Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра технології будівельних виробів
і матеріалознавства

03-09-75М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з навчальної дисципліни
«Довговічність будівельних матеріалів»
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Технології
будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
денна форма навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з
якості ННІБА
Протокол № 8 від 20.06.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «Довговічність будівельних матеріалів» для здобувачів вищої освіти другого(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» денна форма навчання [Електронне видання] / Ніхаєва Л. І. – Рівне : НУВГП, 2023. – 62 с.

Укладачі: Ніхаєва Л. І., ст. викладач кафедри ТБВіМ.

Відповідальний за випуск: Дворкін Л. Й., д.т.н., проф., завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства.

Керівник ОПП Дворкін Л. Й.

© Л. І. Ніхаєва, 2023
© НУВГП, 2023

Практичні заняття передбачають розробку інженерних рішень щодо надійності і довговічності будівельних конструкцій і споруд, використовуючи дійсну в Україні нормативну базу.

Виконання завдань супроводжується зануренням у суміжні дисципліни, що доповнюють теми, та формує у студента інформаційну та комунікативну компетентності.

Інформаційну компетентність (розвиток вмінь студента до самостійного пошуку, аналізу, структурування та відбору потрібної інформації в області обстеження, огляду та випробування за допомогою сучасних інформаційних технологій).

Комунікативну компетентність (розвиток у студента навичок роботи в команді шляхом реалізації групових проектів в галузі будівництва, вміння презентувати власний проект та кваліфіковано вести дискусію у досліджуваній сфері).

ДОВГОВІЧНІСЬ І НАДІЙНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Довговічність – комплексна властивість, кількісно виражається тривалістю ефективного опору матеріалу усього комплексу впливів в експлуатаційний період роботи до відповідного критичного рівня. Довговічність будівельних виробів вимірюють терміном служби без втрати експлуатаційних якостей в конкретних кліматичних умовах і в режимі експлуатації. Наприклад, для залізобетонних конструкцій нормами передбачені три ступеня довговічності: 1-а - не менше 100 років, 2-а - не менше 50 років, 3-тя - не менше 20 років. Довговічність визначається сукупністю фізичних, механічних і хімічних властивостей матеріалу. Її потрібно оцінювати стосовно до конкретних умов експлуатації. Забезпечення довговічності будівельних матеріалів і конструкцій є однією з основних проблем підвищення ефективності будівництва. Різноманіття номенклатури матеріалів та умов їх експлуатації в промислових будівлях, транспортних спорудах та

інших об'єктах, у тому числі і спеціального будівництва, вимагає детального і глибокого вивчення хімічної стійкості цих матеріалів під впливом твердих, газоподібних або рідких агресивних середовищ. Знання причин і механізму руйнування різних матеріалів при експлуатації їх в агресивних середовищах дає можливість грамотно і ефективно здійснювати заходи захисту та підвищення довговічності будівельних конструкцій і виробів.

Надійність - прояв всіх властивостей матеріалів в процесі експлуатації. Надійність складається з довговічності, безвідмовності, ремонтопридатності і зберігання.

Безвідмовність - властивість вироби зберігати працездатність в певних режимах і умовах експлуатації протягом деякого часу без вимушених перерв на ремонт.

Ремонтопридатність - властивість виробу, що характеризує його пристосованість до відновлення справності і збереженню заданої технічної характеристики в результаті попередження, виявлення та усунення відмов.

Збереженість - властивість виробу зберігати обумовлені експлуатаційні показники протягом і після терміну зберігання і транспортування, встановленого технічною документацією. Збереженість оцінюють кількісно часом зберігання і транспортування до виникнення несправності.

Задачі дисципліни:

- враховувати фактори довговічності при проектуванні складу будівельних матеріалів:
- правильно вибирати параметри технологічних процесів виробництва будівельних матеріалів з урахуванням експлуатаційних умов;
- обирати технологічні та конструктивні методи захисту будівельних конструкцій від корозії та руйнівних впливів зовнішнього середовища.

1. ПРИКЛАДИ РОЗ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

1.1. Задачі на тему «Статистичний розрахунок параметрів надійності залізобетонних конструкцій»

Щоб точно обчислити показник довговічності, необхідно якнайбільше знати про всі фактори, які впливають на термін служби кожного елемента, мати надійні дані про інтенсивність впливу цих факторів. Для складних конструкцій будинків і споруд у цілому дуже важко теоретично розрахувати термін служби кожного еле-мента. Тому в основу розрахунку доцільно покласти статистичний розподіл термінів служби великого числа однотипних елементів будинків і споруд. Знаючи ряд розподілу термінів служби, можна побудувати функцію їхнього розподілу F(x). Для часового проміжку між α і β імовірність відмови конструкції визначається відповідно до залежності $P(\alpha\langle T_x\langle\beta) = F(\beta) - F(\alpha)$.

Більшість випадкових процесів описується нормальним законом розподілу, тобто передбачається рівномірна щільність розподілу випадкової величини f(x), що виражається формулою $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}$, а функція розподілу, виражена через щільність розподілу, має вигляд $F(x) = \frac{1}{2\pi}\int_0^x e^{-t^2/2}dx$. Тут $t = (x_i - T_{\bar{x}})/\sigma$.

Щоб розрахувати середній термін служби елементів будинків і споруд, необхідно просумувати терміни служби конструктивних елементів, які вийшли з ладу, і віднести цю суму до числа всіх обстежених елементів:

$$T_x = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i m_i}{m} (i = 1,2,\ldots,n), \qquad (1.1)$$

де T_x - усереднений термін служби даного елемента (математичне очікування); x_i - конкретний термін служби певного і-того

елемента; m_i - число елементів, що мають термін служби x_i ; m - загальна кількість елементів, що відмовили.

Іноді відношення m_i / m замінюють його наближеним значенням P_i , тобто імовірністю конкретного значення терміну служби. Тоді

$$T_x = \sum_{i=1}^{n} x_i P_i \ . \tag{1.2}$$

При встановленні термінів ремонту за міру відхилення конкретних термінів служби від їхнього середнього значення приймають дисперсію D_x:

$$D_x = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - T_{\bar{x}} \right)^2 P_i \ , \tag{1.3}$$

де x_i - конкретний термін служби певного і-того елемента; $T_{\bar{x}}$ - середній термін служби даного елемента; P_i - імовірність даного конкретного терміну служби x_i.

На практиці зручніше користуватися середньоквадратичним відхиленням, або стандартом терміну служби

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} \ . \tag{1.4}$$

Межі відхилення термінів служби від їх середніх значень визначаються з нерівності

$$Q \le P\left[x_i - T_{\bar{x}} \right] = D_x \ / Q^2 , \tag{1.5}$$

де $Q = x_i - T_{\bar{x}}$.

Якщо виразити Q через середньоквадратичні відхилення σ, надавши їм конкретний характер, наприклад, прийнявши Q = 2σ, тоді імовірність того, що термін служби елемента, який нас цікавить, відхилиться більш ніж на 2σ, складе

$$P = \left(\left[x_i - T_{\bar{x}} \right] \ge 2\sigma \right) \le \frac{\sigma^2}{4\sigma^2} = \frac{1}{4} \ .$$

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Встановимо закон розподілу терміну служби плит покриття в будинках фільтрувальних станцій. У результаті обстеження більш як 50 таких будинків, плити яких вийшли з ладу, отримані наступні дані:

Термін служби, X_i , років	5	7	10	15	20	25	30
К-сть будинків, де плити вийшли з ладу, m_x, штук	5	6	8	10	10	8	8

Середній термін служби плит (математичне очікування) знаходимо за формулою (1.1):

$$T_x = \frac{5\cdot 5+7\cdot 6+10\cdot 8+15\cdot 10+20\cdot 10+25\cdot 8+30\cdot 5}{5+6+8+10+10+8+5} = \frac{847}{52} = 16{,}3 \text{ роки}$$

Частота появи відмов (або, у першому наближенні, імовірність їхньої появи) $S_i \to P_i = m_i / m$. Наприклад, для $m_i = 5$ маємо $P_i = 5 / 52 = 0{,}096$.

Результати цих розрахунків такі:

m_i	5	6	8	10	10	8	5
Pi	0,096	0,115	0,154	0,192	0,192	0,154	0,096

Дисперсія обчислюється за формулою (1.3). У даному випадку для T_x=16,3 роки дисперсія

$$D_x = (5-16{,}3)^2\,0{,}096 + (7-16{,}3)^2\,0{,}115 + (10-16{,}3)^2\,0{,}154 + (15-16{,}3)^2\,0{,}192 +$$
$$+ (20-16{,}3)^2\,0{,}192 + (25-16{,}3)^2\,0{,}154 + (30-16{,}3)^2 = 3{,}63 \text{ роки}$$

Відповідно до формули (1.4) стандарт терміну служби $\sigma_x = \sqrt{3{,}63} = 1{,}9$ року.

Визначимо імовірність виходу з ладу плити на протязі перших 15 років.

$$t = (x_i - T_{\bar{x})} / \sigma = (15-16{,}3)/1{,}9 = -0{,}68;$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} = \frac{1}{\sqrt{2\cdot 3{,}14}} e^{-(-0.68)^2/2} = 0{,}317$$

Це означає, що з 100 випадків більш ніж у 31 очікується відмова на інтервалі від 0 до 15 років.

Визначимо імовірність того, що конкретний термін служби плит прийме значення 20 років, тобто на (20 - 16,3) = 3,7

роки більше середнього значення. При середньоквадратичному відхиленні σ_x=1,9 року це становитиме $3{,}7 / 1{,}9 \approx 2{,}0\sigma_x$. Імовірність такої події

$$P = \frac{D_x}{(2\sigma)^2} = \frac{\sigma^2}{(2\sigma)^2} = \frac{1}{4} = 0{,}25$$

Звичайно приймають, що конкретні значення терміна служби елементів будинків не виходять за межі $T_x \pm 3\sigma_x$.

Знаючи знос конструкцій будинків і споруд, який слід вважати ймовірністю їх виходу з ладу за певний термін, також можна вирішити ряд практичних задач. Для прикладу візьмемо матеріали (табл. 1), отримані при натурних обстеженнях основних несучих конструкцій виробничих будинків (фундаменти, стіни, плити покриття, підлога).

Таблиця 1

Результати натурних обстежень будівельних конструкцій

Кількість обстежених конструкцій	Час експлуатації, років	Знос, %	Кількість обстежених конструкцій	Час експлуатації, років	Знос, %
8	5	2,7	13	55	16,0
10	10	4,1	6	60	11,6
1	13	5,0	5	65	11,0
1	27	7,0	2	110	23,7
5	30	8,4	1	114	11,0
1	37	14,0			

Обчислимо середній термін служби конструкцій:

$$T_x = \frac{8\cdot 5\cdot 0{,}027+10\cdot 10\cdot 0{,}041+1\cdot 13\cdot 0{,}05+1\cdot 27\cdot 0{,}07+5\cdot 30\cdot 0{,}084+1\cdot 37\cdot 0{,}14+13\cdot 55\cdot 0{,}16+6\cdot 60\cdot 0{,}116}{8\cdot 0{,}027+10\cdot 0{,}041+1\cdot 0{,}05+1\cdot 0{,}07+5\cdot 0{,}084+1\cdot 0{,}14+13\cdot 0{,}16+6\cdot 0{,}116+5\cdot 0{,}11+2\cdot 0{,}237+1\cdot 0{,}11} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+5\cdot 65\cdot 0{,}11+2\cdot 110\cdot 0{,}237+1\cdot 114\cdot 0{,}11}{5{,}216} = \frac{282{,}09}{5{,}216} = 54{,}1 \text{ року}$$

Імовірність появи відмов, наприклад, для часу експлуатації τ = 5 років буде $P_i = 8 \cdot 0{,}027 / 5{,}216 = 0{,}041$. Для решти термінів служби аналогічно обчислимо:

τ_i	5	10	13	27	30	37	55	60	65	110	114
P_i	0,041	0,079	0,010	0,013	0,081	0,027	0,399	0,133	0,105	0,091	0,021

Дисперсія

$D = (5 - 54,1)^2 \cdot 0,041 + (10 - 54,1)^2 \cdot 0,079 + (13 - 54,1)^2 \cdot 0,01 + (27 - 54,1)^2 \times \times 0,013 + (30 - 54,1)^2 \cdot 0,081 + (37 - 54,1)^2 \cdot 0,027 + (55 - 54,1)^2 \cdot 0,399 + (60 - 54,1)^2 \times 0,133 + (65 - 54,1)^2 \cdot 0,105 + (110 - 54,1)^2 \cdot 0,091 + (114 - 54,1)^2 \cdot 0,021 = 711,0.$

Стандарт терміну служби

$\sigma = \sqrt{711,0} = 8,93$ року.

