до арматури або додатково впливати на цементний камінь, утворюючи нові сполуки, наприклад хлор - алюмінат

кальцію і т. п. При контакті з амонійними солями в результаті взаємодії з лугами або з гідроксидом кальцію утворюється гідроксид амонію, який йде в сфери реакції через летючість аміаку, що також обумовлює її незворотність і підвищену агресивність. У нормах поки не відображено більш детальний вплив виду катіона на ступінь агресивності солевих розчинів, але проведені дослідження в цій області дозволяють запропонувати орієнтовні коефіцієнти, що враховують вплив катіона на ступінь агресивності хоча б сульфатних розчинів [23]. Якщо конструкція тільки частково занурена в агресивну воду, можливий капілярний підсос і кристалізація солей в бетоні конструкції, розташованій вище рівня ґрунтових або поверхневих вод. У цьому випадку розчинені у воді солі можуть виявитися небезпечними і привести до появи внутрішніх напружень в бетоні. Інтенсивність корозії кристалізації залежить від капілярних властивостей бетону і умов випаровування води - температури повітря, сили вітру і т. ін. Понад 10 г/л розчинених солей вже можуть дати небажані наслідки у вигляді висолів, а в подальшому і лущення поверхні бетону.

Наявність норм не виключає необхідності ретельного обліку всіх умов майбутньої експлуатації споруд: прогнозу можливих змін рівня ґрунтових вод, їх складу, обліку особливостей конструкції, її тонкостітності або масивності, чутливості до пошкодження захисного шару в арматурі, вимог до гідроізоляції, якщо це підземна огорожувальна конструкція, і т. д. Для підземних, підводних і напірних гідротехнічних споруд має значення і величина гідростатичного напору води. Залежність показників агресивності від величини напору встановити важко. Конструкція, що контактує з агресивним рідким середовищем, повинна бути виконана з бетону, непроникного для води в умовах експлуатації. Якщо ж вода буде проникати всередину бетону, то в принципі ступінь її агресивності буде залишатися таким же, як і для води ненапірної, все буде залежати від кількості фільтрувочної води.

Але, бетон - пористий матеріал з досить неоднорідною поровою структури. При цьому на суруктурну неоднорідність цементного каменю накладаються фактори неоднорідності макроструктури залізобетонної конструкції, обумовлені технологією виготовлення конструкції та умов її роботи. Каверни неоднорідного ущільнення, мікротріщини усадочного або силового походження - неминучі супутники технології виготовлення залізобетонних конструкцій. Тому надання водонепроникності конструкції, що знаходиться під одностороннім гідростатичним тиском - не проста справа і, як правило, в таких випадках неминуче вимагує нанесення гідроізоляційного покриття, яке може і повинно виконувати подвійну роль - захищати конструкцію від просочування через неї води і захищати бетон конструкції від її агресивної дії.

Оцінка ступеня агресивності впливу, хоча б на триступеневою шкалою, звичайно, умовна, і слід мати на увазі, що ступінь агресивності змінюється не стрибкоподібно, а безперервно. Тому при визначенні ступеня агресивності середовища, що характеризується близьким до граничного значенням концентрації агресивного компонента, необхідно враховувати й інші обставини, як, наприклад, ступінь відповідальності конструкції, наближеність оцінки термінів служби, надійність прогнозу зміни складу середовища та вмісту в ній агресивних компонентів, температурні умови, технічний рівень будівництва і ін.

Для сульфатної агресивності з метою спрощення нормативних показників вплив щільності проникності бетону враховується постійними коефіцієнтами, наприклад при переході від марки бетону з водонепроникності W4 до марки W6 показники вмісту сульфат-іонів множаться на коефіцієнт 1,3, а при марці W8 на 1,7.

Складним є питання про оцінку ступеня агресивності рідких середовищ, що містять органічні речовини. Перелік органічних речовин дуже великий і повна класифікація скрутна. Можна чітко відокремити водні розчини органічних кислот, агресивність яких визначається розчинністю їх кальцієвих

солей. Так, оцтова, лимонна, молочна кислоти сильноагресивні, а шавлева слабоагресивна. Запропоновано розділити органічні кислоти на три групи залежно від розчинності з кальцієвих солей: при розчинності солей понад 1 г/л розчини кислот сильноагресивні, а при розчинності менше 0,002 г/л слабоагресивні. При проміжній розчинності кальцієвої солі - понад 0,002 до 2 г/л - розчини органічних кислот середньоагресивні.

Великий об'єм залізобетону укладається в ємності, в тому числі для сирої нафти і мазуту. Агресивність цих продуктів визначається вмістом в них розчинених сполук сірки і ступенем обводненості. Сірчиста нафта і сірчистий мазут середньоагресивні по відношенню до бетону з маркою по водонепроникності W4, але при підвищенні ступеня водонепроникності до марок W6 і W8 ступінь агресивності істотно падає до слабоагресивної.

Слід мати на увазі можливість специфічних корозійних процесів при дії деяких агресивних органічних речовин. Наприклад, хлорбутадієн - мономер, при вбиранні в пористий простір бетону починає полімеризуватися із збільшенням об'єму, що створює внутрішні напруження в тілі бетону і призводить до його руйнування, зовні за механізмом III виду корозії.

Додаткові вимоги до первинного захисту залізобетонних конструкцій (область застосування арматури зі сталей різних марок, ширина розкриття тріщин, товщина захисного шару) містяться в СНиП 2.03.11-85 і розглядаються при проектуванні залізобетонних конструкцій.

### **1.3. Деякі особливості корозії бетону в сильних мінеральних кислотах**

На підставі теоретичних і експериментальних робіт, виконаних в середині 70-х років по дослідженню механізму процесів корозії бетону в кислих середовищах, запропонована дифузійна модель корозії бетону, ґрунтована на вивченні процесів, при яких хімічні реакції між іонами, що поступають у бетон, і складовими цементного каменю протікають з утворенням нерозчинного продукту корозії, - шару матеріалу, що складається в основному з гідросилікату

і залежно від розчинності кальцієвих солей досліджуваних кислот – кристалів солей кальція.

Особливістю корозії бетону в кислих середовищах є чітке розділення межі між зруйнованими і неушкодженими ділянками [18]. Зростання товщини шару продуктів корозії в часі (глибини руйнування бетону) пропорційне квадратному кореню з часу агресивної дії і концентрації кислоти в розчині [11, 26]. Ця залежність дозволяє досить точно прогнозувати довговічність бетону в конкретних умовах дії рідких кислих середовищ на конструкції.

Для конструкцій, що експлуатуються в кислих агресивних середовищах, розраховано глибину корозійної поразки бетону, що дозволяю у ряді випадків відмовитися від вторинного захисту бетону [13, 12, 24].

Для розрахунку глибини руйнування бетону в кислих середовищах застосовується також дифузійна модель [1]. Разом із загальною моделлю, по якій глибина корозії пропорційна квадратному кореню з часу агресивної дії і концентрації іонів  $H^+$  у воді, розроблена приватна модель поведінки цементних матеріалів при дії на бетон агресивної вуглекислоти. Менша, ніж в інших випадках дії кислих середовищ, швидкість корозії бетону в розчинах вуглекислоти пов'язана з низьким коефіцієнтом дифузійної проникності внаслідок утворення важкорозчинного  $CaCO_3$  в зоні нейтралізації.

Відзначається, що в азбестоцементі кислотна корозія розвивається значно швидше, ніж у бетоні.

У дослідженнях, присвячених корозії бетону під впливом розчинів, що містять агресивну вуглекислоту, на підставі порівняння різних результатів дана формула розрахунку глибини корозійної поразки бетону [25]. Розрахунок глибини руйнування бетону в рідкому середовищі з концентрацією агресивної вуглекислоти близько 100 мг/л показав руйнування за 30 років на глибину 11 мм, за 50 років – 15 мм.

Дифузійна модель процесу корозії цементного каменю під впливом кислих середовищ може базуватись на дослідженні швидкості розчинення

цементного каменю в розчинах агресивної вуглекислоти з урахуванням швидкості дифузії реагуючих речовин через захисний шар гелевидного  $\text{SiO}_2$ , що утворюється на поверхні кородованого зразка.

Коефіцієнт дифузії компонентів цементного каменю в поверхневому шарі бетону з В/Ц=0,5 дорівнює  $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ . У нерухомих зонах, де гелевидний шар з поверхні бетону не видаляється, міра руйнування бетону невелика. При коефіцієнті проникності бетону менше  $10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$  і рН води 4-7 ушкоджень практично не відбувається. У потоці води гелевидний шар може руйнуватися, що прискорює руйнування цементного каменю. При вмісті у воді, що повільно тече, 110 мг/л агресивної вуглекислоти за 100 років експлуатації глибина корозії бетону може перевищити 30 мм, особливо у бетоні на заповнювачі з вапняку.

Порівняльні випробування стійкості бетону в кислих середовищах спрямовані на класифікацію середовищ за мірою їх агресивності у бетоні. Зокрема, зразки бетону після 28 діб зв'язання у воді піддавали дії водних розчинів  $\text{H}_2\text{SO}_4$  концентрацією 0,1; 1 та 5% в барабані, що обертається, з поліетилену за період 1,5 року. Випробування в 0,1%-вому розчині  $\text{H}_2\text{SO}_4$  практично не показали зниження міцності і маси зразків в порівнянні із зразками у віці 28 діб. У 1-го і 5%-вих розчинах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  спостерігається зниження маси і міцності зразків [26]. На підставі експериментальних даних складено рівняння для розрахунку кількості кислоти, поглиненої стіницею поверхні бетонних зразків. Користуючись приведеним рівнянням, можна розрахувати глибину проникнення кислоти у бетон і зниження міцності при тривалій експлуатації конструкцій, наприклад 20 років. На думку польських фахівців, за значенням рН кислот не можна оцінювати ступінь агресивності середовища по відношенню до цементного каменю. Пропонується в якості досить достовірного показника агресивності використати концентрацію кислоти – кислотність рідкого середовища. На підставі досліджень з використанням широкої гами кислот зроблено висновок про універсальність

цього показника для визначення агресивності кислот середовищ по відношенню до цементного розчину.

Вивчення механізму корозії бетону у воді, що містить кислоти, агресивну вуглекислоту, солі амонію, магнію і сульфатів, підтверджує необхідність застосування спеціального захисту бетону. Значна корозія спостерігається при  $\text{pH} < 4,5$  і концентрації,  $\text{мг/л}$ :  $\text{CO}_2$  агр і  $\text{NH}_4^+ > 60$ ,  $\text{Mg}^{2+} > 1500$ ,  $\text{SO}_4^{2-} > 3000$ .

У Франції 2,5 роки досліджували стійкість цементних розчинів складу 1:3 з В/Ц=0,5 і 0,7 виготовлених з портландцементу і шлакопортландцементу в розчинах солей амонію (кисле середовище). Зразки  $4 \times 4 \times 16$  см після 24 днів твердіння у вологих умовах занурювали в розчини:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (з концентрацією іонів  $\text{NH}_4^+$  - 60, 120, 360 і 10600  $\text{мг/л}$ ) при температурі 20 і 50°  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ( $\text{NH}_4^+$ -180  $\text{мг/л}$ ),  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ( $\text{NH}_4^+$ -180 і 360  $\text{мг/л}$ ). Зразки в розчинах хлориду і сульфату амонію випробовували при 20°С. При концентрації іонів  $\text{NH}_4^+ \geq 120$   $\text{мг/л}$  стійкість зразків на основі шлакопортландцементу помітно знизилася, тоді як стійкість зразків на основі портландцементу при концентрації  $\text{NH}_4^+ > 60$   $\text{мг/л}$  змінилася мало. Зниження В/Ц з 0,7 до 0,5 привело до помітного підвищення стійкості бетону. При підвищенні температури розчинів нітрату амонію від 20 до 50°С спостерігається зниження його стійкості.

Питанням підвищення стійкості бетону в кислотних середовищах за рахунок застосування різних матеріалів при його виготовленні присвячений ряд досліджень.

У Японії в умовах м. Осака, де дощова вода за рахунок великого виділення вихлещних газів має  $\text{pH}=3,6$ , запропоновано для захисту бетону від корозії і уповільнення тієї, що карбонізує вводити у бетон нерозчинні похідні гліколевого ефіру. Ця добавка зменшує усадку бетону і перешкоджає утворенню тріщин; додатково у бетонну суміш вводять піногасники, зменшуючи повітревтягування. Передбачається також вводити аміноспирти, які адсорбують діоксин вуглець і хлориди і підвищують довговічність бетону.

При  $\text{pH}=3,6$  застосування повітрявтягуючих добавок практично не робить впливу на кислотостійкість бетону. Збільшення витрати цементу сприятливо впливає на стійкість цементних матеріалів. Розчини на шлакопортландцементі більш стійкі, ніж на портландцементі [16].

При  $\text{pH}=3,67$  бетон на шлакопортландцементі з вмістом шлаку 50 і 60% має задовільну кислотостійкість впродовж тривалого часу (витрата цементу  $400 \text{ кг/м}^3$ ), тоді як бетон із вмістом шлакопортландцементу  $300 \text{ кг/м}^3$  руйнується.

Стан бетону в кислих середовищах рекомендується контролювати по щільності і величині динамічного модуля пружності.

Введення 10 % епоксидної смоли в цементні розчини, призначені для експлуатації в розчинах 5%-вої сіткової, молочної кислоти і сульфату натрію, не підвищує їх стійкості; відмічено лише незначне збільшення стійкості цементних розчинів в середовищі молочної кислоти.

При введенні у бетонну суміш тонкодисперсного кремнезему проникність бетону і вміст в ній вільного вапна знижуються. Бетон з цією добавкою має підвищену стійкість в розчинах нітрату і амонію, сульфату натрію. Помітного збільшення стійкості бетону в кислих середовищах не спостерігається.

Долідження бетону з добавками 8-17% тонкодисперсного кремнезему і 0,8-1,2% суперпластифікатора (на основі продукту конденсації нафтаїну, сульфокислоти і формальдегіду) і покриттів на основі бутадієнстирильного латексу і оксипропилметилцелюлози в розчині сірчаної кислоти з  $\text{pH}=1,37-1,39$  показало підвищення стійкості бетону.

Ефективніше в кислих середовищах захисних покриттів.

Експериментальне вивчення довговічності бетону з добавками, що утворюють плівки або просочують бетон, в 10%-вому розчині азотної кислоти показало зменшення втрати маси зразків в 2-3 рази і збільшення їх водонепроникності.

На швидкість корозії бетону в кислих середовищах, окрім характеристик цементного каменю, певний вплив робить вид заповнювача. Зокрема в розчинах оцтової кислоти помітні збільшення корозійної стійкості цементних складів заповнювачі розташовуються таким чином: кварцовий пісок, карбонат кальцію, природний редіагоніт, гранульований шлак, портландцементний клінкер [8].

В принципі бетон на портландцементі і його різновиди в кислих середовищах не стійкі, проте ведуться пошуки способів розрахунку інтенсивності корозії в таких середовищах. В результаті розрахунків вдається встановити межі застосування бетону, ті значення рН або концентрації кислоти, при яких можлива експлуатація бетонних виробів і конструкцій.

Заміна одного портландцементу іншим, використання різних добавок, що не змінюють хімічну природу портландцементного каменю, не дозволяють значно розширити сферу застосування бетону в кислих середовищах, проте навіть при невеликому переміщенні меж агресивності можна отримати значний економічний ефект.

#### **1.4. Узагальнена математична модель корозії бетону в агресивних рідких середовищах**

Основні положення математичного моделювання процесу деструкції капілярно-пористих тіл стосовно до корозії бетону в агресивних рідких середовищах, а також результати їх експериментальної перевірки відомі [22-24].

Узагальнена математична модель дозволяє також врахувати вплив відкладень в порах бетону на кінетику корозії. Розглянемо елементарний об'єм бетону у вигляді прямокутної призми з поперечником  $1 \times 1$ , вирізаній перпендикулярно до зовнішньої поверхні конструкції (див. малюнок). Припустимо, що агресивне середовище деякий час впливало на бетон, внаслідок чого утворився буферний шар глибиною  $L$ , в якому всі розчинні компоненти твердої фази розчинилися. Пористість на відріжку  $0 < x = L$  значно

збільшилася порівняно з пористістю первинної структури  $\Pi_1$  і прийняла значення  $\Pi_2$ .

Елементарний об'єм можна розділити на три однорідні за структурою галузі, в кожній з яких протікають характерні процеси. В області 3, де пористість дорівнює  $\Pi_1$ , частина твердого скелета (речовина 1) розчиняється в коровій рідині, відбувається дифузійне перенесення цих компонентів до зовнішньої поверхні. У квазістаціонарному режимі кількість речовин 1, що проходить у другій області, дорівнює кількості цієї ж речовини дифундуючому з області 3, тому за першим законом Фіка

$$q_1^{(3)} = q_1^{(2)} = \frac{\Pi_2 D_1 C_{100}}{L + l - x_1} \quad (1.9)$$

де  $q_i^{(m)}$  - потік  $i$ -тої речовини ( $i=1, 2, 3$ ) в області  $m$  ( $m=1, 2, 3$ );

$D_1$  і  $C_{100}$  - коефіцієнт дифузії і розчинність  $i$ -тої речовини, відповідно;

$C_{ik}$  - концентрація  $i$ -ї речовини в  $k$ -тій точці ( $k=0, 1, 2$ ).

В області 1 із зовнішнього середовища дифундують іони агресивної речовини 2. В зоні зустрічі дифузійних потоків речовин 1 і 2 відбувається їх хімічна взаємодія і утворюються продукти реакції (речовина 3). Ширина зони хімічної реакції відносно невелика (перетин 1 при  $x=x_1$ ) [23-21]. Якщо в області 1 відклалися малорозчинні солі речовини 3, то пористість зменшується до значення  $\Pi_2$  причому

$$\Pi_3 = w\Pi_2 \quad (1.10)$$

де  $w$  - коефіцієнт залишкової пористості (теоретично  $0 \leq w \leq 1$ ).

Для масопереносу агресивної речовини можна записати:

$$a_3^{(1)} = \frac{\mu D_2 C_{20}}{x_1} \quad (1.11)$$

Знаходяться в розчині іони фази 3 дифундують до зовнішньої поверхні з глиб бетону, тому в квазистаціонарному режимі для сумарного влзоду речовини 3 із зони реакції отримаємо

$$q_3^{(1+2)} = \frac{D_3 C_{31}}{x_1} (\mu + \varepsilon) \quad (1.12)$$

де  $\varepsilon < 1$  - коефіцієнт, що враховує дифузійне відведення речовини 3 вглиб бетону.

Рис. 1. Схема масоперенесу речовин

1-3 — однорідні області ;  $z$  — глибина агресивного фронту ;  $L$  — глибина впажель (буферний шар);  $x_1$  — координата перетину в якій протікає хімічний вплив речовин 1 і 2;  $x_2$  — координата середину до якої відбувається перенесення новоутворень із зони хімічної реакції в глиб бетону.

Рівняння (1.9), (1.10), (1.11) пов'язати між собою. Оскільки агресивний розчин повністю нейтралізується розчинними компонентами твердої фази, отримаємо

$$q_2^{(1)} = \mu q_1^{(2)} \quad (1.13)$$

де  $\mu$  - стехіометричний коефіцієнт хімічної реакції.

Крім того, з аналізу балансу маси укладаємо, що в осад може випасти тільки ту кількість речовин 3, яке не відводиться внаслідок дифузії:

$$p = q_1^{(2)} + q_2^{(1)} - q_3^{(1+2)}. \quad (1.14)$$

Якщо концентрація розчину новоутворень  $C_{31} < C_{100}$ , то осаду не утворюється, і  $p=0$ ,  $w=1$ ; при  $C_{100} < C_{31} < C_{3m}$ , де  $C_{3m}$  - деяка характерна концентрація осаду утворюється в дуже малій кількості, тому допускаємо що  $p \approx 0$ .

Як показують розрахунки за М. Фольмеру, ймовірність утворення нової фази зростає дуже швидко із зростанням ступеня переміщення розчину, тому деяким наближенням приймаємо, що при  $C_{31} > C_{3m}$  зародки нової фази не виникають, а при  $C_{31} = C_{3m}$  може утворитися то кількість новоутворень, яке забезпечується дифузійним підведенням речовин 1 і 2, причому  $C_{31} > C_{3m}$  практично не досягається з-за швидкого зростання швидкості виділення твердої фази 3

З умови  $C_{31} = C_{3m}$  визначається максимальна кількість речовин 3, яка відводиться з зони хімічної реакції внаслідок дифузії:

$$q_{3m}^{(1+2)} = \frac{P_2 D_3 C_{3m}}{x_1} (\omega + \varepsilon) \quad (1.15)$$

Для переходу від квазістационарного режиму до нестационарного слід вивчити, як змінюється глибина ураження  $L$  і коефіцієнт залишкової пористості  $w$  в часі. При розчиненні вихідної структури кількість речовини 1, що викликає поглиблення зони ураження на  $dL$ , відповідає кількості речовини, відведеним з третьої зони внаслідок дифузії. У зв'язку з цим диференціальне рівняння поглиблення зони ураження прийме вигляд:

$$a_2 \dot{a}^* = mdL \quad (1.16)$$

Крім того, якщо за час  $dt$  на відрізок  $ax_1$  випаде деяка кількість осаду, то пористість елементарного об'єму на відрізок  $dx_1$  зменшиться, що враховується коефіцієнтом  $w$ . Вважаючи, що кількість осаду, що випав в одиницю часу в результаті хімічної реакції між речовинами 1 і 2, дорівнює  $r$ , отримаємо диференціальне рівняння випадання осаду:

$$p dt = H_2 (1 - w) \gamma_2 dx_2 \quad (1.17)$$

де  $\gamma_2$  - щільність новоутворень

При рішенні диференціальних рівнянь (1.16) і (1.17), а також рівнянь, що характеризують дифузійний перенос речовин 1, 2, 3, для визначення глибини ураження  $L(t)$  катіодно-пористого тіла при впливі агресивних рідких середовищ була сформульована формула

$$L_j = \sqrt{2 a_j L t + l^2} - l \quad (1.18)$$

де  $l$  - глибина агресивного фронту (див. малюнок), що залежить від швидкості розчинення вихідної фази, яка вимірюється експериментально;  $a_j$  - агресивність зовнішнього середовища до даного пористого матеріалу, що визначається як швидкість процесу корозії  $i$ -го виду [15] в початковий момент часу, коли вона максимальна

$$a_j = \frac{a_{r_1}}{a_w}|_{t=0} = \frac{k_j}{2l} \quad (1.19)$$

Константу швидкості корозії  $k$  і коефіцієнт щільшової пористості  $w$  також знаходять із згаданих рівнянь. Якщо осад утворюється, то  $w < 1$ , при цьому  $(1-w)$  наближено дорівнюватиме:

$$(1 - \omega) = \omega_0 \left( 1 - \frac{C_{2m}}{C_{20}} \right)$$

$$\omega_0 = \frac{m(1 + \mu)}{P_2 \gamma_2} \quad (1.20)$$

$k_1$  буде дорівнювати :