Далі обчислення виконують аналогічно до попередньої задачі.

1.2. Задачі на тему «Водонепроникність бетону»

Водонепроникність бетону – це здатність штучного каменю не пропускати вологу під певним тиском. Позначається за допомогою символу W і парних цифр в діапазоні від 2 до 20, які позначають тиск в МПа • 10 -1, при якому фрагменти бетону висотою і діаметром 0,15м витримують натиск води і не пропускають її через себе.

Фактори, що впливають на показник

На показник водонепроникності впливає велика кількість чинників. Дана властивість визначається специфічною капілярно-пористою структурою матеріалу. У більш щільному бетоні міститься мінімальна кількість пор, тому водонепроникність в ньому вище.

Причинами великого обсягу пор можуть бути недостатньо ущільнений склад, усадка або зайва вода. Усадка бетонної суміші і зниження її обсягу відбуваються в процесі висихання і

затвердіння. Висока інтенсивність усадки може статися від недостатнього армування і випаровування води під дією факторів навколишнього середовища.

Характер пористості змінюють повітровтягуючі добавки. Пори закриваються і стають більш непроникними.

Високу водонепроникність має матеріал на глиноземному і високоміцному цементі. При гідратації ці різновиди приєднують більше води і утворюють щільний камінь.

Водонепроникність бетону залежить від добавок. Так сульфати алюмінію і заліза підвищують ступінь ущільнення суміші. Це досягається за рахунок вібрації, пресування і видаленням води за допомогою вакууму. Що стосується пуццоланового портландцементу, то його високий показник непроникності залежить від наявності пуцоланових добавок і їх набухання.

Наступним фактором, що впливає на показник, є вік штучного каменю. З віком підвищується кількість гідратних новоутворень, що призводить до підвищення водонепроникності.

У практиці проектування складу бетону можливе використання двох нормативних характеристик водонепроникності:

1. Найбільший тиск води (атм. або МПа), який може витримати стандартний зразок діаметром 150 мм, без появи на його відкритій стороні ознак просочування води.
2. Коефіцієнт фільтрації бетону, який характеризує кількість води, що проникає через одиницю перетину за одиницю часу при градієнті (відношенні напору водяного стовпа до товщини конструкції), рівному одиниці.

Залежно від першого показника розрізняють так звані марки бетону за водонепроникністю (W2, W4 і т.д. до W12), де числа показують тиск води в атм.

Марку бетону за водонепроникністю безпосередньо визначають методом "мокрої плями", який полягає в тому, що до 6 дослідних зразків ступенями по 0,2 МПа (2 атм) прикладають з одного боку надлишковий тиск води протягом 1…5 хв. і витримують на кожному ступені певний час (табл. 2). Випробування проводять до тих пір, поки на вільній сухій поверхні

не менше як трьох зразків з'являться прояви фільтрації у вигляді краплин чи мокрої плями. Марка бетону за водонепроникністю дорівнює максимальному тиску води, при якому на чотирьох із шести зразків не спостерігали просочування води.

Таблиця 2

Параметри випробувань бетонних зразків на водонепроникність

Найбільша крупність зерен заповнювача бетону, мм	40	20	10	5
Мінімальна висота зразка, мм	150	100	50	30
Час витримки на кожному ступені, год	16	12	6	4

Залежно від марки за водонепроникністю і водопоглинанням бетон поділяють на групи за щільністю (табл. 3).

Таблиця 3

Групи бетону за щільністю

Вид	Умовне позначення	Марка за водонепроник-ністю	Водпоглинання, % за масою	В/Ц, не більше
Нормальний	Н	W4	5,7...4,8	0,6
Підвищеної щільності	П	W6	4,7...4,3	0,55
Особливо щільний	О	W8	4,2 і менше	0,45

Марка бетону за водонепроникністю носить дещо умовний характер. Значно більш науково обгрунтованим показником водонепроникності є коефіцієнт фільтрації $\boldsymbol{K_ф}$ (см/с), який згідно ДСТУ Б В. 2.7-170:2008 визначається з рівняння:

$$K_ф = \eta \frac{Q\delta}{S\tau P}, \qquad (1.6)$$

де Q - вага фільтрату, Н; δ - товщина бетонного зразка, см; S - площа зразка, см^2; τ - час фільтрації, с; Р - надлишковий тиск води, МПа; η - коефіцієнт, який враховує в'язкість води (η=1, 13; 1 і 0,89 відповідно при t=15; 20 і 25°С).

У формулі (1.6) можна використовувати розмірності системи СІ, але при цьому тиск Р слід виразити в метрах водяного стовпчика (0,1 МПа = 10 м вод. ст.), а під Q розуміти об'єм фільтрату у м^3. Результат, зрозуміло, буде мати розмірність м/с.

Коефіцієнт фільтрації бетону має кореляційний зв'язок із маркою за водонепро-никністю, який згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 наведений у табл. 4.

Таблиця 4

Зв'язок між маркою бетону за водонепроникністю і коефіцієнтом фільтрації

Коефіцієнт фільтрації $К_ф$, (см/с)	Марка бетону за водонепроникністю
Понад $7 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-8}$	W2
Понад $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	W4
Понад $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	W6
Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	W8
Понад $6 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	W10
$6 \cdot 10^{-11}$ і менше	W12

При визначенні коефіцієнта фільтрації згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008до шести зразків прикладають ступенями по 0,2 МПа тиск води до тих пір, доки на сухій поверхні зразків не з'являться ознаки фільтрації у вигляді краплин. Потім через кожні 30 хв. не менше шести разів вимірюють вагу фільтрату, який пройшов через зразки, а далі визначають коефіцієнт фільтрації окремих зразків за формулою (1.5) та бетону в цілому.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Визначимо марку бетону за водонепроникністю, якщо при випробуванні за 3 год.($\tau = 3 \cdot 3600 = 1{,}08 \cdot 10^4$ с) через товщу стандартного циліндричного зразка висотою 150 мм (δ = 0,15 м)

просочилось 1,2 см^3(Q = 1,2 · 10^{-6} м^3) води, а гідравлічний тиск при випробуваннях дорівнював 1,0 МПа(Р=1,0 МПа=100 м вод. ст.)?

Приведемо розмірність даних задачі до системи СІ.

Для визначення марки бетону за водонепроникністю обчислимо його коефіцієнт фільтрації $K_ф$ за формулою (1.6)

$K_ф = \eta \frac{Q\delta}{S\tau P}$, де $S = \pi d^2 / 4$.

Отже $K_ф = 4\eta Q\delta / (\pi d^2 \tau P) = 4 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15 / (3,14 \cdot 0,15^2 \cdot 1,08 \cdot 10^4 \cdot 100) = 9,44 \cdot 10^{-12}$ м/с$= 9,44 \cdot 10^{-10}$ см/с

За табл.4 знаходимо, що бетон задовільняє вимогам марки W6.

Перевіримо, чи задовільняє вимогам водонепроникності безнапірна залізобетонна труба довжиною L = 6 м, товщиною 50 мм(δ = 0,05 м) та внутрішнім діаметром 600 мм, (D = 0,6 м), якщо через її стінку при тиску 0,6 МПа(Р= 0,6 МПа = 60 м вод. ст.) просочилось за добу($\tau = 24 \cdot 3600 = 8,64 \cdot 10^4$ с) 80 кг(Q = 80 л $= 8 \cdot 10^{-2}$ м^3) води. Допустимий коефіцієнт фільтрації становить $7 \cdot 10^{-9}$ см/с($K_{ф, max} = 7 \cdot 10^{-11}$ м/с)·?

Приведемо розмірність даних задачі до системи СІ.

то труба задовільняє вимогам водонепроникності.

Обчислимо фактичний коефіцієнт фільтрації $K_ф$ бетону за формулою (1.6). Під площею зразка розуміємо площу бокової поверхні циліндра з діаметром, який дорівнює середньому діаметру труби, тобто D+d / 2. Тоді

$S = \pi(D+d/2) L = 3,14 (0,6+0,05/2) \cdot 6 = 11,75$ м^2.

Отже $K_ф = \eta Q\delta / (S\tau P) = 1 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,05 / (11,75 \cdot 8,64 \cdot 10^4 \cdot 60) = 6,57 \cdot 10^{-11}$ м/с

Оскільки $K_{ф, факт} = 6,57 \cdot 10^{-11}$ м/с $< K_{ф, max} = 7 \cdot 10^{-11}$ м/с ,

то труба задовільняє вимогам водонепроникності.

Розглянемо таку задачу:

З умови міцності отримали наступний номінальний склад бетону: Ц=395 кг/м^3; В=210 л/м^3; Щ=1180 кг/м^3; П=690 кг/м^3. З умови корозійної стійкості у проекті споруди передбачено

застосувати особливо щільний бетон з В/Ц≤ 0,45. Як відкоригувати наведений склад бетону за рахунок введення мікронаповнювача - золи ТЕС з дійсною густиною $\rho_з$=2,1 г/см^3, щоб забезпечити необхідне В/Ц без перевитрати цементу? Яка перевитрата цементу буде у випадку, якщо не вводити мікронапов-нювач? Для розрахунків прийняти $\rho_ц$=3,1 г/см^3; $\rho_п$=$\rho_щ$=2,65 г/см^3; $\rho_{нщ}$=1450 кг/м^3.

За умовою задачі водоцементне співвідношення з умови міцності складе В/Ц == 210 : 295 = 0,53. З умови довговічності (В/Ц)' = 0,45. Тоді необхідна кількість мікронаповнювача - золи, дорівнюватиме:

$$Д = \frac{В/Ц - (В/Ц)'}{(В/Ц)'} Ц = \frac{0{,}53 - 0{,}45}{0{,}45} \cdot 395 = 70 \text{ кг}.$$

Без введення добавки витрата цементу $Ц_1$ = В : (В/Ц)' = 210 : 0,45 = 467 кг.

Тоді за рахунок введення золи отримали економію цементу ΔЦ = 467-395 = 72 кг або

72 : 467 = 0,154 = 15,4%.

Далі, знаючи загальну витрату в'яжучого Ц+Д = 395+70 = 465 кг, знаходимо коефіцієнт розсуву зерен заповнювача цементним тістом α=1,43 і далі витрату заповнювачів за відомими формулами методу абсолютних об'ємів.

1.3. Задачі на тему "Швидкість протікання корозії бетону"

Розглянемо найпростіший спосіб підрахунку терміну служби бетонних і залізобетонних конструкцій при дії води під напором для оцінки ступеня небезпеки корозії першого виду.

Введемо наступні позначення:

q_{CaO} - кількість вапна (в перерахунку на CaO), яка може бути видалена з одиниці об'єму бетону без втрати ним основних технічних властивостей;

$v_{об}$ - кількість води, яка фільтрується за одиницю часу через одиницю поверхні бетону;

c_{CaO} - середня концентрація вапна у воді (в перерахунку на CaO) за час служби конструкції;

L - товщина конструкції, через яку фільтрує вода;
H - напір води.

Тоді тривалість фільтрації води до досягнення виносу q_{CaO} (тобто строк служби конструкції) τ дорівнюватиме

$$\tau = q_{CaO} L /(v_{об} c_{CaO}), \quad (1.7)$$

де $v_{об} / L$ - так звана об'ємна швидкість води, тобто кількість води, яка фільтрується за одиницю часу через одиницю об'єму бетону.

Значення q_{CaO} може бути визначене на підставі даних про склад бетону при заданому допустимому відсотку вилуговування вапна K. Останній, як правило, прий-мають рівним 10...20% щоб втрата міцності бетону не перевищила 15…20%.

Тоді

$$q_{CaO} = KЦ\alpha, \quad (1.8)$$

де $Ц$ - вміст цементу в бетоні (змінюється в межах $Ц = 220...600$ кг/м^3, при невідомому складі бетону можна приймати в середньому $Ц = 300$ кг/м^3) ; α - вміст CaO в цементі, долі одиниці (для портландцементу α =0,65).

При повільній фільтрації можна вважати, що буде досягатись насичення розчину вапном, тобто c_{CaO} дорівнює розчинності вапна у воді (1,2 г/л або 1,2 кг/м^3). Якщо вилуговування йде з поступовою зміною концентрації CaO, необхідно прийняти середню чи середньозважену концентрацію CaO за період вилуговування при наявності відповідних даних.

Об'ємну швидкість води зручно визначати з формули

$$v_{об} = K_ф \Delta H, \quad (1.9)$$

де $\Delta H = H / L$ - градієнт напору.

Розв'язавши останню формулу відносно $K_ф$, можна визначити необхідну марку бетону за водонепроникністю (за максимально допустимим коефіцієнтом філь-трації), при якій забезпечується заданий строк служби конструкції при певному напорі води.

З точки зору руйнування конструкції від дії сульфатів (корозія третього виду) можна допустити, що вміст сульфатів (в перерахунку на SO_4^{-2}) у цементному камені не повинен перевищити певну допустиму межу K_1, яку за даними обстеження конструкцій будівель і споруд як правило приймають рівною K_1 = 0,1. Тоді гранично допустима кількість сульфатів, яка може бути внесена в одиницю об'єму переродженого (зруйнованого дією сульфатів) поверхневого шару бетону товщиною L_x дорівнює

$$q_{so_4^{-2}} = \beta Ц L_x / L \,. \qquad (110)$$

Тоді строк служби конструкції в умовах сульфатної корозії становитиме

$$\tau = q_{SO_4^{-2}} L /(v_{об} c_{SO_4^{-2}}), \qquad (1.11)$$

де $c_{SO_4^{-2}}$ - концентрація сульфатів (в перерахунку на SO_4^{-2}) у воді, яка омиває бетон.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Визначимо, яку марку (W) за водонепроникністю з умови стійкості проти корозії першого виду повинен мати гідротехнічний бетон, через який здійснюється постійна фільтрація води під напором 10 м вод. ст.(H=10 м) через товщу конструкції 50 см (L=0,5 м), якщо повинен бути забезпеченим мінімальний строк експлуатації 100 років($\tau = 100 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 3{,}154 \cdot 10^9$ с). Орієнтовна витрата цементу на 1 м^3 бетону становила 350 кг(Ц=350 кг/м^3).

Приведемо розмірність даних задачі до системи СІ.

Вимоги до водонепроникності (щільності) бетону зручно представити у вигляді гранично допустимого коефіцієнта фільтрації бетону $K_ф$. З формули (1.9) маємо

$$K_ф = v_{об} / \Delta H = v_{об} L / H$$

З формул (2.7) і (2.8) маємо: $v_{об} = КЦ\alpha L /(\tau c_{CaO})$

Остаточно маємо (при К=0,1; α=0,65; c_{CaO}=1,2 кг/м^3):

$$K_ф = \frac{КЦ\alpha L^2}{\tau c_{CaO} H} = \frac{0{,}1 \cdot 350 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}5^2}{3{,}154 \cdot 10^9 \cdot 1{,}2 \cdot 10} = 1{,}5 \cdot 10^{-10} \text{ м/с} = 1{,}5 \cdot 10^{-8} \text{ см/с}$$

За табл. 4 встановлюємо, що необхідна марка бетону за водонепроникністю W2.

Виходячи з даних попередньої задачі, визначимо необхідну марку бетону за водонепроникністю в умовах сульфатної агресії при середній концентрації сульфатів (в перерахунку на SO_4^{-2}) $c_{SO_4^{-2}}$ =400 мг/л = 0,4 кг/м^3 і допустимій товщині переродженого шару L_x = 5 см = 0,05 м.

З формул (1.9…1.11) маємо:

$$К_ф = \frac{\beta ЦL_x L}{\tau c_{SO_4^{-2}} H} = \frac{0{,}1 \cdot 350 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}5}{3{,}154 \cdot 10^9 \cdot 0{,}4 \cdot 10} = 6{,}9 \cdot 10^{-11} \text{ м/с} = 6{,}9 \cdot 10^{-9} \text{ см/с}$$

.

За табл. 4 встановлюємо, що необхідна марка бетону за водонепроникністю W4.

1.4. Задачі на тему "Вплив мінералогічного складу цементу на довговічність бетону "

Мінералогічний склад цементу не тільки визначає міцність бетону, але і суттєво впливає на інтенсивність протікання корозії усіх видів, на екзотермію бетону, на ряд інших властивостей, які визначають його довговічність. Зокрема, кількість вільного $Ca(OH)_2$, яке зумовлює корозію першого та другого виду, залежить в першу чергу від вмісту аліту (C_3S) у цементі, при гідратації якого і виділяється вапно за рівнянням:

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 . \quad (1.12)$$

Певна кількість вапна також виділяється і при гідратації беліту (C_2S)

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 , \quad (1.13)$$

однак вона суттєво менша, тому часто її не враховують.

Для підвищення корозійної стійкості бетону вільне вапно слід зв'язати активним кремнеземом, при цьому можна допустити утворення однокальцієвого гідросилікату:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 = CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O . \quad (1.14)$$

Стійкість цементу і бетону на його основі до корозії третього виду залежить, в першу чергу, від вмісту трьохкальцієвого алюмінату. У сульфатному середовищі в першу стадію проходить так звана гіпсова корозія, наприклад, за рівнянням

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH. \quad (2.15)$$

Легкорозчинний у воді NaOH швидко вимивається з бетону, а утворення дво-водного гіпсу приводить до деякого збільшення об'єму продуктів реакції, а також до збільшення концентрації іонів SO_4^{2-} та Ca^{2+}. Останнє приводить до більш небезпечної другої стадії корозії - сульфоалюмінатної, на якій із твердого гідрату C_3A утворюється гідросульфоалюмінат кальцію (етрингіт), об'єм якого більш ніж у 2 рази перевищує об'єм вихідних речовин:

$$3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 23H_2O = 3CaSO_4 \cdot 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 31H_2O \quad (2.16)$$

Одним із заходів запобігання корозії третього виду є застосування сульфато-стійкого портландцементу з обмеженим вмістом трьохкальцієвого алюмінату (не більше 5%) та аліту (не більше 50%). Сумарний вміст C_3A та C_4AF у такому цементі також обмежений на рівні 22%.

Для масивних гідротехнічних чи транспортних споруд небезпечним є високе тепловиділення цементу у ранньому віці, яке може привести до розтріскування бетону внаслідок швидкого випаровування води. Тепловиділення (екзотермію) цементу у віці ***n*** діб можна приблизно оцінити за залежністю

$$q_n = a_n C_3S + b_n C_2S + c_n C_3A + d_n C_4AF, \quad (1.17)$$

де C_3S, C_2S, C_3A і C_4AF - вміст у %% відповідних мінералів цементного клінкеру;

a_n , b_n , c_n , d_n - коефіцієнти тепловиділення мінералів, наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Питоме тепловиділення мінералів цементного клінкеру, Дж/к a_n , b_n , c_n , d_n г

Тривалість твердіння, діб	a_n	b_n	c_n	d_n
3	3,89	0,666	6,36	-0,499
7	4,57	0,967	8,67	-1,73
28	4,78	0,641	9,63	0,59

При відомому хімічному складі клінкеру його мінералогічний склад можна розрахувати за формулами В.А.Кінда:

$$C_3S = 3{,}8\ SiO_2\ (3КН - 2)\ ; \quad (1.18)$$

$$C_2S = 8{,}6\ SiO_2\ (1 - КН)\ ; \quad (1.19)$$

$C_3A = 2{,}65\ (Al_2O_3 - 0{,}64Fe_3O_4)$ і $C_4AF = 3{,}04\ Fe_3O_4$ при ГМ > 0,64; (1.20)

$C_3A = 1{,}7\ (Fe_3O_4 - 1{,}57\ Al_2O_3)$ і $C_4AF = 4{,}77\ Al_2O_3$ при ГМ < 0,64 , (1.21)

де коефіцієнт насичення дорівнює

$$КН = (CaO - 1{,}65\ Al_2O_3 - 0{,}35\ Fe_3O_4) / (2{,}8\ SiO_2)\ , \quad (1.22)$$

а глиноземний модуль

$$ГМ = Al_2O_3 / Fe_3O_4\ . \quad (1.23)$$

У формулах (1.18…1.23) під позначеннями оксидів розуміють їх процентний вміст у клінкері.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Для спорудження підводної частини греблі намічено застосувати бетон на пор-тландцементі з мінеральними добавками (типу II). Мінералогічний склад клінкеру наступний:

C_3S - 56%, C_2S - 25%, C_3A - 7%, C_4AF - 11%. Визначити співвідношення “клінкер : активна мінеральна добавка”, при якому весь $Ca(OH)_2$, який виділяється при гідратації аліту, буде зв’язаний у однокальцієвий гідросилікат. У якості добавки використовують опоку з вмістом активного SiO_2 = 75%.

Визначимо кількість вільного вапна, яке виділиться при гідратації аліту, який міститься у 1 кг клінкеру. При цьому відповідно до умови задачі кількість аліту, який вступає у реакцію гідратації, складе 1· 0,56 = 0,56 кг = 560 г. За рівнянням (1.12):

$$\underset{2 \cdot 228 \text{ г/моль}}{2(3CaO \cdot SiO_2)} + 6H_2O = \underset{3 \cdot 74 \text{ г/моль}}{3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O} + \underset{m_1}{3Ca(OH)_2}\,.$$
$$\underset{560 \text{ г}}{}$$

$x = 560 \cdot 3 \cdot 74 / (2 \cdot 228) = 272{,}6$ г $Ca(OH)_2$.

Тут молярні маси реагуючих речовин дорівнюють:

$M_{3CaO \cdot SiO_2} = 3(40+16)+(28+2 \cdot 16) = 228$ г/моль;

$M_{Ca(OH)_2} = 40+2(16+1) = 74$ г/моль;

Далі за рівнянням (1.14) визначимо кількість активного кремнезему, який необхідний для зв'язування 272,6 г $Ca(OH)_2$:

$$\underset{74 \text{ г/моль}}{Ca(OH)_2} + \underset{60 \text{ г/моль}}{SiO_2} = CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O\,.$$
$$\underset{272{,}6 \text{ г}}{}\quad \underset{m_2}{}$$

$m_2 = 272{,}6 \cdot 60 / 74 = 221{,}1$ г активного SiO_2 .

Необхідна кількість опоки $m_{оп.} = 221{,}1 : 0{,}75 = 294{,}8$ г.

Співвідношення "клінкер : опока" = 1000 : 294,8 = 3,4 : 1.

1.5. Задачі та тему »Корозійна стійкість бетону»

Корозія бетону – це незворотне погіршення його властивостей в результаті хімічного, фізико-хімічного, біологічного впливу оточуючого середовища або під дією агресивних агентів, які вносяться з компонентами бетонної суміші при її виготовленні.

Середовище, у якому експлуатується матеріал, з позиції його агресивності прийнято класифікувати на неагресивне (Н), слабко - (Сл), середньо – (Ср) і сильноагресивне (Си) (табл.1.6).

Таблиця 1.6

Ступінь впливу агресивного середовища на бетон протягом 1 року

Показники корозії	Ступінь агресивності середовища			
	Н	Сл	Ср	Си
Зниження міцності, %	немає	менше 5	5...20	більш 20
Зовнішні ознаки	-	Слабке поверхневе руйнування	Ушкодження кутів або волосяні тріщини	Яскраво виражене руйнування

Ступінь агресивного впливу зовнішнього середовища визначається його хімічним складом і комплексом факторів, що характеризують умови контакту середовища і бетону.

Корозійна стійкість бетону безпосередньо зв'язана з його щільністю, а остання з водонепроникністю (табл.1.7).

Таблиця 1.7

Показники щільності бетону

Бетон	Марка за водонепроникністю	Водопоглинання, % по масі	Максимально допустиме В/Ц
Нормальної щільності (Н)	W4	4,7...5,7	0,6
Підвищеної щільності (П)	W6	4,2...4,7	0,55
Особливо щільний (О)	W8	До 4,2	0,45

Види корозії бетону класифікують за назвою агресивних речовин (В.В. Кінд) і механізмом агресивного впливу середовища (В.М. Москвін). В другому випадку класифікація є більш загальною.