- корозія першого виду ( $w=1$ )

$$k_1 = 2P_2 D_1 C_{1\infty} / m ,$$

- корозія другого виду :

без утворення осаду ( $w=1$ ) :  $k_2 = \frac{2P_2 D_2}{m} \left[ \frac{C_{20}}{\mu} + \frac{D_1 C_{1\infty}}{D_2} \right] ,$

з утворенням осаду ( $1 > w = w_k$ ) :  $k_2^* \approx \frac{2P_2 D_2}{m} \frac{\omega C_{20}}{\mu}$

- корозія третього виду ( $w = w_k$ )

$$k_3 \approx \frac{2P_2 D_2}{m} \frac{\omega_k C_{2k}}{\mu} ,$$

де-  $w_k$  критичне значення коефіцієнта залишкової пористості, при якому настає деструкція буферного шару пористого тіла внаслідок зростання у ньому кристалів новоутворень;

$C_{2k}$  - відповідне значення концентрації агресивного розчину.

При корозії третього виду товщина буферного шару  $L$  практично дуже мала, так як він руйнується незабаром після утворення. Вважаючи що  $J \gg L$ , (1.18) знаходимо

$$L = c_1 t \quad (1.21)$$

Аналітичну формулу можна отримати і для корозії першого і другого видів, якщо буферний шар з різних причин руйнується (сильні потоки води, механічний знос і т. д.)

Аналіз рівняння (1.18) показує, що всі види деструкції пористих тіл в агресивних рідких середовищах описуються одним рівнянням  $L(t)$ . Мабуть, єдине побудова математичних є наслідком спільності фізико-хімічних процесів при різних видах корозії. Універсальність формул (1.18) і (1.22) полтава в наступному. Агресивність середовища  $a_j$  має розмірність швидкості корозії, що відповідає її фізичному змісту; крім того, при різних значеннях агресивності різних корозійно-активних середовищ глибина ураження пористого тіла буде однаковою при заданому терміні впливу середовищ.

У таблиці наведені розрахункові формули, що дозволяють визначити глибину корозійного ураження капілярно-пористого тіла типу бетону після будь-якої його експлуатації в умовах впливу агресивних рідких середовищ. Формули справедливі і при наявності у капілярно-пористій структурі цементного каменю кохєстивних потоків зі швидкістю  $u$ . У цьому випадку глибину агресивного фронту слід обчислювати за формулою

$$L_u = l(1 - 0,5P_e), \quad (1.22)$$

де  $P_e$  - число Пекле ( $P_e = ul/D$ ).

Константа швидкості корозії  $k_j$  може бути визначена експериментально. Для цього заміряють глибину корозійного ураження  $L$  зразка бетону після витримування його протягом певного часу в агресивному розчині, потім за формулами (1.18) і (1.19) визначають [24, 22]. Чисельні значення для деяких кислот наведені нижче.

*Константи швидкості корозії*

*для деяких видів кислот*

*( $Z = 3,85$  г/л):*

<i>HCl</i> .....	2,17
<i>HNO<sub>3</sub></i> .....	1,18

$CH_2Cl \cdot COOH$ .....	0,25
$H^2SO_4$ .....	1,42

Розрахунок глибини ураження  $L$  бетонних і залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах після будь-якого часу їх експлуатації  $t$  здійснюється за формулами (1.18), (1.19) та за розрахунковими значеннями  $k_j$ . Величина  $w_j$  може бути визначена за формулою (1.20), якщо відомі концентрації  $C_{2m}$  і  $C_{2k}$ . Якщо такі дані відсутні, то їх слід визначити експериментально. Дослідження, проведені в НДІПромстрое спільно з ВЕД, показали що для сірчаної кислоти  $C_{2m} = 1,42$  г/л і  $C_{2k} = 5,54$  г/л.

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

#### Кінетика корозії бетону.

При корозії I, II видів відбувається поступове руйнування бетону з поверхні в глибину матеріалу. Інтенсивність руйнування бетону залежить від механізму перенесення розчинів кислот і їх взаємодії з компонентами бетону, головним 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 координат корозії переміщується в глибину 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 повільний процес при кислотній корозії бетону. При одобічному натиску, температурному або вологому перепадах або капілярному підсосі маємо фільтраційний механізм перенесення агресивного середовища.

Людвигівська корозія бетону зазвичай швидко розвивається в початковий період і поступово затухає 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 ступінь продуктів корозії визначається структурою кристалічної складової і підвищується із збільшенням щільності шару продуктів корозії. Найменшим ступенем володіють продукти у вигляді гелю.

Товщина шару продуктів корозії залежить від умови експлуатації і схильності продуктів корозії утримуватися в порах бетону або на його поверхні. При вільному обмиванні конструкції водою-середовищем товщина шару продуктів корозії зазвичай встановлюється постійною, оскільки частина продуктів корозії змивається і виноситься водою. В такому випадку процес корозії може протікати, як по дифузійно-кінетичному, так і по дифузійному механізму перенесення речовини. На конструкціях, що знаходяться в ґрунтах, продукти корозії, як і рильця, 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 дифузією 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 сталося 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 Мельникова Г. А. [12] розрахунок глибини руйнування  $\Gamma_p$  бетону розраховується по наступній формулі :

$$\Gamma_p = \frac{\sum PCaO}{\beta} \quad (1.23)$$

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

$\Delta$  – кількість цементу в 1 см<sup>3</sup> досліджуваних зразків розраховується по фазичному складу зразків г/см<sup>3</sup>;

$\beta$  – 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 :

$$\sum PCaO = a + K\sqrt{\tau}, \quad (1.24)$$

де  $a$  – постійна, така, 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 :

$$\alpha = \frac{\sum P_1 CaO}{\sum P_2 CaO} \quad (1.25)$$

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 :

$$\Gamma_p = (1 - \alpha) \frac{K\sqrt{\tau}}{C\beta} \quad (\text{при } \alpha < 0,1); \quad (1.26)$$

$$\Gamma_p = \frac{K\sqrt{\tau}}{C\beta} \quad (\text{при } \alpha > 0,1); \quad (1.27)$$

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

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

$$\Gamma_p = \frac{v\tau}{C\beta}, \quad (1.28)$$

де  $v$  – постійна швидкість в дифузійно-кінетичній області  $\frac{P_1 CaO}{\text{см}^2 \cdot \text{доб}}$ .

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 [27]. На залежність швидкості процесу від часу вигляду  $V = A\sqrt{t}$  вказували також автори [20].

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

$$\xi = -\alpha + A\sqrt{t}, \quad (1.29)$$

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 дифузійно-кінетичних областях; чисельне значення коефіцієнта  $\alpha$  дорівнює відвітку, що відсікається прямими при їх продовженні на осі ординат. При великих значеннях  $t$  коефіцієнтом  $\alpha$  можна негтувати.

Відоме рівняння Таммана [2], що описує гетерогенні хімічні реакції з врахуванням опору дифузії шару продуктів реакції. Рівняння має вигляд:

$$y = \sqrt{2DC_0Z}. \quad (1.30)$$

де  $y$  - товщина шару продуктів реакції, мм;  $D$  - коефіцієнт дифузії,  $\text{см}^2/\text{доб}$ ;  $C_0$  - концентрація дифундуючого компонента, вагові відсотки;  $Z$  - час, д.б.

На основі рівняння (1.30) було отримано вираз:

$$\xi = \sqrt{\frac{2D^*C_0}{u} \cdot \sqrt{t}} \quad (1.31)$$

де  $\xi$  - глибина корозійного руйнування, см;  $D^*$  - ефективний коефіцієнт дифузії,  $\text{см}^2/\text{год}$ ;  $C_0$  - концентрація агресивної речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  - час, год;  $u$  - кількість речовини, що доводиться на одиницю об'єму рідкого матеріалу і вступаючого в хімічну взаємодію з кислим середовищем,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Величина  $u$  може бути визначена як  $u = \frac{C_0 K}{C_0 - C}$ , де  $C$  - витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>;  $K$  - вміст СаО в цементі, %. При даних характеристиках матеріалу - ефективному коефіцієнті дифузії  $D^*$ , кількості речовини  $u$ , що прореагувала з агресивним середовищем, в даному випадку з кислотою, рівняння (1.31) може бути записане у вигляді:

$$\xi = A\sqrt{C_0\tau}. \quad (1.32)$$

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 прямолінійну 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  $\alpha$  і формула (1.32) набере вигляду:  $\xi = \alpha + A\sqrt{C_0\tau}$ .

Значення коефіцієнтів  $\alpha$  для  $0,5; 0,3$  і  $0,1$  н. розчинів НСІ 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 процесу розії при різних концентраціях НСІ, 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 за даній моделі і для розрахунку інтенсивності корозії (глибини руйнування) може бути використана залежність (1.31).

Використовуючи (1.31) при відомих  $C_0, C, K$  були визначені  $D^*$  - ефективні коефіцієнти дифузії в продуктах корозії для  $0,1$  і  $0,5$  н. розчинів НСІ, які склали відповідно  $0,044$  і  $0,032$  см<sup>2</sup>/год. або  $1,2 \cdot 10^{-5}$  і  $0,9 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, що близько до результатів, отриманих в [10] ( $1,6-1,7 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с).

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

Для підтвердження правомірності використання формули (1.31) 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 [14]. При розрахунках була прийнята середня величина  $D^*$ , рівна  $0,038 \text{ см}^2/\text{год.}$ ; величини  $S_0$ ,  $C$ ,  $K$  відомі з умов проведення експерименту.

Результати розрахунків виконані по формулі (1.31), добре узгоджуються експериментальними дослідженнями, проведеними на цементному камені.

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

$$D_0 = D^*(1 - S_3),$$

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

$$D_0 = D^*(1 - V_3), \quad (1.33)$$

де  $V_3$  - доля об'єму інертних заповнювачів в одиниці об'єму бетону, визначувана за формулою:

$$V_3 = \frac{G_3}{\rho_3}, \quad (1.34)$$

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

$\rho$  - щільність заповнювачів,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

З обліком (1.33) і (1.34) з формули (1.31) отримаємо

$$\xi = \sqrt{\frac{2C_0 D^* (1 - \frac{G_3}{C_0})}{C \cdot K - \rho_3 \cdot \sqrt{\tau}}}, \quad (1.35)$$

Хороший збіг результатів розрахунку, отриманого по формулі (1.35) з даними, приведенними в [12], підтверджує правомірність використання даної формули для розрахунків глибини корозійного пошкодження бетонів.