По класифікації В.М. Москвіна *до корозії $I^{го}$ виду* відносяться процеси, зв'язані з вилуговуванням вапна (точніше $Ca(OH)_2$) з бетону, внаслідок його більшої розчинності у воді порівняно з іншими гідратами. В даний час до корозії I виду відносять усі процеси, пов'язані з розчиненням у воді речовин, що входять у бетон.

Корозія $II^{го}$ виду обумовлена протіканням обмінних реакцій між продуктами гідратації цементу і кислотами або солями, що впливають на бетон. Найбільш характерними різновидами

корозії II^{го} виду є *вуглекисла, кислотна і магнезіальна корозія*. У результаті впливу кислот утворюються солі кальцію, звичайно добре розчинні у воді. Кислоти взаємодіють насамперед з гідроксидом кальцію, а потім з гідросилікатами кальцію. Поряд з добре розчинними солями, що вимиваються з бетону, при корозії цього виду можливе утворення маломіцних аморфних мас $SiO_2 \cdot nH_2O$, $Al(OH)_3$ та ін.

Вуглекисла корозія призводить до зниження величини pH порової рідини і закисних властивостей бетону по відношенню до стальної арматури.

Корозія III^{го} виду розвивається в бетоні від внутрішніх напружень при нагромадженні в порах і капілярах малорозчинних солей. Це може бути як результатом кристалізації продуктів хімічних реакцій, так і процесу кристалізації при поглинанні солей з агресивних розчинів.

Найбільш розповсюдженою корозією цього виду є *сульфатна корозія*, що відбувається в цементному камені під впливом аніонів SO_4^{2-}, зв'язаних з катіонами Na^+, Ca^{2+} і Mg^{2+}. У ґрунтових водах звичайний вміст SO_4^{2-} не перевищує 60 мг/л, у морський – може досягати 2500...2880 мг/л. Для бетону нормальної щільності на портландцементі сульфати, що утримуються у воді-середовищі, здійснюють слабкий агресивний вплив при концентрації іонів SO_4^{2-} уже понад 300 мг/л, а сильний - понад 500 мг/л. Різновидами сульфатної корозії є *сульфоалюмінатна і гіпсова корозія*. Кристалізація $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ має місце тільки при концентрації SO_4^{2-} більше 300 мг/л. У присутності іонів кальцію кристалізація $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ починається при більш низьких концентраціях $CaSO_4$у розчині.

Випробування корозійної стійкості бетону полягає у порівнянні показників зразків, що знаходились в агресивному середовищі зі значеннями аналогічних показників у неагресивному середовищі.

Корозійна стійкість бетону може бути визначена:

за зміною хімічного складу бетону в часі (кінетичний метод);

за зміною міцнісних властивостей бетону, його динамічного модуля пружності;

за зміною величини лінійних деформацій бетону.

Основні показники, які рекомендуються (ДСТУ БВ.2.7-145:2010) вибирати для оцінювання корозійної стійкості бетону, наведені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Показники, що визначаються при випробуваннях бетону на корозійну стійкість

Показники зразків	Основні показники агресивних середовищ					
	Жорсткість, ммоль	pH	Вуглекислий газ CO_2	агресивний іон		
				Mg^{2+}	NH_4^+	SO_4^{2-}
Зовнішній вигляд зразків	+	+	+	+	+	+
Маса, кг/м^3	+	+	+	+	+	+
Об'ємні зміни,%	-	(+)	-	(+)	-	+
Динамічний модуль, МПа (м·с$^{-1}$)	+	+	+	+	+	+
Міцність при стиску, МПа	+	+	+	+	+	+
Міцність на розтяг при згині, МПа	+	+	+	+	+	+
Водонепроник-ність або коефі-цієнт фільтрації	+	+	+	+	+	+
Загальна пористість, %, об'ємна	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Вміст залежно від відстані від поверхні зразку, % маси цементу SO_3	-	-	-	-	-	(+)
Mg^{2+}	-	-	-	(+)	-	-
Ca^{2+}	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-
Глибина пошкодження, мм	+	+	+	+	(+)	-
Глибина нейтралізації бетону, мм	+	+	+	+	+	+

Примітка. Знак "+" вказує на обов'язковість визначення; знак "(+)" – визначати додатково; знак "-" – визначати не потрібно.

Розміри зразків, які випробовуються на корозійну стійкість, наведені в табл.1.9, рекомендована концентрація агресивних розчинів – у табл. 1.10.

Таблиця 1.9

Розміри зразків

Розміри	Розміри, мм, зразків бетону з найбільшою крупністю заповнювача	
	до 5	більше 5
Основні	40×40×160	100×100×100
Рекомендовані	20×20×120	40×40×160
	10×10×60	70×70×280
	Ø 50×50	Ø150×150

Примітка. При необхідності допускається застосування зразків інших розмірів.

Рекомендована концентрація агресивних середовищ приведена в табл. 1.10.

Таблиця 1.10

Рекомендована концентрація агресивних середовищ

Види корозії та показники агресивності	Одиниці виміру	Концентрація	
		основна	допустима
Кислотна	pH	3	4; 5
Вуглекисла, CO_2	мг·л$^{-1}$	80	40
Магнезіальна, Mg^{2+}	мг·л$^{-1}$	10000	5000; 2000
Амонійна, NH_4^+	мг·л$^{-1}$	2000	1000; 500
Сульфатна, SO_4^{2-}	мг·л$^{-1}$	10000	34000; 3000; 1000

Примітка. При корозії вилуговування використовують дистильовану воду з подальшим кип'ятінням.

Як неагресивне середовище приймають питну воду. Співвідношення об'єму агресивного розчину в см^3 до 1 см^2 поверхні зразка приймається не менше 5:1. Тривалість випробувань приймають 1; 3; 6; 12 міс. Концентрація агресивного середовища не повинна змінюватись більше ніж на 5%, можливе відхилення температури ±3° С. Результати випробувань оцінюють залежно від зміни обраних показників з урахуванням виду корозії.

При випробуванні корозійної стійкості бетону в агресивному середовищі вимірюють швидкість корозії і розраховують *глибину корозійного руйнування* бетону:

$$\Gamma_p = \frac{\sum P_{CaO}}{Ц\beta}, \qquad (1.24)$$

де $Ц$ – маса цементу в 1 см^3 зразка, г/см^3;
β – вміст CaO в цементі за результатами хімічного аналізу;
$\sum P_{CaO}$ – кількість прореагувавшого цементного каменю у перерахунку на CaO, віднесена до площі реагуючої поверхні зразків, г/см^3.

Для визначення $\sum P_{CaO}$ можна використати залежність:

$$\sum P_{CaO} = \pm a + K\sqrt{\tau}, \qquad (1.25)$$

де a – стала величина, яка враховує вплив процесів, що протікають у початковий період випробувань;
К – експериментальний показник, що визначається як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис, г/см$^2\sqrt{\tau}$ (константа корозійного процесу).

При відомому значенні коефіцієнта К глибину руйнування бетону можна розрахувати за формулою:

$$\Gamma_p = \frac{K\sqrt{\tau}}{Ц\beta}, \qquad (1.26)$$

де τ – час, для якого прогнозується глибина руйнування бетону.

Тривалість служби конструкції до руйнування шару заданої глибини, τ, роки:

$$\tau = \left(\frac{\Gamma_p Ц\beta}{K}\right)^2 \cdot \frac{1}{365}. \qquad (1.27)$$

Якщо необхідно розрахувати глибину руйнування при корозії в дифузійно-кінетичній області, застосовують формулу:

$$\Gamma_p = \frac{\upsilon\tau}{Ц\beta}, \qquad (1.28)$$

де υ – швидкість корозії в дифузійно-кінетичній області.

Розрахунок довговічності бетону в сульфатних середовищах може бути виконаний, виходячи з теоретичних закономірностей кінетики гетерогенних процесів за умови відомих значень про накопичення небезпечної (руйнівної) кількості сульфатів у цементному камені бетону та даних про накопичення сульфатів за час досліджень зразків відомого складу в сульфатному середовищі певної концентрації. Розрахунки здійснюють за формулами:

$$\sqrt{\frac{\tau_o}{\tau}} = \frac{Q}{\sum P_{SO_3}}, \tag{1.29}$$

$$\tau_o = \left(\frac{Q}{\sum P_{SO_3}} \right)^2 \cdot \tau, \tag{1.30}$$

де τ_o – можливий строк експлуатації бетону конструкцій, років; τ – тривалість досліджень, років;

Q – руйнівна кількість сульфатів SO_3, % від маси цементу;

$\sum P_{SO3}$ – кількість сульфатів, що накопичилися у зразках за час досліджень, (% маси цементу).

Кількість сульфатів Q, яка викликає руйнування бетону залежно від типу цементу, можна приймати за табл. 1.11.

Таблиця 1.11

Руйнівна кількість сульфатів у цементному камені бетонів

Тип цементу	Кількість сульфатів, % маси цементу, що викликає руйнування бетону за SO_3
Сульфатостійкий ПЦ (C_3A не більше 5%)	12
Середньоалюмінатний ПЦ (C_3A не більше 7%)	9
Високоалюмінатний ПЦ (C_3A більше 7%)	6

За прискореними випробуваннями у сульфатному середовищі високої концентрації можна розрахувати кількість сульфатів $\sum P_{SO_3}$, що накопичилися у зразках для даної концентрації агресивного середовища:

$$\sum P_{SO_3} = \sqrt{\frac{C}{C_o}} \cdot P^o_{SO_3} \qquad (1.31)$$

де $\sum P^o_{SO_3}$ – кількість сульфатів, що накопичилися у зразках за час випробувань у сульфатному середовищі заданої концентрації, % маси цементу;

C_o і C – експериментальна концентрація сульфатного агресивного середовища та фактична концентрація сульфатного середовища, для якого необхідно виконати прогноз руйнування бетону, моль/л.

При розробці технології та проектуванні складів бетону, що забезпечують тривалу безремонтну експлуатацію конструкцій у газоповітряних середовищах, виникає задача оцінити дифузійну проникність бетону для вуглекислого газу. Знання цієї характеристики дозволяє розраховувати період, протягом якого відбувається нейтралізація захисного шару бетону в газоповітряному середовищі, і оцінювати збережуваність сталевої арматури в залізобетонних конструкціях, а також призначати склади бетону для експлуатації в атмосфері із заданим вмістом вуглекислого газу.

Ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в бетоні D, $см^2/с$ розраховують за формулою:

$$D = \frac{m_0 x^2}{2c\tau}, \qquad (1.32)$$

де x – середнє значення товщини нейтралізованого шару бетону, см;

c – концентрація вуглекислого газу в камері у відносних одиницях;

τ – тривалість впливу вуглекислого газу на бетон, с;

m_0 – реакційна ємність бетону у відносних одиницях.

Величину m_0 можна приблизно розрахувати за формулою:

$$m_0 = 0{,}4ЦРС_н, \qquad (1.33)$$

де *Ц* – витрата цементу, г в 1 $см^3$ бетону;

P – кількість основних оксидів у цементі у перерахунку на CaO (орієнтовно P=0,6);

$C_н$ – ступінь нейтралізації бетону.

Більш точний розрахунок m_0 виконується за даними хімічного аналізу кількості зв'язаного вуглекислого газу у зовнішньому і внутрішньому шарах бетону, % маси.

Глибину карбонізації бетону X за час τ у повітряному середовищі розраховують за формулою:

$$X = \sqrt{\frac{2DC}{m_0}}, \qquad (1.34)$$

де C – концентрація вуглекислого газу.

Для прискореного визначення захисної дії бетону по відношенню до сталевої арматури застосовують електрохімічні методи. Вони базуються на оцінюванні пасивуючого впливу бетону на сталеву арматуру і отриманні залежності густини електричного струму від електричного потенціалу сталевої арматури (*потенціодинамічний метод*) або значення потенціалу арматури в бетоні від густини струму (*гальванодинамічний метод*). Отримані результати порівнюються зі встановленими критичними значеннями.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Визначити глибину руйнування зразків цементного розчину до кінця випробувань.

Зразки цементного розчину (склад 1:2,5 при В/Ц=0,40) з двох цементів протягом 180 діб випробовували у дистильованій воді. За цей період відбулося вилуговування цементного каменю в перерахунку на ΣP_{CaO}: у зразках з цементу №1 – 0,036 г/см^2, у зразках з цементу №2 – 0,021 г/см^2. Вміст цементу у зразках 0,581 г/см^3. Цемент №1 з вмістом CaO – 61,5%, цемент №2 –62,5%.

Глибину руйнування розчину визначаємо за формулою (1.24):

$$\Gamma_p = \frac{0.036}{0.581 \cdot 0.615} = 0.10 см - цемент№1,$$

$$\Gamma_p = \frac{0{,}021}{0{,}581 \cdot 0{,}625} = 0{,}058 см - цемент№2$$

Розрахувати глибину руйнування бетону за 20 років соляною кислотою 0,1м концентрації.

Склад бетону: В/Ц=0,5, витрата цементу 450 кг/м^3, вміст CaO у цементі 65%. За результатами випробувань зразків бетону вказаного складу в 0,1 м соляної кислоти протягом 180 діб визначаємо константу корозійного процесу К=2,27·10^{-2}г/(см^2 діб$^{1/2}$).

Розрахунок проводимо за формулою (1.26):

$$\Gamma_p = \frac{2.27 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{7300}}{0.45 \cdot 0.65} = 6.6 см.$$

Розрахувати час руйнування шару бетону 3 см при дії на нього розчину соляної кислоти 0,01 м концентрації.

Витрата цементу в бетоні 400 кг/м^3, В/Ц=0,4. Вміст CaO у портландцементі – 63%.

Зразки бетону даного складу випробовували протягом 150 діб. К=7,3·10^{-3} г/(см^2·діб$^{1/2}$).

Розрахунок проводимо за формулою (1.27):

$$\tau = \left(\frac{3 \cdot 0.40 \cdot 0.63}{7.3 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{365} = 29.3 років.$$

Розрахувати строк руйнування бетону в сульфатному середовищі з концентрацією іону SO_4^{2-} – 2000мг/л.

Зразки бетону з маркою за водонепроникністю W4 з портландцементу з вмістом C_3A=8% протягом року випробовувалися у розчині сульфату натрію з концентрацією іону SO_4^{2-} – 10000 мг/л; кількість накопичених у зразках

сульфатів $\sum P^{o}_{SO_4^{2-}}$ складає 3,13% від маси цементу. Концентрація розчину з вмістом іону SO_4^{2-} – 10000 мг/л складає 0,114 моль/л, концентрація розчину з вмістом іону SO_4^{2-} – 2000 мг/л складає 0,0228 моль/л.

За формулою (1.31) визначаємо кількість сульфатів, що накопичилися у бетоні при концентрації іону SO_4^{2-} – 2000 мг/л:

$$\sum P_{SO_3} = \sqrt{\frac{0.0228}{0.114}} \cdot 3.13 = 1.4\%.$$

За формулою (1.30) з урахуванням даних табл. 1.11 визначаємо строк руйнування бетону.

$$\tau_o = \left(\frac{6}{1{,}4}\right)^2 \cdot 1 = 18{,}3 \textit{років}.$$

Розрахувати глибину карбонізації бетону з коефіцієнтом дифузії вуглекислого газу $1 \cdot 10^{-4}$ см^2/с і реакційною ємністю 43,2 за 50 років при концентрації вуглекислого газу у повітрі 0,03% (відносна величина $3 \cdot 10^{-4}$).

За формулою (1.34) визначаємо:

$$X = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-4} (50 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600)}{43{,}2}} = 1{,}48 \, см.$$

Знайти ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу у бетоні.

Зразок бетону за 14 діб зберігання у камері з концентрацією вуглекислого газу 12% за об'ємом карбонізувався на глибину 1,7 см. Хімічним аналізом проб бетону встановлено, що в середньому 1 см^3 бетону поглинув 47 см^3 вуглекислого газу.

Ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в карбонізованому бетоні дорівнював за формулою (1.32):

$$D = \frac{47 \cdot (1.7)^2}{2 \cdot 0.12 \cdot 14 \cdot 24 \cdot 3600} = 5 \cdot 10^{-4} см^2 / с.$$

1.6. Задачі на тему "Морозостійкість бетону"

Морозостійкість бетону - це його здатність зберігати фізико-механічні властивості при багатократному впливі попеременного заморожування і відтаюванні в насиченому водою чи сольовим розчином стані, а також при тривалій дії низьких температур. Морозостійкість залежить, в основному, від щільності та порової структури бетону, зокрема від співвідношення відкритих і замкнених пор.

Кількісним критерієм морозостійкості бетону є його марка. Згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96 за марку за морозостійкістю (F) приймають встановлене число циклів попеременного заморожування і відтаювання, при якому допускається зниження міцності на стиск бетону не більш ніж на 5%, а для бетону дорожних і аеродромних покриттів, крім того, втрата маси не більш ніж на 3 %.

Щоб забезпечити необхідну марку за морозостійкістю, слід обмежити капілярну пористість бетону, зокрема шляхом зниження водоцементного відношення. У табл. 1.12 наведені гранично допустимі В/Ц в залежності від марки за морозостійкістю.

Таблиця 1.12.

Гранично допустимі В/Ц з умови морозостійкості бетону

Марка за морозостійкістю	$В/Ц_{max}$	Марка за морозостійкістю	$В/Ц_{max}$
F100	0,60	F400	0,45
F200	0,55	F500	0,40
F300	0,50		

Слід, однак, відмітити, що досягти марку більше F200 тільки обмеженням В/Ц як правило не вдається. У цих випадках слід додатково вводити повітряновтягувальні добавки для створення резерву замкнутих пор у бетоні.

Для прогнозування морозостійкості запропоновано ряд залежностей. Зокрема для бетону без повітряновтягувальних добавок можна використати запропоноване Г.І. Горчаковим емпіричне рівняння

$$F = (14 - П_к)^{2.7}, \quad (1.35)$$

де $П_к = \frac{В - 0.5\alpha Ц}{1000}$ - капілярна пористість бетону; ***В*** і ***Ц*** - витрата води та цементу на 1 м^3 бетону відповідно, α - ступінь гідратації цементу, яку можна орієнтовно обчислити за формулою

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{xR_б}{238}}, \quad (1.36)$$

де $x = \left(\frac{В/Ц}{(В/Ц)_{ц.к}}\right)^n$, а В/Ц і $(В/Ц)_{ц.к.}$ - водоцементне відношення відповідно в бетоні і цементному камені оптимальної структури; n - показник ступеня, який залежить від виду заповнювача і визначається за табл. 1.13. Величину $(В/Ц)_{ц.к.}$ можна приймати рівною нормальній густоті цементного тіста.

Таблиця 1.13

Значення показника ступеня n у формулі (1.36)

Різновид крупного заповнювача	Порфировая структура бетону	Контактна структура бетону
Вапняковий щебінь	0.62	0.56
Гранітний щебінь	0.68	0.63
Природний гравій	1.13	1.08
Керамзитовий гравій	2.48	2.31

Для бетонів з емульгованим повітрям Л.Й.Дворкіним запропонована залежність $F = K(10^{F_к} - 1)$, (1.37)

де коефіцієнт К залежить від особливостей цементу, а компенсаційний фактор

$$F_к = \frac{V_е + V_к}{V_л}, \quad (1.38)$$

де $V_е$, $V_к$ і $V_л$ - відповідно об'єми емульгованого повітря, контраційних пор та льоду при температурі -20^{0}С в одиниці об'єму бетону.

ДСТУ Б В.2.7-47-96 встановлює три основні методи контролю морозостійкості бетону:

- перший - для всіх бетонів, крім бетону дорожних і аеродромних покриттів ;
- другий - для бетонів дорожних і аеродромних покриттів і для прискореного контролю морозостійкості інших бетонів;
- третій - для прискореного контролю морозостійкості бетонів дорожніх і аеродромних покриттів і інших бетонів.

Співвідношення між кількістю циклів за різними методами наведене у табл. 1.14, а умови випробувань зразків - у табл. 1.15.

Таблиці 1.14

Співвідношення між кількістю циклів випробувань за різними методами

Метод	Марка бетону за морозостійкістю										
	F50	F75	F100	F150	F200	F300	F400	F500	F600	F800	F1000
	Число циклів, після яких слід проводити випробування зразків на стиск *										
перший	50	75	75 і 100	100 і 150	150 і 200	200 і 300	300 і 400	400 і 500	500 і 600	600 і 800	800 і 1000
другий	8	13	20	20 і 30	30 і 45	45 і 75	75 і 110	110 і 150	150 і 200	200 і 300	300 і 450
третій	-	2 (-)	3 (5)	4 (10)	5 (20)	8 (35)	12 (55)	15 (80)	19 (105)	27 (155)	35 (205)

* - кількість циклів вказана для всіх бетонів, окрім бетонів дорожних і аеродромних покриттів. Для останніх кількість циклів випробувань за другим (основним) методом дорівнює кількості циклів випробувань для інших бетонів за першим

методом, а кількість циклів випробувань за третім методом вказана в дужках у відповідному рядку таблиці.

Таблиця 1.15

Умови випробувань зразків на морозостійкісті

Метод	Розміри ребра зразків	Середовище насичення до випробування	Умови випробувань: середовище, температура (^{0}C), тривалість циклу (год)		К-сть зразків	
			заморожування	відтаювання	контрольних	основних
1-ий	100, 150, 200 *	вода	повітря; -18±2; 2,5 | 3,5 | (5,5) **	повітря; 18±2; 2±0,5 | 3±0,5 | (5±0,5)**	3	6
2-ий	100, 150	5-% розчин NaCl	повітря; -18±2; 2,5 | 3,5 **	5-% розчин NaCl; 18±2; 2±0,5 | 3±0,5 **	3	6
3-ій	70	5-% розчин NaCl	5-% розчин NaCl; від -10 до -(50…55); 2,5 | 2,5 | 1,5 ***	5-% розчин NaCl; 18±2; 2,5±0,5	6	6

* - тільки для зразків бетонів гідротехнічних чи транспортних споруд;

** - відповідно для кубів з розміром ребра 10 \| 15 \| (20) мм;

*** - відповідно тривалість зниження температури від -10^{0}C до -50^{0}C \| тривалість витримки

при -(50…55)^{0}C \| тривалість підняття температури від -50^{0}C до -10^{0}C

Контрольні зразки через 2…4 год. після насичення випробовують на стиск. Основні зразки (по 3 для першого і другого методів та по 6 для третього методу) випробовують на стиск після вказаної у табл. 8 кількості циклів заморожування і відтаювання. Для зразків бетонів дорожних і аеродромних покриттів також визначають масу кожного основного зразка перед та після випробувань на морозостійкість.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Визначимо, яке водоцементне відношення - з умови міцності чи морозостійкості слід прийняти при розрахунку складу бетону класу В20 і марки за морозостійкістю F100, якщо використовується цемент марки 500 і рядові заповнювачі? Чи можна застосувати цемент нижчих марок і яких?

Водоцементне відношення з умови міцності визначимо із відомої формули Боломея-Скрамтаєва $R_б = AR_ц (Ц/В - 0,5)$, звідки

$$В / Ц = \frac{AR_ц}{R_б + 0,5AR_ц}, \qquad (1.39)$$

де А=0,6 для рядових заповнювачів, а $R_б$ можна прийняти рівним $R_б = В/0,778$.

У нашому випадку $R_б = 20 / 0,778 = 25,7$ МПа, тоді з умови міцності

$$В / Ц = \frac{0,6 \cdot 50}{25,7 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 50} = 0,74.$$

За табл. 1.12 з умови морозостійкості $В/Ц_{max} = 0,6$. Отже при розрахунку складу бетону приймаємо В/Ц = 0,6 з умови морозостійкості, яке нижче ніж В/Ц=0,74 з умови міцності. Тому можна зменшити марку цементу. Мінімальна його активність з формули Боломея - Скрамтаєва дорівнює (при $Ц/В = 1 / (В/Ц) = 1 / 0,6 = 1,67$):

$R_ц = R_б / [A (Ц/В - 0,5)] = 25,7 / [0,6 \cdot (1,67 - 0,5)] = 36,6$ МПа.

Приймаємо цемент марки М400.