У роботі Глагола І.І. [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 структури бетону.

Коефіцієнт  $\beta$  обчислено з характеристичного рівняння

$$\frac{\sqrt{D_1} (C_{\min} - C_0)}{\text{erf } \beta/2 \sqrt{D_1}} \exp\left(-\frac{z_1^2}{D_1}\right) - \frac{\sqrt{D_2} C_{\min}}{\text{erfc } \beta/2 \sqrt{D_2}} \exp\left(-\frac{z_1^2}{D_2}\right) = \frac{\lambda \rho_2 \sqrt{\pi}}{2} \beta. \quad (1.36)$$

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

$$\beta = \sqrt{\frac{2\rho_1 (C_{\min} - C_0)}{\lambda \rho_2}}. \quad (1.37)$$

Як бачимо, коефіцієнт  $\beta$  залежить від фізико-хімічних (дифузійно-реактивних) параметрів нормальної та прокородованого бетону. Якщо взяти два члени розкладу  $\exp z_1^2$  і обмежитись першими членами розкладу  $\text{erf } z_1$ ,

отримаємо:

$$\beta = \left[ \frac{2D_1(C_{\min} - C_n)}{\lambda\rho_2} \left/ \left( 1 + \frac{D_1\rho_1(C_{\min} - C_n)}{2\lambda\rho_2} \right) \right. \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.38)$$

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

Використавши підстановку Больцмана  $(z/\sqrt{t})$  та функцію Крампа  $erf(x)$ , рівняння (1.36) стало можливим розв'язати відносно коефіцієнта  $\beta$  і виконати аналітичну оцінку корозійної деградації бетону і залізобетону в кислотному середовищі, а саме за формулою

$$\rho = \frac{D_2(C_n - C_{кр})}{r\rho t\sqrt{D_2\pi}} \pm \sqrt{\frac{D_2^2(C_n - C_{кр})^2}{\pi r^2\rho^2 t^2 D_2} + \frac{2D_1(C_{кр} - C_n)}{r\rho t}}. \quad (1.39)$$

За фізичним змістом формули (1.39) слід вибрати корінь

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

Ресурс залізобетонного елемента  $t$  можна визначити з урахуванням корозійної деградації корозійного шару арматури  $\varepsilon_0$ . Підставивши значення  $\beta$ , обчислене за формулою (1.39), у співвідношення  $\varepsilon = \beta\sqrt{t}$ , одержимо:

$$t = (\varepsilon_0/\beta)^2. \quad (1.40)$$

На основі формули (1.40) можна оцінити ресурс корозійної тривкості бетонних та залізобетонних конструкцій у кислотному середовищі.

У випадку контакту бетону із кислими ґрунтовими водами, рівняння для розрахунку глибини корозії бетону має вид [2]

$$L = \sqrt{Kt + h_{np}^2} - h_{np} \quad (1.41)$$

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

$$h_{np} = 1,06 \frac{D_{16}^*}{D_{1z}^*} \sqrt{\frac{1D_{1z}^*}{v_{\infty}}} \quad (1.42)$$

де  $D_{16}^*$ ,  $D_{1z}^*$  - ефективні коефіцієнти дифузії гідроксиду кальцію в буферному (прокерованому) шарі бетону і прилеглому ґрунті відповідно,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $l$  - характерний розмір конструкції, обтікаюча агресивним середовищем, 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 може бути виражений через молекулярний  $D$  залежністю виду  $D^* = aP_c D$  ( $P_c$  - наскрізна пористість капиллярно-ристого тіла;  $a$  - коефіцієнт, що характеризує звивистість капілярів і ступінь впливу поверхні пор на дифузію речовини). Тоді рівняння (1.42) можна представити у вигляді:

$$h_{np} \approx 1,06 P_{c6} \sqrt{\frac{1D_1}{P_{c7} v}} \quad (1.43)$$

де  $P_{c6}$  і  $P_{c7}$  - наскрізна пористість буферного шару бетону і ґрунта відповідно. Якщо конструкції експлуатуються в об'єм розчину (водоймиці), то  $P_{c7} = 1$ ;  $D_1$  - молекулярний коефіцієнт дифузії гідроксиду кальцію у воді,  $\text{см}^2/\text{р}$ . При  $t = 20^\circ\text{C}$   $D_1 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} = 0,88 \text{ см}^2/\text{добу}$  [10].

Константа швидкості корозії залежить як від властивостей бетону, так і від характеристик агресивного середовища [17]:

$$K = \frac{D_{2\delta}^* C_{2\infty}}{\mu m_0} \left( 1 + \mu \frac{D_{1\delta}^* C_{100}}{D_{2\delta}^* C_{2\infty}} \right) \quad (1.44)$$

де  $D_{2\delta}^*$  - 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,  $\text{г}/\text{см}^2$ ,  $m_0$  - реакційна ємність бетону,  $\text{г}/\text{см}^2$ . Якщо заповнювачі в бетоні інертний до кислоти, наприклад кварцовий пісок, тоді  $m_0 = \beta G_{\text{ц}}$  ( $G_{\text{ц}}$  - витрата цементу,  $\text{кг}/\text{см}^2$ ;  $\beta$  - масова частка оксиду кальцію в цементі);  $\mu$  - стехіометричне число, що враховує кількість кислоти, нейтралізуюче одиницею маси гідроксиду кальцію.

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

$$K = K_0 \Pi_2 \frac{\rho_{\text{ц}}}{G_{\text{ц}}} \quad (1.45)$$

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

$$K_0 = \frac{D_2 C_{2\infty}}{\mu \beta \rho_{\text{ц}}} \left( 1 + \mu \frac{C_{1\infty} D_1}{C_{2\infty} D_2} \right) \text{const} \quad (1.46)$$

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

За умови  $C_{2\infty} \gg C_{1\infty}$  рівняння (1.46) набирає вигляду:

$$K_0 = \frac{D_2 C_{2\infty}}{\mu \beta \rho_{\text{ц}}} \text{const} \quad (1.47)$$

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 проф. В.М. Москвина).

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

$$P_1 = (1 - k_y) \frac{G_u}{\rho_u} \left[ W \frac{\rho_u}{\rho_s} - \theta(\delta - 1) \right] \quad (1.48)$$

а пористість прокородованого (буферного) шару

$$P_2 = (1 - k_y) \frac{G_u}{\rho_u} \left[ W \frac{\rho_u}{\rho_s} - \theta(\delta - 1)(1 - \beta) + \beta \right], \quad (1.49)$$

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

Значення коефіцієнтів в рівнянні (1.49) змінюються в межах  $\delta = 1,1—1,6$ ;  $\beta = 0,6-0,8$   $\theta = 0,6—0,8$  [20]. Тоді приблизно

$$K = K_0 \left[ (1 - k_y) \frac{G_u}{C_u} + W \frac{\rho_u}{\rho_s} + 0,5 \right]. \quad (1.50)$$

З (1.50) витікає, що швидкість корозії в значній мірі залежить від щільності бетону, яка визначається значеннями параметрів  $k_y$  і  $W$ . Залежність швидкості корозії від вмісту цементу в бетоні ощутіма лише в разі

недостатнього ущільнення суміші. Якщо значення  $k_y$  близько до одиниці, то впливом цього чинника можна нехтувати.

При розрахунках глибини руйнування бетону в окремих запропонованих залежностях необхідні додаткові експериментальні дослідження. Наприклад, в роботі Глагола 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 (1.36) виникає складність у визначенні коефіцієнту пропорційності A, коефіцієнту  $\alpha$ .

Зміна глибини корозії бетону за часом в залежності (1.40) пов'язана через коефіцієнт  $\beta$ , який вимагає громіздких розрахунків для його визначення.

Теж можливо і для залежності (1.41) константи швидкості корозії бетону  $\Gamma$  визначається з деяким наближенням, використовується приведена товщина граничного шару агресивної рідини.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### **Мета роботи:**

Експериментально-теоретичним шляхом дослідити вплив концентрації азотної кислоти на глибину корозійного руйнування бетону з урахуванням хімічних реакцій та дифузійних властивостей бетону.

#### **Об'єкт дослідження:**

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

#### **Предмет дослідження:**

Прогнозування глибини корозійного руйнування бетону залізобетонних конструкцій в середовищі азотної кислоти.

#### **Задачі дослідження:**

1. розглянути види корозії бетону в агресивних середовищах;
2. виявити особливості взаємодії бетону залізобетонних конструкцій в середовищі мінеральних кислот;
3. проаналізувати відомі моделі, що описують глибину руйнування бетону в середовищі сильних мінеральних кислот;
4. розробити теоретичні залежності для прогнозування глибини корозійних вражень бетону в середовищі азотної кислоти;
5. провести експериментальну перевірку отриманої залежності;
6. Дослідити вплив параметрів залежності на динаміку корозійних вражень.
7. Сформулювати висновки.

### РОЗДІЛ 3

#### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

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

Підтвердження розрахункової математичної моделі виконане на бетонних кубиках розміром 2x2x2 см різного складу і В/Ц при повному зануренні в розчин кислоти із врахуванням дифузійного механізму проникнення агресивних іонів в поровий простір структури бетону. Розрахунок складу бетону відся згідно ДСТУ Б В 2.7-215:2009.

Дослідження проводилися в лабораторних умовах. Після формування зразків розміром 2x2x2 см 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 поверхні зразків.

Таблиця 3.1 Розміри та площа поверхні експериментальних зразків

В/Ц	Розміри зразка, мм	Площа кубика мм <sup>2</sup>	В/Ц	Розміри зразка, мм	Площа поверхні кубика мм <sup>2</sup>
Склад бетону 1:1			Склад бетону 1:3		

Зразки занурені на 102 дні у кислоту, яка була попередньо розведена до вибраної концентрації, а саме 0,005 н розчину  $\text{HNO}_3$  0,0315 г/л (рис.3.1).

Рис. 3.1. Занурення зразків в азотну кислоту на 102 дні.

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

Рис. 3.2. Кип'ятіння зразка у воді.

Осад який залишився в стакані був відфільтрований на фільтрувальний папір за допомогою лійки і ковби 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)

Рис. 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).

Рис. 3.4. Результат висушування.

## РОЗДІЛ 4

### ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Для випробувань було використано концентровану азотну кислоту 63 %, розбавлену дисоційованою водою до концентрації 0,005н розчину  $\text{HNO}_3$  0,0315 г/л.

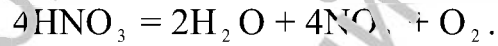
Азотна кислота - одна з найважливіших мінеральних кислот. За обсягом виробництва в хімічній промисловості вона займає друге місце після сірчаної кислоти.

Чиста азотна кислота являє собою безбарвну рідину з їдким запахом щільністю  $1,52 \text{ г/см}^3$  і кипить при  $84^\circ\text{C}$ , а при  $-41^\circ\text{C}$  твердне в безбарвну кристалічну речовину. Звичайно застосовувана на практиці концентрована азотна кислота містить 63 - 70%  $\text{HNO}_3$  (максимальна щільність  $1,4 \text{ г/см}^3$ ); з водою кислота змішується в будь-яких співвідношеннях. Існує також азотна кислота, що димить з концентрацією 97 - 99%.