Визначимо марку дорожного бетону за морозостійкістю, якщо при стандартному випробуванні його за другим методом отримали такі результати для кубиків з ребром 10 см:

Кількість циклів Випробувань	Контрольні зразки			Зразки, що випробовуються		
	Руйнівне навантаження, кН / Маса після (до) випробувань, кг					
0	210	229	222	-	-	-
200	-	-	-	228 / 2,34 (2,40)	217 / 2,28 (2,35)	203 / 2,36 (2,38)
300	-	-	-	192 / 2,35 (2,50)	186 / 2,34 (2,55)	190 / 2,26 (2,40)

Середня міцність контрольних зразків:

$R_к = \Sigma P_i / (nA) = 10 \cdot (210 + 229 + 222) / (3 \cdot 10 \cdot 10) = 22,0$ МПа ,

де n - кількість зразків, А - площа одного зразка, см^2, а коефіцієнт 10 перед сумою P_i враховує перехід від розмірності в кН/см^2 до МПа.

Середня міцність основних зразків після 200 циклів:

$R_{200} = \Sigma P_i / (nA) = 10 \cdot (228 + 217 + 203) / (3 \cdot 10 \cdot 10) = 21,6$ МПа.

Втрата міцності $\Delta R_{200} = (22,0 - 21,6) / 22,0 = 0,018 = 1,8\% < 5\%$.

Середня втрата маси:

$$\Delta m_{200} = \frac{1}{n} \Sigma[(m_{0i} - m_i)/m_{0i}] = \frac{1}{3} [(2,40-2,34)/2,40 + (2,35-2,28)/2,35 + (2,38-2,36)/2,38] =$$

$= 0,021 = 2,1\% < 3\%$.

Таким чином, марка F200 забезпечена.

Виконаємо аналогічні обчислення для 300 циклів.

Середня міцність основних зразків після 300 циклів:

$R_{300} = \Sigma P_i / (nA) = 10 \cdot (192 + 186 + 190) / (3 \cdot 10 \cdot 10) = 19,3$ МПа.

Втрата міцності ΔR_{200} = (22,0 - 19,3) / 22,0 = 0,123 = 12,3% > 5%.

Середня втрата маси:

$$\Delta m_{300} = \frac{1}{3}[(2,50-2,35)/2,50 + (2,55-2,34)/2,55 + (2,40-2,26)/2,40] = 0,067 = 6,7\% > 3\%.$$

Отже морозостійкість F300 не забезпечується, тому бетон має марку F200.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ ГІДРОТЕХНІЧНОГО БЕТОНУ

Склад гідротехнічного бетону можна проектувати розрахунково-експериментальним методом Дворкіна Л.Й. – Шушпанова В.А. Даний метод дозволяє визначати склад бетону потрібної міцності та морозостійкості при заданій рухливості бетонної суміші та введенні пластифікуючих і повітряновтягувальних добавок.

1. Розрахунок потрібного вмісту повітря в бетоні заданої морозостійкості.

Із усіх видів пор в бетоні найбільший вплив на його морозостійкість мають:

– об'єм контракційних пор Vк(л/м3), які утворилися в результаті зменшення об'єму цементного каменю до 28 діб нормального твердіння бетону:

$$\mathbf{V_к = 120 \cdot Ц / \rho_ц}, \quad (2.1)$$

де $\mathbf{Ц}$ – витрата цементу, кг/м^3; $\rho_ц = 3100$ кг/м^3 – дійсна густина цементу;

– об'єм капілярних пор Vл (л/м^3), який характеризується об'ємом льоду в бетоні при стандартному методі визначення морозостійкості:

$$\mathbf{V_л = (B - 0,27 \cdot Ц)}, \quad (2.2)$$

де $\mathbf{B}$ – витрата води кг/м^3;

– об'єм повітря, емульгованого добавками ПАР Ve ($л/м^3$).

Об'єм емульгованого повітря знаходять як різницю між загальним вмістом повітря (V_o, $л/м^3$) та кількістю защемленого повітря ($V_з$) в нормально ущільненій бетонній суміші:

$$\mathbf{V_e = V_o - V_з} \ . \qquad (2.3)$$

Об'єм защемленого повітря залежить від осадки конуса (ОК, см) або жорсткості (Ж, с) бетонної суміші і найбільшої крупності заповнювача ($Д_{найб.}$) при даному способі ущільнення і визначається за графіком (рис.2.1.).

Структурний критерій морозостійкості:

$$\mathbf{F_к = \left(V_к + V_e\right) / V_л} \ . \qquad (2.4)$$

Прогнозування морозостійкості бетону (F, циклів) виконують за емпіричною залежністю:

$$\mathbf{F = К \cdot \left(10^{F_R} - 1\right)}, \qquad (2.5)$$

де **К** – коефіцієнт, який залежить від виду цементу і заповнювачів, і визначається за таблицею 2.1.

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнта К в залежності (2.5)

Вид заповнювача	Коефіцієнт К		
	Вміст C_3A у цементі, %		
	$C_3A \le$ 6%	$C_3A =$ 6…9%	$C_3A \ge$ 9%
Пісок кварцовий	425	365	304
Щебінь гранітний	198	170	142
Щебінь доломітовий	100	85	70
Гравій річковий	140	120	100

Необхідну кількість емульгованого повітря V_e ($л/м^3$) в бетоні заданої морозостійкості можна визначити шляхом перетворення виразів (2.4) і (2.5), з урахуванням формул для $V_к$ і $V_п$, рахуючи $\rho_ц = 3100$ $кг/м^3$:

$$\mathbf{V_e = Ц \cdot \left[\left(В/Ц - 0{,}27\right) \cdot F_к - 0{,}04\right]}, \qquad (2.6)$$

де $\mathbf{F_к = lg\left(F/К + 1\right)}$.

Кількість повітряновтягувальної добавки типу СНП чи СДО, потрібна для забезпечення необхідного вмісту емульгованого повітря, знаходиться за номограмою (рис. 2.2.).

Для лабораторного контролю загальний вміст повітря (л/м^3) у бетонній суміші можна визначити за формулою:

$$\mathbf{V_o = V_e + V_з}, \qquad (2.7)$$

де $\mathbf{V_e}$ визначається за формулою (5.18), а $\mathbf{V_з}$ за рис. 2.1.

2. Визначення основних компонентів бетонної суміші

При розрахунках за даним методом використовують формулу, яка враховує вплив емульгованого повітря:

$$\mathbf{R_б = A \cdot R_ц \cdot \left(Ц/\left(B + V_e\right) - 0{,}5\right) < 2 \cdot A \cdot R_ц}. \qquad (2.8)$$

З рівняння міцності бетону (2.8) знаходимо водоповітряноцементне відношення q:

$$\mathbf{q = \left(B - V_e\right)/Ц = A \cdot R_ц / \left(R_б + 0{,}5 \cdot A \cdot R_ц\right)}. \qquad (2.9)$$

Для бетонів різного марочного віку значення коефіцієнта А приймаємо рівним $\mathbf{A = К_τ \cdot A_{28}}$, де $\mathbf{A_{28}}$ – значення коефіцієнта А у віці 28 діб, яке визначається за таблицею 2.2., $\mathbf{К_τ}$ – коефіцієнт росту міцності бетону в часі, який визначається за таблицею 2.3.

Повітряноцементне відношення V_e/Ц знаходять перетворенням виразу (5.18):

$$\mathbf{V_e \,/Ц = \left(B/Ц - 0{,}27\right) \cdot F_к - 0{,}04}. \qquad (2.10)$$

Якщо V_e/Ц $\leq$ 0, то немає необхідності в повітряновтягувальній добавці.

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнта A_{28} за даними І.М.Грушко

Дрібний заповнювач		Крупний заповнювач			
		Гранітний фракційований або доломітовий щебінь	Фракційований гравій або рядовий щебінь	Рядовий гравій	Щебінь низької якості, забруднений
Пісок	Кварцовий пісок обкатаної форми зерен	0,60 0,63	0,55 0,56	0,52 0,55	0,50 —

	Рядовий пісок з вмістом пилуватих та глинистих частинок до 3%	0,63 0,66	0,58 0,61	0,35 0,38	0,52 —
	Чистий пісок з вмістом пилуватих та глинистих частинок до 1%	0,66 0,63	0,58 0,64	0,58 0,61	0,55 —
	Штучний пісок з рваною формою зерен	0,56 0,59	0,52 0,53	0,50 0,52	0,74 —
Піски з водопотребою	Кварцовий пісок обкатаної форми зерен	0,56 0,59	0,52 0,55	0,50 0,52	0,47 —
	Рядовий пісок з вмістом пилуватих та глинистих частинок до 3%	0,60 0,63	0,55 0,58	0,52 0,55	0,30 —
	Чистий пісок з вмістом пилуватих та глинистих частинок до 1%	0,63 0,66	0,58 0,61	0,55 0,58	0,52 —
	Штучний пісок з рваною формою зерен	0,66 0,69	0,61 0,64	0,58 0,61	0,55 —

Примітки: 1. В чисельнику наведені значення коефіцієнта A_{28} для рухливих бетонних сумішей, а в знаменнику – для помірно жорстких сумішей.

2. Для 90 і 180-добового марочного віку бетону значення коефіцієнта A_{28} необхідно помножити на відповідний коефіцієнт росту міцності за таблицею 2.5.

3. Водопотреба піску визначається за таблицею 2.7.

Водоцементне відношення визначають за формулою:

$$\mathbf{В/Ц = q - V_e \,/Ц}. \qquad (2.11)$$

Водопотребу бетонної суміші при відсутності емульгованого повітря $В_0$ приблизно визначають за таблицями 2.3. і 2.4.

Таблиця 2.3

Орієнтовна витрата води на 1м^3 бетонної суміші *

Марка суміші	Жорсткість за ГОСТ 10181.1-81, с	Рухомість, см	Витрата води, л^3/м при крупності, мм							
			Гравію				Щебеню			
			10	20	40	70	10	20	40	70
$Ж_0$	≥31	—	150	135	125	120	120	160	150	135
$Ж_1$	30…21	—	160	145	130	125	170	165	160	140

$Ж_2$	20…11	—	165	150	135	130	175	165	150	155
$Ж_3$	10…5	—	175	160	145	140	185	175	160	155
$П_1$	—	1…4	190	175	160	155	200	190	175	170
$П_2$	—	5…9	200	185	170	165	210	200	185	180
$П_3$	—	10…15	215	205	190	180	225	215	200	190
$П_4$	—	12…16	225	220	205	195	235	230	215	205

Примітка: * – суміші на цементі з нормальною густиною тіста 26…28% та піску з $М_{кр}$=2. При зміні нормальної густини цементного тіста на кожний відсоток в меншу сторону витрату води треба зменшувати на 3…5 л/м^3, у більшу - збільшувати на те ж значення. У випадку зміни модуля крупності піску у меншу сторону на кожні 0,5 його значення необхідно збільшувати, а в більшу сторону - зменшувати витрату води на 3…5 л/м^3. У випадку застосування при отриманні бетону пластифікуючих добавок витрата води, встановлена за таблицею 2.3. коригується з урахуванням значення коефіцієнта $К_п$, встановленого за таблицею 2.4.

Таблиця 2.4

Значення поправочного коефіцієнта $К_п$ до водовмісту бетонних сумішей при застосуванні пластифікуючих добавок

Рухомість бетонної суміші, см	Цементно-водне відношення			
	1,4	1,8	2,2	2,6
1…4	0,95/0.90	0,93/0.87	0,91/0.85	0,90/0.83
5…9	0,94/0.89	0,92/0.86	0,90/0.84	0,88/0.82
10…15	0,92/0.87	0,90/0.80	0,88/0.81	0,87/0.79
12…16	0,91/0.85	0,89/0.81	0,87/0.79	0,85/0.78

Примітка: У чисельнику наведенні значення $К_п$ при використанні добавки ЛСТ 0,25% від витрати цементу, а в знаменнику - добавки С-3 у кількості 0,7%.

З розрахунку зниження водопотреби бетонної суміші приблизно на 5 л/м^3 на кожний відсоток емульгованого повітря, уточнюють витрату води на 1 м^3 бетону:

$$\mathbf{В = В_о - 0{,}5 \cdot V_е = В_о \cdot \left[1 - 0{,}5 \cdot \left(V_е / Ц\right) / \left(В/Ц\right)\right]}. \quad (2.12)$$

Витрата цементу (кг/м^3):

$$\mathbf{Ц = В/(В/Ц)}. \qquad (2.13)$$

Кількість защемленого повітря визначають за рис. 2.1.

Об'єм емульгованого повітря: $\mathbf{V_e = Ц \cdot (V_e / Ц)}$.

Загальний вміст повітря розраховують за формулою (2.7).

Витрату повітряновтягувальної добавки визначають за номограмою на рис. 2.2.

Витрату крупного заповнювача визначають за формулою:

$$\mathbf{Щ(Г) = 1000 / \left(\alpha \cdot V_{пщ(г)} / \rho_{н.щ(г)} + 1 / \rho_{щ}\right)}. \qquad (2.14)$$

В даному випадку коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача бетонної суміші визначається в залежності від водоцементного відношення В/Ц і витрати цементного тіста

($\mathbf{ЦТ = В + Ц / \rho_ц}$, л/м^3) за таблицею 2.6.

Таблиця 2.5

Коефіцієнти росту міцності бетону на різних цементах(за даними ВНДІ ім. Б.Є.Вєдєнєєва)

Вид цементу	Коефіцієнт міцності бетону К у віці, діб			
	7	28	90	180
Алітові портландцементи	0,67…0,73	1,00	1,10…1,25	1,30…1,40
Звичайні портландцементи	0,60…0,70	1,00	1,15…1,35	1,30…1,50
Шлакопортландцемент з добавкою основних шлаків	0,40…0,50	1,00	1,35…1,65	1,55…1,90
Пуцолановий портландцемент з добавкою туфу	0,30…0,60	1,00	1,45…1,75	1,55…1,90
Пуцолановий портландцемент з добавкою опоки	0,50…0,60	1,00	1,25…1,55	1,40…1,65
Алюмінатні портландцементи	—	1,00	1,10…1,14	1,18…1,30

Таблиця 2.6

Оптимальне значення коефіцієнту α

	Водоцементне відношення, В/Ц

Витрата цементного тіста ЦТ, л/м^3	0,35	0,40	0,45	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
200	1,08	1,07	1,07	1,12	1,15	1,17	1,19	1,21
250	1,18	1,18	1,19	1,26	1,29	1,33	1,35	1,38
300	1,29	1,30	1,31	1,41	1,46	1,50	1,54	1,54
350	1,41	1,43	1,48	1,58	1,65	—	—	—
400	1,54	1,57	1,61	—	—	—	—	—

Примітки: 1. В таблиці 5.9. наведені значення α при використанні заповнювачів з порожнистістю в пухконасипному стані $V_п = V_щ = 40\%$, питомою поверхнею $U_п = 175$ см^2/см^3 і вмістом емульгованого повітря $V_e=0$.

2. Із зростанням V_e на 1% α зростає на 0,025.

3. Із зростанням порожнистості піску $V_п$ на 1% α зменшується на 0,014.

4. Із зростанням порожнистості крупного заповнювача $V_щ$ на 1% α зменшується на 0,01.

5. Із зростанням питомої поверхні піску $U_п$ на 10 см^2/см^3 α зменшується на 0,004.

6. Питома поверхня піску визначається за таблицею. 2.2

Таблиця 2.7.

Водопотреба і питома поверхня окремих фракцій кварцового піску

Показник	Розмір фракцій піску, мм					
	<0,14	0,14… ...0,315	0,315... ...0,63	0,63… ...1,25	1,25… ...2,5	2,5… ...5,0
Водопотреба за методом Баженова, $В_п$, %	25,85	12,42	6,58	3,17	1,94	1,76
Питома поверхня піску за усередненими даними А.Я.Яшвілі, см^2/см^3	691,65	341,85	174,9	87,45	49,02	19,61

Витрата дрібного заповнювача кг/м^3:

$$П = \left[1000 - \left(V_o + Ц/\rho_ц + В/\rho_в + Щ/\rho_щ\right)\right] \cdot \rho_п . \qquad (2.15)$$

3. Експериментальне уточнення розрахункового складу бетону з повітряновтягувальними добавками

На пробному замісі при розрахунковому складі бетону і постійному водоцементному відношенні шляхом регулювання водовмісту бетонної суміші добиваються необхідної легковкладальності. При цьому слід враховувати необхідне зменшення осадки конуса бетонної суміші з повітряновтягувальними добавками для заданої легковкладальності (таблиця 2.8.).

Таблиця 2.8

Осадка конуса бетонних сумішей однакової легковкладальності

Вид бетонної суміші	Осадка конуса ОК, см
Бетонна суміш без повітряновтягувальних добавок	2…4 4…8 8…12
Бетонна суміш з повітряновтягувальними добавками на звичайних пісках середньої крупності	1…3 3…6 6…10
Бетонна суміш з повітряновтягувальними добавками на дрібнозернистих пісках	1…2 2…5 5…8

При відкоригованій потребі повітря бетонної суміші виконують перерахунок складу і, регулюючи витрату повітряновтягувальної добавки, домагаються потрібного вмісту повітря при випробуванні на компресійному вимірювачі повітря. Прискорено відкоригувати вміст повітря можна порівнянням фактичної і розрахункової середньої густини. Розрахункова середня густина бетонної суміші (кг/м^3):

$$\rho_{\text{бет.сум}} = (\text{Ц} + \text{В} + \text{П} + \text{Щ})/1000. \qquad (2.16)$$

Цементно-водне відношення уточнюють шляхом виготовлення трьох серій зразків-кубів з відкоригованою витратою води і кількістю повітряновтягувальної добавки при різних витратах цементу в наступній серії: $Ц_1$ = Ц; $Ц_2$ = 0,9Ц; $Ц_3$ = 1,1Ц, де Ц = В/(В/Ц) – розрахункова витрата цементу при відкоригованій водопотребі бетонної суміші.

Після визначення міцності зразків в потрібному віці будують залежність $R_б$ = f(Ц/В), по якій коригують цементно-водне відношення, і отже, витрату цементу. Остаточні значення В/Ц і Ц повинні задовольняти проектним вимогам міцності і морозостійкості.

Приклад 1. Розрахувати гідротехнічний бетон марки F200 ($R_б$ = 20 МПа у віці 180 діб), ОК = 3 см. Вихідні матеріали: портландцемент М400 (C_3A=6%, НГ=26,5%); дрібний заповнювач – кварцевий пісок з водопотребою $В_п$=9,5%, дійсною густиною $ρ_п$=2,56 г/см^3, насипною густиною $ρ_{н.п.}$=1,42 т/м^3 і питомою поверхнею $S_п$=218см^2/см^3; крупний заповнювач – щебінь рядовий фракції 5-40 мм, дійсна густина $ρ_щ$=2,61 г/см^3, насипна густина $ρ_{н.щ.}$=1,45 т/м^3, повітряновтягувальна добавка – СНП.

Визначаємо коефіцієнт А відносно до 180-добового віку (табл. 2.2, 2.5):

$A = K_τ A_{28} = 1,4×0,55 = 0,77.$

Водоповітряноцементне відношення знаходимо за формулою:

$q = AR_ц/(R_б + 0,5AR_ц) = 0,77×40/(20+0,5×0,77×40) = 0,87.$

Визначаємо повітряноцементне відношення. За табл. 2.1 коефіцієнт К=170, а величину F_k знаходимо за формулою:

$F_k = lg(F/K + 1) = lg(200/170 + 1) = 0,336$, тоді

$V_e/Ц = F_k(q–0,27)–0,04 = 0,336(0,87–0,27)–0,04 = 0,16.$

Водоцементне відношення В/Ц = q – Ve/Ц = 0,87 – 0,16 = 0,71.

Для розрахунку водопотреби бетонної суміші (В) за табл. 2.3 знаходимо водопотребу ($В_о$) для бетонної суміші без повітряновтягувальних добавок $В_о$ = 165 + 10 = 175 кг/м^3, потім визначаємо потрібну кількість води (формула 2.12):

$В = В_о[1–0,5(V_e/Ц)/(В/Ц)] = 175(1– 0,5×0,16/0,75)=156$ кг/м^3.

Витрата цементу: Ц = В/(В/Ц) = 156/0,71 = 220 кг/м^3.

Визначаємо кількості емульгованого повітря:

$V_e = V_e/Ц · Ц = 0,16×220 = 35,2$ л/м^3 = 3,5%.

Загальна кількість повітря в суміші:

$V_о = V_e + V_з = 3,5 + 0,8 = 4,3\% = 43$ л/м^3 ,

де кількість защемленого повітря $V_з$=0,8% визначається за рис. 2.1.

Для визначення витрати щебеню визначаємо його порожнистість

$V_{пор.щ} = (\rho_{щ} - \rho_{н.щ.})/\rho_{щ} = (2,61 - 1,45)/2,61 = 0,44$,

і порожнистість піску:

$V_{пор.п} = (\rho_{п} - \rho_{н.п.})/\rho_{п} = (2,56 - 1,42)/2,56 = 0,45$.

Витрата цементного тіста ЦТ = $В_о$+Ц/$\rho_ц$ = 156+220/3,1=227 л/м^3.

Потім за табл. 2.6 при В/Ц = 0,75 з урахуванням поправок і інтерполяцій визначаємо

α = 1,24+0,025×3,5+0,014(0,45–0,40)-0,01(0,44–0,40) = 1,33.

Витрату щебеню визначаємо за формулою:

Щ = 1000/($\alpha V_{пор.щ.}/\rho_{н.щ.}$+1/$\rho_{щ}$) = 1000/(1,33×0,44/1,45 + 1/2,61) = 1271 кг/м^3.

Витрату піску визначаємо за формулою:

П = [1000–($V_о$+Ц/$\rho_ц$+В/$\rho_в$+ Щ/$\rho_{щ}$)]$\rho_п$ = [1000–(43+220/3,1 + 156/1,0 +1271/2,61)] ×2,56 = 622 кг/м^3.

Витрату повітряновтягувальної добавки СНП 0,09 кг/м^3 знаходимо за номограмою на рис. 2.2.

Завдання 2: *запроектувати склад гідротехнічного бетону з добавкою СНП для з/б конструкцій водогосподарського призначення згідно вихідних даних, наведених в таблиці. Характеристики заповнювачів взяти з прикладу 1.*

Конструкція	Клас бетону за міцністю	Марка бетону		Марка цементу
		за водонепроникністю	за морозостійкістю	
Труби напірні	В35	W8	F300	600
Труби безнапірні	В25	W4	F200	500
Кільця колодязів	В12,5	W2	F200	400
Елементи резервуарів	В15	W2	F200	400
Плити для лицювання каналів	В12,5	W4	F200	500
Плити дорожні	В25	W2	F400	500
Бруківка	В30	W2	F400	600
Бордюрний камінь	В30	W2	F200	500

2.2. Метод математичних моделей

На кафедрі ТБВіМ були отримані математичні моделі основних властивостей гідротехнічного бетону та бетонної

суміші з повітряновтягувальною добавкою при різних умовах твердіння. Вони, як і метод Дворкіна Л.Й. - Шушпанова В.А., дозволяють проектувати склад бетону заданої міцності і морозостійкості. У табл. 20 і 21 наведені основні квадратичні моделі для бетонної суміші і бетону нормального твердіння.