Азотна кислота високої концентрації виділяє на повітрі гази, які в закритій площі виявляються у вигляді коричневих парів (оксиди азоту). Ці гази дуже отруйні, так що потрібно остерігатися їх вдихання. Азотна кислота окисляє багато органічних речовин. Папір і тканини руйнуються внаслідок окислення утворюють ці матеріали речовин. Концентрована азотна кислота викликає сильні опіки при тривалому контакті і пожовтіння шкіри за кілька днів при короткому контакті. Пожовтіння шкіри свідчить про руйнування білка і виділення сірки (якісна реакція на концентровану азотну кислоту - жовте забарвлення через виділення елементарної сірки при дії кислоти на білок - ксантопротеїнова реакція). Тобто - це опік шкіри. Щоб запобігти опік, слід працювати з концентрованою азотною кислотою в гумових рукавичках. В той же час звернення з азотною кислотою менш небезпечно, ніж, наприклад, з сірчаною, вона швидко випаровується і не залишається в несподіваних місцях.

Бризки азотної кислоти слід змивати великою кількістю води, а ще краще змочувати розчином соди [4].

Димить азотна кислота при зберіганні під дією теплоти і на світлі частково розкладається:



Чим вище температура і чим вища концентрація кислоти, тем швидше йде розкладання. Тому зберігають її в прохолодному і темному місці. Virізняється діоксид азоту розчиняється в кислоті і надає їй буре забарвлення. Розбавлену кислоту легко приготувати, виливаючи концентровану кислоту у воду. Розбавлену азотну кислоту зберігають і перевозять у тарі з хромової сталі концентровану - в алюмінієвій тарі, тому концентрована кислота пасивує алюміній, залізо і хром через утворення нерозчинних плівок оксидів:

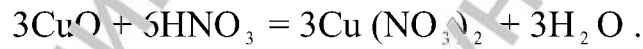


Невеликі кількості зберігають у скляних пляшках. Азотна кислота сильно роз'їдає гуму. Тому пляшки повинні бути з притертою або поліетиленовими пробками. Азотна кислота - одна з найагресивніших, вона діє на більшість металів (за винятком золота, платини, родію, іридію, танталу і деяких інших; тому з допомогою неї можна відокремити золото від срібла). При цьому метали найчастіше переходять у нітрати (олово, сурма, мідь, як, молибден і вольфрам - в гідратовані оксиди), а азот кислоти відновлюється. Найбільш енергійно реагують лужні метали



Для окислення витрачаються дві молекули кислоти, при цьому утворюються вода і окис азоту, остання в з'єднанні з киснем повітря утворюють

двоокис азоту ( $\text{NO}_2$ ) і випаровується у вигляді червоно-коричневих отруйних парів. Потім окис металу взаємодіє з кислотою за реакцією:



При цьому ще п'ять молекул кислоти витрачаються на утворення солі, також з виділенням води. В цілому процес розчинення виглядає так:



Застосовують азотну кислоту в основному у вигляді водних розчинів, є однією з основних частин царської горілки, міститься в пробірних кислотах. У промисловості застосовують для отримання комбінованих азотних добрив, для розчинення руд і концентратів, у виробництві сірчаної кислоти, різних органічних нітропродуктів, в ракетній техніці як окислювач пального. Азотна кислота широко застосовується для виробництва багатьох продуктів, що використовуються в промисловості та сільському господарстві:

- близько 40% її витрачається на отримання складних і азотних мінеральних добрив;
- азотна кислота використовується для виробництва
  - синтетичних барвників,
  - вибухових речовин,
  - нітролаків,
  - пластичних мас,
  - лікарських синтетичних речовин та інш.;
- залізо добре розчиняється розведеною азотною кислотою.

Концентраційна азотна кислота утворює на поверхні заліза тонкий, але щільний шар нерозчинного в концентрованій кислоті оксиду, що захищає метал від подальшого роз'їдання. Ця здатність заліза пасивуватися використовується

для захисту його від корозії. Концентровану азотну кислоту (особливо з додаванням 10%  $H_2SO_4$ ) перевозять звичайно в сталевих цистернах. Багато органічних речовин (зокрема гварини і рослинні тканини) при дії  $HNO_3$  руйнуються, а деякі з них від зіткнення з дуже концентрованою кислотою можуть запалюватися. У лабораторній практиці зазвичай застосовується азотна кислота, що містить близько 65%  $HNO_3$ . У промисловості застосовують два сорти азотної кислоти: розведену з вмістом 50-60%  $HNO_3$  та концентровану, що містить 96-98%  $HNO_3$ . Раніше, коли не існувало виробництва синтетичного аміаку, азотну кислоту отримували дією сірчаної кислоти на чилійську селітру [9]. Обсяги виробництв були дуже невеликими, і кислота використовувалася тільки для виробництва вибухових речовин, барвників і деяких інших хімічних продуктів.

Для випробування було використано портландцемент ПЦ1-500-Н, що відповідає вимогам ДСТУ Б В. 2.7-112-2002. 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. Результати випробування були занесені до таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Результати випробувань бетончик на стиск та згин


Випробування міцності на згин проведені на зразках балочках розміром 4x4x16 см та міцності на стиск половинок балочок у віці 2, 7, 28 діб, що зберігались у ванні з питною водою.

Дрібним заповнювачем був кварцовий пісок з модулем крупності  $M_{кр}=1$ , насипною густиною  $\rho=1,42$  г/см<sup>3</sup> та вологістю  $W=0\%$ . Основні характеристики піску визначали відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-32-95, ДСТУ Б.В.2.7-131:2007.

Результати визначення модуля крупності кварцового піску занесені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Верновий склад піску

Показник	Одиниця виміру	Розміри отворів сита, мм					Пройшло крізь сита
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	

Модуль крупності  $M_{кр}=1$

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

## РОЗДІЛ 5

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 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:

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

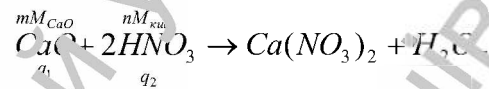
де  $\delta$  - глибина корозійного пошкодження;  $A_0$  - коефіцієнт, постійний для даного складу бетону  $\text{м} / \text{кг}^{1/2}$ ;  $D^*$  - ефективний коефіцієнт дифузії агресивного речовини через шар продуктів корозії,  $\text{см}^2 / \text{год}$ ;  $C_0$  - концентрація агресивного речовини,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;  $\Theta$  - хімічний еквівалент, який представляє собою співвідношення мас оксиду кальцію і кислоти, що вступають у взаємодію, що визначається за рівнянням

$$\Theta = m M_{\text{CaO}} / n M_{\text{кисл}},$$

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

Виходячи з рідкості потоку агресивного речовини і кількості оксиду кальцію, який пішов на його нейтралізацію, можна наступним розрахунком підтвердити придатність рівняння (5.1) [23].

Згідно з рівнянням хімічної реакції в разі дії на цементний камінь, наприклад розчину  $\text{HNO}_3$ , маємо



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 обсяг, можна записати:

$$q_2 = q_1 \frac{nM_{кисл}}{mM_{CaO}} \quad (5.2)$$

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

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

$$q_2 = Ck \frac{nM_{кисл}}{mM_{CaO}} \quad (5.3)$$

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

$$q_2 = D C_0 / \delta \quad (5.4)$$

Для  $\delta \neq 1$

$$\frac{L_{кисл} n M_{кисл}}{m M_{CaO}} d\delta = D \frac{C_0}{\delta} dt, \quad (5.5)$$

звідки

$$\delta d\delta = \frac{D^* C_0 m M_{CaO}}{Ck n M_{кисл}} d\tau. \quad (5.6)$$

Інтегруючи (5.6), отримуємо

$$\frac{\delta^2}{2} = \frac{D^* C_0 n M_{CaO}}{Ck n M_{кисл}} \tau + C. \quad (5.7)$$

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

Рішуючи (5.7) щодо  $\delta$  і ввівши позначення

$$\Theta = \frac{m M_{CaO}}{n M_{кисл}}$$

можна записати

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^* C_0 \Theta \tau}{Ck}}. \quad (5.8)$$

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

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^* C_0 \Theta \left(1/\rho_u + \frac{B}{L\rho_s}\right) \tau}{k}}. \quad (5.9)$$

Глибина корозійного пошкодження бетону може бути визначена з урахуванням того, що ефективний коефіцієнт дифузії  $D_0^*$  агресивного речовини через заспівай продуктів корозії цементного каменю в бетоні і власне і цементному камені один і той же. Експериментальні дані по визначенню глибини руйнування бетону при дії  $\text{HNO}_3$  підтвердили придатність рівняння Таммана. З урахуванням площі, зайнятої заповнювачем і припадає на одиницю поверхні  $S_3$ , коефіцієнт дифузії в бетоні може бути обчислений за формулою

$$D_0^* = D^* (1 - S_3), \quad (5.10)$$

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

$$D_0^* = D^* (1 - V_3), \quad (5.11)$$

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

$$V_3 = q_3 / \rho_3. \quad (5.12)$$

З урахуванням (5.11) і (5.12) з формули (5.8) отримуємо

$$\delta = \sqrt{\frac{2D^* C_0 \mathcal{E} (1 - q_3 / \rho_3) \tau}{I_{\text{н}}}}. \quad (5.13)$$

Виразивши  $(1 - q_3 / \rho_3)$  через  $C(1 / \rho_u + B - C \rho_B)$ , отримуємо залежність (5.9).

Ввівши коефіцієнт  $A_0$ , отримуємо рівняння (5.1).

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

$$A_6 = \sqrt{\frac{2(1/\rho_u + B/C)\rho_B}{k}} \quad (5.14)$$

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

$$A_6 = \sqrt{\frac{2(1 - q_3/\rho_3)}{Ck}} \quad (5.15)$$

У формулах (5.14), (5.15)  $A_6$  - коефіцієнт, постійний для даного складу бетону,  $\text{м}^3/\text{кг}^{1/2}$ ;  $\rho_u$ ,  $\rho_B$ ,  $\rho_3$  - 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:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{mM_{\text{CaO}}}{nM_{\text{HNO}_3}} = \frac{50}{2 \cdot 63} = 0,444 \\ \delta_{\text{HNO}_3} &= t_6 \sqrt{D^* \cdot C_0 \cdot 0,444 \cdot \tau} \end{aligned} \quad (5.16)$$

## 5.2 Розрахунки за розробленою моделлю

За формулою (5.15) визначаємо глибину корозії бетону склад 1:2,5:3,67 з витратою цементу  $\Pi=350 \text{ кг}/\text{м}^3$  при дії 0,015 н розчину  $\text{HNO}_3$  протягом 102 днів. Щільність заповнювачів (піску і щебеню) складає 2650 і 2610  $\text{кг}/\text{м}^3$  відповідно, визначим значення  $A_6$ .

Глибина корозії за формулою (5.1) складає:

см.

Таким же чином розраховуються і наступні експериментальні зразки з іншим складом бетону і В/Ц з постійною дифузією  $D^* HNO_3 = 0,045 \text{ см}^2/\text{год}$ .

В/Ц=0,3:

$$\delta = 2,8 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,0315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 102 \cdot 24} = 0,035 \text{ см.}$$

В/Ц=0,8 :

$$A_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - 1,62 \cdot \frac{350}{2650} - 1,44 \cdot \frac{350}{2610})}{350 \cdot 0,63}} = 6,9 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta = 6,9 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,8 \cdot 15 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 102 \cdot 24} = 0,086 \text{ см.}$$

Для складу бетону 1:1 можна розрахувати  $A_6$  за формулою (5.14).

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:

см.

Для В/Ц=0,6:

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

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,0315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 102 \cdot 24} = 0,05 \text{ см.}$$

Для В/Ц=0,8:

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

$$\delta = 4,4 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,0315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 102 \cdot 24} = 0,06 \text{ см.}$$

Розраховуємо глибину корозійного руйнування бетону з різним В/Ц при дії на нього різної концентрації розчину  $\text{HNO}_3$  на період 25 років.

Отже, для бетону дифузія становить  $D_{\text{HNO}_3}^* = 0,045 \text{ см}^2/\text{год}$ . Концентрація  $0,001 \text{ н}$  розчину  $\text{HNO}_3 = 0,0315 \text{ кг/м}^3$ .

За формулою (5.14) розраховуємо  $A_6$  для В/Ц 0,4

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

Підставивши вихідні дані в формулу (5.1) отримаємо:

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,0315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,42 \text{ см}$$

Аналогічно розраховуємо глибину корозійного руйнування для різної концентрації

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 1,33 \text{ см};$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 2,15 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 4,21 \text{ см};$$

$$\delta = 3,59 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,00315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,13 \text{ см};$$

За формулою (5.14) розраховуємо  $A_6$  для В/Ц 0,5

$$A_6 = \sqrt{\frac{2(1/3100 + 0,5) \cdot 1000}{0,63}} = 3,84 \cdot 10^{-2}$$

Підставивши вихідні дані в формулу (5.1) для різних концентрацій отримаємо:

см;

см;

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,0315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,45 \text{ см};$$

$$\delta = 3,84 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,015 \cdot 0,00315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,143 \text{ см}.$$

За формулою (5.14) розраховуємо Аб для В/Ц 0,6

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

Підставивши вихідні дані в формулу (5.1) для різних концентрацій отримаємо:

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 3,15 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 4,76 \text{ см};$$

см;

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,48 \text{ см};$$

$$\delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,00315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,15 \text{ см}.$$

За формулою (5.14) розраховуємо Аб для В/Ц 0,7

$$A_7 = \sqrt{\frac{2(1/3100 + 0,7)1000}{0,63}} = 4,26 \cdot 10^{-2}$$

Підставивши вихідні дані в формулу (5.1) для різних концентрацій отримаємо:

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 3,15 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 5,01 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 1,58 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,00315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 63} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,5 \text{ см};$$

$$\delta = 4,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,045 \cdot 0,00315 \cdot \frac{56}{2 \cdot 65} \cdot 25 \cdot 8760} = 0,16 \text{ см.}$$

Таблиця 5.2 Розрахунок глибини корозійного руйнування бетону на період 25 років.

Концентрація, HNO <sub>3</sub>	Дифузія, см / год	Коефіцієнт Аб	Глибина корозійного руйнування бетону , см, при різному В/Ц			
			0,4	0,5	0,6	0,7

Дифузія 0,045 см / год,

$\cdot 10^{-2}$

-2

-2

-2

5.5 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

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

де  $a$  – грань кубика.

Потім згідно формули площі куба  $S = a^2 \cdot 6$  маємо :

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

Після сушіння осаду в сушильній шафі його маса становить  $m=0,38$  г, згідно маючи масу і густоту 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:

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

$$V = 0,38 \cdot 3,1 = 1,18 \text{ см}^3.$$

Маючи площу кубика і його об'єм можна розрахувати глибину корозійного враження зразка розчином  $\text{HNO}_3$  за формулою:

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

$$h = \frac{1,18}{24,6} = 0,048 \text{ см}$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному 0,05  $\approx$  0,048 см.

Для В/Ц 0,3 ; складу бетону 1:1 маємо:

$$a = \frac{20,7 + 21 + 19,5}{3} = 20,4 \text{ мм},$$

$$S = 20,4^2 \cdot 6 = 2497 = 24,97 \text{ см}^2.$$

$$m = 0,254 \text{ г}$$

$$V = m \cdot \rho = 0,254 \cdot 3,1 = 0,78 \text{ см}^3.$$

$$h = \frac{V}{S} = 0,0315 \text{ см}.$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному  $0,039 \approx 0,0315$  см.

$$a = \frac{19 + 21 + 19,5}{3} = 19,83$$

$$S = 19,83^2 \cdot 6 = 2359 = 23,60 \text{ см}^2$$

$$m = 0,371$$

$$V = m \cdot \rho = 0,371 \cdot 3,1 = 1,15 \text{ см}^3.$$

$$h = \frac{V}{S} = 0,049 \text{ см}.$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному  $0,06 \approx 0,049$  см.

Для В/Ц 0,6; склад бетону 1:2

$$a = \frac{20,2 + 20,5 + 19,7}{3} = 20,13$$

$$S = 20,13^2 \cdot 6 = 2432 = 24,32 \text{ см}^2$$

$$m = 0,291$$

$$V = m \cdot \rho = 0,291 \cdot 3,1 = 0,902 \text{ см}^3$$

$$h = \frac{V}{S} = 0,037 \text{ см}.$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному  $0,054 \approx 0,037$  см.

Для В/Ц 0,3; склад бетону 1:2

$$a = \frac{20,2 + 20,5 + 20,2}{3} = 20,3$$

$$S = 20,3^2 \cdot 6 = 2473 = 24,73$$

$$m = 0,236$$

$$V = m \cdot \rho = 0,236 \cdot 3,1 = 0,731 \text{ }^3$$

$$h = \frac{V}{S} = 0,029$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному  $0,035 \approx 0,029$  см.

Для В/Ц 0,8; складу бетону 1:2

$$a = \frac{20 + 20 + 19,2}{3} = 19,73$$

$$S = 19,73^2 \cdot 6 = 2336 = 23,36 \text{ }^3$$

$$m = 0,557$$

$$V = m \cdot \rho = 0,557 \cdot 3,1 = 1,727 \text{ }^3$$

$$h = \frac{V}{S} = 0,074$$

Отже, теоретичне значення наближено дорівнює експериментальному  $0,086 \approx 0,074$  см.

Таблиця 5.1 Результати дослідження

Концентрація $\text{HNO}_3$ , кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт Аб	В/Ц	Глибина корозійного руйнування бетону теоретичне, см	Глибина корозійного руйнування бетону експериментальне, см
			Склад бетону 1:1	
	-2			
	-2			
	-2			

	-2			
	-2			
	-2			

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

#### 6.1 Охорона праці

##### 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:

- підвищений рівень шуму та вібрації;
- зачистність повітря;
- хімічні речовини;

Шкідливі речовини можуть надходити в організм людини через органи дихання, шкіру. Особливо активно хімічні речовини потрапляють в організм

Пил - основний шкідливий фактор на багатьох промислових підприємствах, обумовлений недосконалістю технологічних процесів. Природний пил знаходиться в повітрі в звичайних умовах мешкання людини в межах концентрацій 0,1-0,2 мг/м<sup>3</sup>, в промислових центрах, де діють великі підприємства, він не буває нижче 0,5 мг/м<sup>3</sup>, а на робочих місцях заміненість повітря іноді сягає 100 мг/м<sup>3</sup>. Значення ГДС для нейтрального пилу, що не має отруйних властивостей, дорівнює 10 мг/м<sup>3</sup>.

Основні фізико-хімічні властивості пилу: хімічний склад, дисперсність (ступінь поділення), будова частинок, розчинність, щільність, питома поверхня, нижня та верхня концентраційна границя вибуховості суміші пилу з повітрям, електричні властивості та ін. Знання усіх цих показників дає можливість оцінити ступінь безпеки та шкідливості пилу, його пожежо- та вибухонебезпечність.

Промисловий пил може бути класифікований за різними ознаками:

- за походженням - органічний (рослинний, тваринний, штучний пил) і неорганічний (мінеральний, металевий пил) та змішаний (присутність часток органічного та неорганічного походження);
- за способом утворення - дезінтеграційний (подрібнення, різання, шліфування і т. п.), димовий (сажа та частки вуглецю, що горить) та конденсаційний (конденсація в повітрі пари розплавлених металів);
- за токсичною дією на організм людини - нейтральний (нетоксичний для людини пил) та токсичний (отруйючий організм людини).

Дисперсний склад характеризує пилкові частки за розміром і значною мірою обумовляє властивості пилу. Для організму людини найбільш небезпечний пил що складається з часток розміром до 0,5 мкм, тому що погано затримується слизовими оболонками верхніх дихальних шляхів і потрапляє глибоко в легеневу тканину. Також має значення форма частинок пилу. Частинки зазубреної колючої форми небезпечніші за сферичні, бо подразнюють шляхи, легеневі тканини та слизові оболонки, даючи змогу просмоктуватися. В

організм інфекційним мікроорганізмом, що супроводжує її, або знаходяться у повітрі. Це призводить до атрофічних, гіпертрофічних та інших, виразкових та інших змін слизових оболонок бронхів, легень, шкіри, веде до катару верхніх дихальних шляхів, виразковому захворюванню носової перетинки, бронхіту, пневмонії, кон'юнктивіту, дерматиту та інших захворювань. Довготривале вдихання пилу, що потрапляє в легені, викликає пневмоконіоз. Найбільш небезпечна його форма - силікоз - розвивається при систематичному вдиханні пилу, що містить вільний діоксид кремнію. Борошняний, зерновий пил та деякі інші можуть спричинити хронічний бронхіт.

Запиленість повітря можна визначити гравіметричним (ваговим), лічильним (мікроскопічним), фотометричним та деякими іншими методами.

Видалення пилу з повітря може бути здійснено різними способами: аспіраційним, що ґрунтується на просмоктуванні повітря через фільтр; седиментаційним, що базується на процесі гравітаційного осідання пилу на скляні пластинки або баночки з подальшим підрахунком маси пилу, що осів на їх поверхні; за допомогою електроосадження, принцип якого полягає в тому, що створюється електричне поле великої напруги, в якому пилові частинки електризуються і притягуються до електродів.

У санітарно-гігієнічній практиці основним методом визначення запиленості прийнятий гравіметричний метод, тому що при сталості хімічного складу первинне значення має маса пилу, що зтрималася в організмі людини. Визначення тільки маси пилу не дає повної картини його шкідливості для людини та технологічного процесу, тому що при однаковій масі може бути різний хімічний, гранулометричний склад пилу, що позначається на його впливі на людину, об'єднання та технологію. Повна характеристика пилу складається з його маси, що міститься в одиниці об'єму повітря, хімічного та дисперсного складу.

Існує багато різних способів та заходів, призначених для підтримання чистоти повітря виробничих приміщень у відповідності до вимог санітарних норм. Всі вони зводяться до конкретних заходів:

1. Запобігання проникненню шкідливих речовин у повітря робочої зони за рахунок герметизації обладнання, ущільнення з'єднань, люків та отворів, удосконалення технологічного процесу.

2. Видалення шкідливих речовин, що потрапляють у повітря робочої зони, за рахунок вентиляції, аспірації або очищення і нормалізації повітря за допомогою кондиціонерів.

3. Застосування засобів захисту людини.

Герметизація та ущільнення є основними заходами із вдосконалення технологічних процесів, у яких використовуються або утворюються шкідливі речовини. Застосування автоматизації дає змогу вивести людину із забрудненого приміщення в приміщення з чистим повітрям. Удосконалення технологічних процесів дозволяє замінювати шкідливі речовини нешкідливими, відмовлятися від застосування теплоутворюючих процесів, замінювати тверде паливо на рідке або газоподібне, встановлювати газо-палоуловлювачі в технологічний цикл та ін.

### **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 дещо 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. Розмежовують нижній і верхній концентраційні межі вибуховості, поза якими суміші не є вибухонебезпечними. Ці межі змінюються залежно від потужності і характеристики джерела займання, температури і тиску суміші, напрямку поширення полум'я, змісту інертних речовин.

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

Забезпечення нормальних умов в лабораторіях 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 отруйних 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 одиницю часу тепла і вологи.

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

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

Нітрит натрію, нітрит калію, ЧНК I ННХК повинні зберігатися на індивідуальному складі. Забороняється їх зберігати в одному приміщенні з кислотами.

Забороняється палити і вести роботи з відкритим полум'ям (газова зварка, газовий різак та ін.) в приміщенні, де зберігається кристалічний нітрит натрію.

Горючі продукти, просочені 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 нітрит-нітрат-хлориду кальцію, необхідно передбачати штучну вентиляцію.

При укладанні бетонної суміші особливу 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 зберігається 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 18 років.

### **Технічні засоби і організаційні заходи по зменшенню можливої дії шуму та вібрації**

Звук - це розповсюдження звукової хвилі з пружному середовищі. Він характеризується частотою звукових коливань, амплітудою та часовими змінами коливань. Звуковий спектр поділяється на інфразвук, частота коливань звукової хвилі якого знаходиться в межах від 0 до 16 Гц - людина цих звуків органами слуху не сприймає. Звуки з частотою від 20 до 20 000 Гц звуковий діапазон, який людина чує. Частота від  $20\ 000$  Гц до  $10^9$  Гц ультразвук, від  $10^9$  і вище - гіперзвук - людське вухо їх не сприймає.

Шум - це коливання звукової хвилі в звуковому діапазоні, що характеризується змінною частотою і амплітудою, негостійні в часі, які не несуть корисної інформації людині.

Вібрація - це механічні коливання, що призводять до розладу життєвих функцій людини, шкідливо впливають на роботу обладнання та руйнують будівельні конструкції.

Звукові коливання будь-якого середовища виникають при порушенні його стаціонарного стану під впливом збурюючої сили. Частилки середовища починають коливатися відносно положення рівноваги, причому швидкість цих коливань (коливальна швидкість) значно менша швидкості розповсюдження звукових хвиль (швидкості звуку), яка залежить від пружних властивостей, температури та щільності середовища. Під час звукових коливань у просторі утворюються зони зниженого та підвищеного тиску. Звуковим тиском  $P_{\text{зв}}$  називається різниця між миттєвим значенням повного тиску та середнім тиском в незбуреному середовищі.

При розповсюдженні звукової хвилі в просторі відбувається перенос енергії, кількість якої визначається інтенсивністю звуку. Середній потік енергії в будь-якій точці середовища за одиницю часу, віднесений до одиниці площі поверхні, нормальної до напрямку розповсюдження хвилі, називається інтенсивністю звуку  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Характеристикою джерела шуму є звукова потужність  $P_{\text{зв}}$ , яка визначається загальною кількістю звукової енергії, що випромінює джерело шуму в навколишнє середовище за одиницю часу.

Вібрація характеризується частотою коливань, амплітудою зміщення точки коливання від положення рівноваги, коливальною або віброшвидкістю та віброприскоренням. Залежно від способу передачі вібрації тілу людини розрізняють:

- локальну (місцеву), що передається людині переважно через кінцівки;
- загальну, що передається на тіло людини через опорні поверхні тіла.

Загальна вібрація поділяється на:

- транспортну, що передається людині, яка знаходиться на транспортному засобі, що рухається;
- транспортно-технологічну, яка передається оператору машині з обмеженим переміщенням, яке здійснюється по спеціально підготовлених поверхнях виробничих приміщень або промислових площадок;
- технологічну, яка передається від стаціонарних машин на робочі місця, що не мають джерела вібрації, через підлогу, фундаменти або робочі площадки, де працює оператор.

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією:

- зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму, замінюючи ударні технологічні процеси безударними, застосовуючи деталі із матеріалів з високим коефіцієнтом внутрішнього тертя (пластмаса, гума, деревина та ін), підшипники ковзання замість роління, косозубі та шевронні зубчасті передачі замість прямозубих, проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;
- зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;
- зменшення шкідливості шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку

Способи зменшення шумів аеродинамічного та гідродинамічного походження:

- зменшення швидкості руху повітря та рідин, що забезпечує їх ламінарний режим течії;
- встановлення глушників, що вміщують звукопоглинаючі матеріали і поглинають звукову та кінетичну енергію, що потрапляє на них;
- встановлення глушників, що подрібнюють потоки, зменшуючи таким чином їх енергію; спрямування потоку у зворотньому напрямку, що дає

змогу взаємопоглинатися енергіям потоків прямого та зворотнього напрямків, які контактують через перетинку.

Одним з найпростіших та економічно доцільних способів зниження шуму є застосування методів звукоізоляції та звукопоглинання.

Звукоізолюючі кожухи, екрани, стіни, перетинки виготовляють із щільних твердих матеріалів, здатних запобігати розповсюдженню звукових хвиль (метал, пластмаса, бетон, цегла). Ефективність звукоізоляції характеризується коефіцієнтом звукопровідності  $\alpha$ .

Для шарових звукоізолюючих конструкцій величина звукоізоляції може бути визначена з допомогою коефіцієнта звукопровідності. Для дифузійного звукового поля, в якому всі напрямки розповсюдження прямих і відбитих звукових хвиль рівномірнію.

Пористі та волокнисті конструкції та матеріали, здатні поглинати і даючи на них енергію звукових хвиль, як в цьому випадку витрачається на приведення в рух повітря в масі конструкції або на деформацію волокон. Відношення енергії звукової хвилі, що падає на пористий матеріал, до енергії падаючої звукової хвилі називають коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha$ . Звукопоглинаючими матеріалами є поліуретан, мінеральна вата, супертонке скловолокно, пористий бетон, перфоровані гіпсові плити - акмігран та ін., що мають коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha > 0,2$ . Звукопоглинаючі та звукоізолюючі матеріали зазвичай використовують разом.

Для захисту від шуму, що випромінюється в діапазоні високих та середніх звукових частот, застосовують акустичні екрани. Це щити, облицьовані зі сторони джерела шуму звукопоглинаючим матеріалом товщиною не менше 50-60 мм. їх призначення - зниження інтенсивності прямого звуку або відбитого шуму, що спрямовується на грацівника. Екран є перепонкою, за якою утворюється акустична тінь із низьким рівнем звукового тиску.

Захист від шуму будівельно акустичним методом потрібно проектувати на підставі акустичного розрахунку, який дозволяє визначити в розрахункових точках очікувані рівні звукового тиску і зіставити з нормованими. Визначення рівня звукового тиску в розрахункових точках проводять згідно з будівельними нормами і правилами. Для зниження шуму всередині промислових приміщень проводять їх акустичну обробку, яка полягає в розміщенні на внутрішніх поверхнях приміщень звукопоглинаючих матеріалів. Ефект від їх використання досягається за рахунок зменшення енергії звукових хвиль.

Для поглинання аеродинамічних та гідродинамічних шумів застосовують такі типи глушників: активні й реактивні. Активні глушники застосовують у вигляді облицювальних матеріалів зсередини повітря- та рідинопроводів, які поглинають імпульсні коливання повітря та рідин, що виникають при їх турбулентній течії. Реактивні глушники налаштовуються на найбільш інтенсивну складову шуму за частотою шляхом розрахунку та розміщення елементів глушника, які відбивають енергію. При цьому досягається зниження шуму на 20-30 дБ. Для отримання ефективного зниження шуму в широкодіапазоні частот застосовують комбіновані глушники.

Електромагнітний шум виникає при взаємодії феромагнітних мас і змінних магнітних полів. Цей шум характерний для обладнання із електроприводом. Зниження шуму електромагнітного походження досягається шляхом конструктивних змін в електричних машинах.

### **Надання першої медичної допомоги при дії різних шкідливих і виробничих факторів**

Професійними називаються хвороби, виникнення яких пов'язане з певною трудовою діяльністю і впливом на організм конкретних несприятливих умов праці, так званих шкідливих виробничих чинників.

До професійних хвороб належать насамперед хвороби, що виникають внаслідок безпосередньої дії на людей виробничих шкідливих факторів, а також ті, що за певних виробничих умов розвиваються значно частіше, ніж звичайно.

Найпоширенішими професійними чинниками, які впливають на організм робітників сільського господарства є:

- хімічні речовини, що широко використовуються для захисту рослин від шкідників та захворювань;
- вібрація та шум, гуд рослинного й тваринного походження;
- перенапруження окремих органів і систем, що виникає у відповідь на тривале навантаження на одні і ті самі нервово-м'язові групи;
- біологічні чинники ( мікроорганізми)- збудники заразних хвороб, що передаються від тварини людині.

У разі тривалої дії на організм високих концентрацій пилу можуть розвинутися хвороби легенів і дихальних шляхів; під впливом високих рівнів вібрації, виникає вібраційна хвороба, внаслідок дії шуму - захворювання органів слуху - неврит, хімічних речовин - отруєння.

До професійних хвороб, які в умовах виробництва зустрічаються частіше, ніж звичайно, належать бруцельоз, сибірка, сарп, ящур та інші, що передаються людям від тварин, бронхіальна астма, хвороби шкіри (дерматози, екземи), хронічні захворювання нервово-м'язового апарату тощо. Як відомо, ці хвороби можуть бути і непрофесійними. Визначити їх походження може тільки лікар, який при обстеженні хворого обов'язково враховує його трудову діяльність.

Розрізняють гострі і хронічні професійні захворювання та отруєння. Хвороби, зумовлені тривалім, протягом багатьох років, вдиханням невеликих концентрацій пари хімічних речовин, пилу, газів, впливом на організм вібрації і шуму, як правило, мають хронічний характер і виникають поступово - через 10-15 і більше років роботи в несприятливих умовах. Наприклад, вібраційна хвороба розвивається за 15-20 і більше років у разі нехтування гігієнічними рекомендаціями.

Пряві перших ознак хронічного отруєння пестицидами при контакті з ними без суворого виконання профілактичних заходів можуть спостерігати вже через 2-3 роки. У тих рідкісних випадках, коли працюючі протягом одного

робочого дня зазнають короткочасного, часто випадкового, впливу великих концентрацій хімічних речовин або якогось іншого шкідливого чинника (високої температури, випромінювання тощо) і при цьому не користуються засобами індивідуального захисту або порушують інші правила безпеки, може виникнути так зване гостре професійне отруєння або захворювання. Так, у працівників сільського господарства можливе гостре отруєння гербицидами, сонячний удар під час польових робіт, електроофтальмія на зварювальних роботах. Проте робота в умовах впливу на організм шкідливих професійних чинників не завжди супроводиться розвитком професійної хвороби. У виникненні її відіграють кількість (доза) шкідливих речовин, які потрапляють в організм або рівень вібрації, шуму тощо; тривалість дії їх на працюючих; умови праці та побуту, які можуть зменшити вплив шкідливостей на здоров'я; індивідуальна чутливість сприймання людьми тих чи інших виробничих чинників.

Негативні зміни в організмі відбуваються тільки в тому випадку, якщо вплив несприятливого виробничого чинника перевищує безпечний для здоров'я працюючого рівень.

Для шкідливих хімічних речовин встановлено гранично допустимі концентрації у повітрі робочої зони і в атмосферному повітрі, у воді, продуктах харчування, ґрунті.

Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони - це такі концентрації, які при щоденній восьмигодинній дії на працюючих усього 80 робочого стажу не викликають у них захворювань або відхилень у стані здоров'я, що виявляються сучасними обстеженнями, безпосередньо в процесі або у віддалені строки.

При обґрунтуванні гранично допустимих концентрацій хімічних речовин враховується безпечність їх не тільки для нинішніх, а й для майбутніх поколінь. Встановлено гранично допустимі концентрації для всіх хімічних речовин, що використовуються з метою захисту сільськогосподарських рослин від шкідників

і хвороб, визначено гранично допустимі рівні для різних видів вібрації та шуму, які створюються сільськогосподарськими машинами. За додержанням цих гігієнічних нормативів повинні стежити не тільки органи державного санітарного нагляду (санітарно-епідеміологічні станції), а й власник с-г підприємства. Суворе дотримання гранично допустимих концентрацій хімічних речовин у повітрі робочої зони та рівнів шуму і вібрації, інших шкідливих для здоров'я чинників дає змогу запобігти виникненню професійних захворювань серед працівників сільського господарства [19].

### **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 5-х чинників: горючої речовини, окиснювача і джерела запалювача;
- за відсутності будь-якого зі згаданих чинників, або обмеженні його визначального параметра безпечною величиною, пожежа неможлива.

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

- попередження утворення горючого середовища;
- попередження виникнення у горючому середовищі або внесення в це середовище джерела запалювача.

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

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

Обмеження розповсюдження та розвитку пожежі, загалом, забезпечується: потрібного розкласом 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 відділів та секцій; улаштуванням аварійного відключення та перемикачів установок та комунікацій; використанням засобів, що запобігають або обмежують розлив і розтікання пожежонебезпечної рідини під час пожежі; використанням вогнеперешкоджаючих пристроїв в устаткуванні; локалізацією пожежі вогнегасними речовинами, автоматичними установками пожежогасіння, а також шляхом утворення розривів горючого середовища випалюванням вибуховими речовинами, розбиттям (видаленням) 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, організації 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, ко-ординацію державних, міжрегіональних заходів 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 [6].

#### **6.4 Інженерні рішення з охорони праці та техніки безпеки**

##### **Задача №1**

На робітника, впродовж зміни, діють п'ять біологічно небезпечних факторів:

1. Ефективно-еквівалентна температура повітря на робочому місці у теплий період року  $t=30^{\circ}$  (час дії фактора 480 хв)
2. Промисловий пил (наявність і кратність перевищення ГДК)- до 37 (час дії фактора 360 хв);
3. Вібрація (наявність і кратність плюс кількість децибел, що перевищують ГДР, дБ)- ГДР+8 (час дії фактора 300 хв);
4. Хімічні речовини (наявність і кратність перевищення ГДК)- 7
5. Теплове випромінювання –  $4000 \text{ Вт/м}^2$  (час дії фактора 206 хв).

У результаті проведення профілактичних заходів оцінка умов праці поліпшилася на 1 бал.

Визначити категорію важкості праці та можливе зростання продуктивності праці робітника.

#### Розв'язання

За таблицею критеріїв оцінки виробничих факторів (елементів умов праці) проставляємо бали небезпечним факторам до проведення працезахоронних заходів.

- Перший фактор – 4 бали;
- Другий фактор – 6 балів;
- Третій фактор – 5 балів;
- Четвертий фактор – 6 балів;
- П'ятий фактор – 6 балів.

Оскільки на робочому місці немає елементів, які отримали 1 і 2 бали, то враховуємо для визначення інтегральної оцінки всі елементи.

Уточнюємо величину балів розрахункових факторів із урахуванням їх фактичної тривалості згідно залежності (2) та відповідних рекомендацій.

#### Характеристика факторів умов праці

Фактор	Максимальна оцінка фактора, бал	Фактична тривалість дії фактора, хв	Фактична оцінка важкості

Визначаємо інтегральну бальну оцінку важкості праці до проведення заходів із поліпшення умов праці згідно залежності (1):

$$I_m^{до} = (x_{виз} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{6 - x_{виз}}{(n-1) \cdot 6}) \cdot 10$$

$$I_m^{до} = (6 + \frac{4 + 6 + 3,1 + 3,25 \cdot 6 - 6}{4} \cdot \frac{6 - 6}{6}) \cdot 10 = 60$$

Висновок: згідно табл.1 умови праці, до проведення заходів, відповідають V- категорій важкості робіт.

Після проведення профілактичних заходів оцінка умов праці поліпшилася на один бал.

Проставляємо бали небезпечним факторам після проведення працезохоронних заходів :

- Перший фактор – 3 бали;
- Другий фактор – 5 балів;
- Третій фактор – 4 бали;
- Четвертий фактор – 5 балів;
- П'ятий фактор – 5 балів.

Характеристика факторів умов праці

Фактор	Максимальна оцінка фактора бал	Фактична тривалість дії фактора, хв	Фактична оцінка важкості

Визначаємо інтегральну бальну оцінку важкості праці після проведення заходів із поліпшення умов праці згідно залежності :

$$I_m^{після} = (5 + \frac{5 + 3 + 2,5 + 2,7 \cdot 6 - 6}{4} \cdot \frac{6 - 6}{6}) \cdot 10 = 55,5$$

Згідно залежності (3) визначимо інтегральний показник працездатності до і після проведення заходів із поліпшення умов праці до поліпшення умов праці :

де  $K_{0,2}$  – коефіцієнт, який враховує вплив зростаючої працездатності на продуктивність праці.

На основі інтегрального показника важкості праці можна за прогнозувати рівень виробничого травматизму на підприємстві за формулою (6) :

$$T_v = \frac{1}{1,3 - 0,0185 \cdot L_m} = \frac{1}{1,3 - 0,0185 \cdot 55,5} = 3,7 \text{ раз.}$$

Висновок : Оскільки умови праці на підприємстві, після проведення заходів, відповідають V категорій важкості робіт далека і від оптимальних, то можливе зростання виробничого травматизму у 3,7 рази в порівнянні із I категорією важкості робіт.

**РОЗДІЛ 7**  
**ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ**  
**ДОСЛІДЖЕНЬ**

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що із збільшенням В/Ц глибина корозійних руйнувань збільшується. На глибину корозії має вплив склад бетону при збільшенні дрібнофракційного заповнювача по відношенню до в'язучого глибина корозії зростає. Було встановлений вплив концентрації азотної кислоти на глибину корозійних втрат. Дослідження показали, що зі збільшенням концентрації глибина корозійних руйнувань зростає.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dijk I.C., Moel P.I., Mooyen W.F.J.M., Nuiten P.G. Diffusie model voor zure aantasting van cementgebonden materialen // Tijdschr. Watervoort, en afvalwaterbehandel.- 1986. – № 20. – P. 482-487
2. Гречанюк В.Г. Фізична хімія і хімія силікатів: посібник – К.: Кондор. – 2006. – 434 с.
3. Дворкін Л.Й. Будівельні розчини: навч. посібник. Київ, Каравела. 2021. 222 с
4. Атрощенко В.Л., Каргин С.І. Технологія азотної кислоти. - М.: Хімія, 1970. - 496 с.
5. Глагол І.І. Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій.: Автореф. дис. канд. техн. наук: 06.10.04/ Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій. – Київ, 2004 -25с.
6. С.Г.Левченко, О.І. Полукаров, В. В.Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська Охорона праці та цивільний захист підручник, Київ: Основа, 2019. 472 с.
7. ДБН А.3.2-7-2009 «Охорона праці та промислова безпека у будівництві». НПАОП 401-1.07-01 (ДНАОП 1.1.10-1.07-01) Правила експлуатації електрозахисних засобів:
8. Л.Й. Дворкін. Гідротехнічні бетони : навч. посібник. Київ : Каравела. 2023. 285 с.
9. Кутєпов А.М., Бондарова Г.І., Беренгартен М.Г. Загальна хімічна технологія. - М.: Вища. шк., 1990. - 520 с.
10. М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс]: підручник для студ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
11. Бондар М. В., Горшеніна, А. О., & Гроздь, А. В. (2016). Улаштування та розрахунок системи електрохімічного захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів із бірних ребристих плит. ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2(47), 117-124.

12. Виробництво залізобетонних конструкцій і виробів: довідник/ під заг. Редакцією Гоца В.І.-К.: Основа, 2019. – 464 с.
13. І.М. Астрелін, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Я. ЛОБОЙКО. Технологія фосфоровмісних добрив, гислот і солей: Підручник Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2011.288 с.
14. Блажівський К.І. Буклів Р.Л. Хімічна технологія основних солей і мінеральних добрив. Частина 1: навчальний посібник. Львів. Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 220 с.
15. О.Г.Хоменко. Залізобетонні конструкції: навч. посібник. Глухів, 2017. 208 с.
16. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії
17. М. Д. Волошин, Я. М. Черненко, А. В. Іванченко М. А. Олійник. Технологія неорганічних речовин. Частина 3. Мінеральні добавки: навчальний посібник. Дніпродзержинськ : ДДУ, 2016. 354 с.
19. Показчик нормативно-правових актів з питань охорони праці (станом на 05,01,2015року(<http://www.dnpp.gov.ua/index.php/uk/normativna-baza/pokazhchik-праор-28-12-2012>))
20. Хімічна корозія бетону та її вплив. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zav.npug.com/docs/index-2815636.html?page=5>
21. ДСТУ Б В.2.7-32-95 «Будівельні матеріали. пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови»
22. ДСТУ Б В.2.7-43-95 «Гетони важкі. Технічні умови»
23. ДСТУ Б В.2.7-45-95 «Цементи загальнобудівельного призначення Технічні умови»
24. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск»
25. ДСТУ Б В.2.7-273 : 2011 «Вода для бетонів і розчинів.Технічні умови»
26. ДСТУ Б В.2.7-112-2002 «Цементи. Загальні технічні умови»
27. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Бетони.Правила підбору складу».