20. Властивості бетонної суміші

Властивість	Математична модель
Об'єм емульгованого повітря, %	V_e=2,27+0,72X_1 -0,63X_{10} -0,47X_3 +2,14X_4 -0,18X_5 -0,20 X_1^2 + + 0,24 X_{10}^2 + 0,17 X_3^2 - 0,22 X_4^2 - 0,09 X_5^2 + 0,71X_1X_4 - - 0,61$X_{10}X_4$ - 0,46X_3X_4 - 0,13X_3X_5 - 0,19X_4X_5
Водопотреба суміші, л/ м^3	B=169,2+26,4X_8 +13,4X_2 -20X_3 -8,3X_4 +9,3X_5 -5,2 X_8^2 + +5,8 X_2^2 +8,8 X_3^2 +2,8 X_4^2 +3,8 X_5^2 +1,0X_8X_3 +2,6X_8X_5 - -1,0X_2X_3 -3,1X_2X_4 +2,25X_2X_5 - X_3X_5 -X_4X_5
Оптимальна доля піску в суміші заповнювачів	r = 0,284 + 0,03X_1 - 0,039X_2 - 0,02X_3 + 0,009X_4 + 0,007 X_1^2 + +0,016 X_2^2 + 0,008 X_3^2 + 0,006 X_4^2 - 0,005X_1X_2 + 0,01X_1X_3 + +0,009X_4X_2 - 0,004X_3X_4 + 0,007X_4X_5

21. Властивості бетону нормального твердіння

Властивість	Математична модель
Міцність на стиск, МПа	R=36,93-1,88X_8+14,73X_2-3,62X_4-0,86X_5+4,97X_6+6,08X_9- -0,05 X_9^2 -1,85 X_8^2 -0,2 X_4^2 -0,3 X_5^2 +0,05 X_6^2 -0,8 X_9^2 - 0,61X_8X_4 - -0,45X_8X_5+1,23X_8X_6+0,97X_2X_4-0,63X_2X_5++2,12X_2X_6+ +2,14X_2X_9+ 0,99X_4X_6-0,46X_5X_6+0,88X_6X_9

Морозостійкість, цикли	$F=378,9-67,8X_1+162,3X_2+147,7X_4-27,4X_5+21,8X_6+63,2X_9+$ $+9,7X_8^2-38,8X_2^2+6,7X_4^2-9,8X_5^2+11,7X_6^2+2,2X_9^2+$ $+29,4X_2X_8+15,2X_8X_4-8,7X_8X_5-16,6X_8X_9+26,6X_2X_4-$ $-15,8X_2X_5+18,7X_2X_9+7,1X_4X_6+23,7X_4X_9+13,8X_6X_9$
Водонепроникність, МПа	$W=0,92+0,04X_8+0,56X_2+0,02X_4+0,01X_5+0,06X_6^2+0,25X_9^2-$ $-0,05X_8^2+0,08X_2^2-0,01X_4^2+0,004X_5^2+0,03X_6^2-0,02X_9^2+$ $+0,02X_8X_2+0,01X_8X_4-0,02X_8X_5+0,04X_2X_6+0,14X_2X_9$

Примітка: Формули для обчислення змінних $X_1 \ldots X_{10}$ (умови планування експерименту) наведені в табл.22.

22. Умови планування експерименту

Фактор		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
1	2				6
Початковий водовміст, л/м^3	$X_1=(B-180)/30$	50	80	10	30
Цементно-водне відношення (Ц/В)	$X_2=(Ц/В-2,1)/0,8$	,3	,1	,9	0,8
Максимальна крупність щебеню, мм	$X_3=(Д_{найб.}-40)/30$	0	0	0	30
Витрата добавки СНП, кг/м^3	$X_4=(Д-0,06)/0,06$		,06	,12	0,06

Продовження табл. 22

1	2				6

Нормальна густота портландцементу, %	$X_5=(НГ-27,2)/2,6$	4,6	7,2	9,8	2,6
Активність цементу, МПа	$X_6=(R_ц-41,2)/6,7$	4,5	1,2	7,9	6,7
Умовна легкоукладальність	$X_8=У-1$				1
Тривалість нормального твердіння, діб	$X_9=(lgT-lg79)/lg2,54$	8	9	80	2,54
Витрата цементу, кг/м^3	$X_{10}=(Ц-378)/144$	34	78	22	144

Примітка: Показник умовної легкоукладальності бетонної суміші У знаходили за шкалою:

умовний показник	(,6	(,4	1 ,8	2
	осадка конуса, см			
жорсткість, с	40 с	2 см 5 с	8 с	13 см 11 см

Порядок проектування складу бетону за пропонованим методом наступний:

- обчислюємо відповідно до табл. 22 кодовані значення технологічних факторів; знаходимо за табл. 23 об'єм емульгованого повітря, необхідний для забезпечення заданих властивостей;

- обчислюємо необхідну витрату добавки СНП за формулою $Д=0,06(1+X_4)$, де величину X_4 знаходимо з першої моделі табл. 20 при прийнятому раніше значенні $V_е$;

- розв'язуємо моделі з табл. 21 відносно X_2, вибираємо найбільше з отриманих значень і знаходимо цементно-водне відношення, яке забезпечує задані властивості, з умови $Ц/В=2,1+0,8X_2$;

- розв'язуємо другу модель з табл. 20 відносно X_1 та знаходимо водопотребу бетонної суміші з умови $В=180+30X_1$;

- знаходимо оптимальну долю піску в суміші заповнювачів, використовуючи третю модель з табл. 20;

- обчислюємо витрату цементу та заповнювачів за формулами:

$$Ц = В \cdot (Ц/В); \quad (3.17)$$

$$П = [1000-(Ц/\rho_ц+В)] \text{ r } \rho_ц; \quad (3.18)$$

$$Щ= [1000-(Ц/\rho_ц+В+П/\rho_п)] \rho_{щ} . \quad (3.19)$$

23. Орієнтовний вміст емульгованого повітря для гідротехнічного бетону

Властивості бетону			Необхідний об'єм емульгованого повітря, %
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	Морозостійкість, цикли	Водонепроникність, МПа	
20,0	F100		1,5...2,0
	F150	0,4...0,6	2,5...3,0
	F200	0,4...0,6	3,0...3,5
	F300	0,4...0,6	3,5...4,0
30,0	F200	0,6	1,5...2,0
	F300	0,6...0,8	2,5...3,0
	F400	0,6...0,8	3,5...4,0
40,0	F300	0,8... 1,0	3,0...3,5
	F400	0,8... 1,0	3,5...4,0
	F500	1,0...1,2	4,5...5,0

Примітка: 1. Мінімальні значення обсягу емульгованого повітря наведені для малорухливих сумішей з ОК=1...4 см, максимальні - для рухливих сумішей 10...15 см.

2. Для приведення нормованої міцності до віку 28 діб використовують коефіцієнти табл. 14.

Приклад 2. Запроектувати номінальний склад гідротехнічного бетону методом математичних моделей при вихідних даних прикладу 1.

Обчислимо кодовані значення технологічних факторів. Витрату води приймає-мо у першому наближення за табл. 15

(В=175 л/м^3). При розрахунку кількості повітря-новтягувальної добавки фактор X_{10} не враховуємо. Маємо:

X_1=(В-180)/30 = (175-180)/30 = -0,17;

X_3=($Д_{найб.}$-40)/30 = (40-40)/30 =0;

X_5=(НГ-27,2)/2,6 = (26,5-27,2)/2,6 = -0,27;

X_6=($R_ц$-41,2)/6,7 = (40-41,2)/6,7 = -0,18;

X_8=У-1 = 0,73-1 = -0,27;

X_9=(lgT-lg79) / lg2,54 = (lg180 - lg79)/lg2,54 = 1.

Далі розв'яжемо відносно фактора X_4 першу математичну модель з табл.20. При цьому за табл.23 знаходимо, що для $R_б$ = 20 МПа і F200 необхідно, щоб V_e=3%. Тоді:

$3,0 = 2,27+0,72\cdot(-0,17) + 2,14X_4 - 0,18\cdot(-0,27) - 0,2\cdot(-0,17)^2 - 0,22X_4^2 - 0,09\cdot(-0,27)^2 - 0,71\cdot(-0,17)X_4 - 0,19\cdot(-0,27)X_4 - 0,22X_4^2 + 2,07X_4 - 0,82 = 0$

X_4 = 0,42 (інший корінь квадратного рівняння X_4=9,0 не має фізичного змісту, оскільки кодовані значення факторів повинні лежати в інтервалі [-1;1] або незначно виходити за його межі).

Тоді витрата добавки СНП: Д = 0,06(1+0,42) = 0,085 г/м^3.

Розв'яжемо першу модель табл.21 (модель міцності на стиск) відносно X_2:

$20 = 36,93 - 1,88\cdot(-0,27) + 14,73X_2 - 3,62\cdot0,42 - 0,86\cdot(-0,27) + 4,97\cdot(-0,18) + 6,08\cdot1 - 0,05\cdot(-0,27)^2 - 1,85X_2^2 - 0,2\cdot0,42^2 - 0,3\cdot(-0,27)^2 - 0,05\cdot(-0,18)^2 - 0,8\cdot1^2 - 0,61\cdot(-0,27)$ x $0,42 - 0,45\cdot(-0,27)\cdot(-0,27) + 1,23\cdot(-0,27)\cdot(-0,18) + 0,97\cdot0,42X_2 - 0,63\cdot(-0,27)X_2 + 2,12\cdot(-0,18)X_2 + 2,14\cdot1\cdot X_2 + 0,99\cdot0,42\cdot(-0,18) - 0,46\cdot(-0,27)\cdot(-0,18) + 0,88\cdot(-0,18)\cdot1$

Маємо $- 1,85X_2^2 + 17,07X_2 + 20,4 = 0$; X_2 = -1,07.

Аналогічно, розв'язавши математичну модель морозостійкості бетону при F = = 200, маємо X_2 = -1,37. Вибираємо менше значення X_2 = -1,07 і обчислюємо

Ц/В = $2,1+0,8X_2$ = 2,1+0,8·(-1,07) = 1,24. (При цьому В/Ц=1 : (Ц/В) = 0,8).

Тоді за моделями з табл. 20 знаходимо водопотребу бетонної суміші:

$В=169,2+26,4(-0,27) +13,4(-1,07) -200 -8,30,42 +9,3(-0,27) -5,2(-0,27)^2+5,8(-1,07)^2+8,802+2,8\ 0,42^2+3,8(-0,27)^2+1,0(-$

0,27)0 +2,6(-0,27)(-0,27) -1,0(-1,07)0 -3,1(-1,07)0,42 +2,25 (-1,07)(-0,27) - 0(-0,27) -0,42(-0,27)= 151 кг/м^3

r = 0,284 + 0,03X_1 - 0,039(-1,07) - 0,020 + 0,0090,42 + 0,007(-0,17)^2+0,016(-1,07)^2+ 0,008·0^2 +0,006·0,42^2-0,005·9-0,17)(-1,07)+0,01(-0,17)0 +0,0090,42(-1,07) - 0,004·0·0,42 + 0,007·0,42(-0,27)= 0,34д

Тоді витрати компонентів обчислюємо за формулами (3,17)… (3,19).

Ц = В · (Ц/В) = 151·1,24 = 187 кг/м^3 < $Ц_{min}$ =220 кг/м^3. .Приймаємо Ц = 220 кг/м^3

П = [1000-(Ц/$\rho_ц$+В)] r $\rho_ц$ = [1000 – (220/3.1)+151)]·0.34·2.56 =667 кг/м^3

Щ= [1000-(Ц/$\rho_ц$+В+П/$\rho_п$)] $\rho_щ$ =

=[1000 - (220/3.1)+151+677/2.56)]2.61=1340 кг/м^3

Як бачимо, склад гідротехнічного бетону, обчислений за різними методами у прикладами 1 і 2 дуже близький.

4.САМОСТІЙНА РОБОТА

4.1. Теми рефератів

1. Поняття довговічності і надійності бетону та залізобетонної конструкції. Які фактори їх визначають.
2. Структура бетону та її вплив на його довговічність.
3. Пори в структурі бетону і їх вплив на основні властивості.
4. Міцносні та деформативні властивості бетону і їх взаємозв’язок між собою та з структурою бетону.
5. Залежність довговічності бетону від мінералогічного складу цементу.
6. Водопроникність бетону. Вплив фільтрації на його довговічність.

7. Особливості рідких агресивних середовищ.
8. Особливості твердих та газоподібних агресивних середовищ.
9. Існуючі класифікації та коротка характеристика основних видів корозії бетону.
10. Механізм і особливості корозії вилуговування. Методи захисту бетону.
11. Суть та різновиди корозії бетону другого виду.
12. Особливості карбонатної корозії бетону. Методи захисту.
13. Магнезіальна корозія бетону. Методи захисту.
14. Сульфатна корозія бетону. Методи захисту.
15. Солева корозія бетону. Методи захисту.
16. Вплив особливостей заповнювачів та води для затворення на довговічність
бетону.
17. Особливості біологічної корозії бетону. Методи захисту.
18. Газова корозія бетону. Методи захисту.
19. Основні різновиди та сфери застосування кислотостійкого бетону.
20. Водонепроникність бетону і її зв'язок з його структурою. Методи підвищення
водонепроникності бетону.
21. Механізм руйнування бетону під впливом заморожування - відтаювання та дії
низьких температур.
22. Шляхи підвищення морозостійкості бетону.
23. Спільна робота бетону і арматури. Захисна дія бетону щодо арматури.
24. Види корозії арматури. Вплив її хімічного складу на корозійну стійкість.
25. Особливості хімічної корозії арматури та закладних деталей.
26. Особливості електрохімічної корозії арматури.

27. Методи захисту арматури від корозії.
28. Особливості довговічної експлуатації попередньо напружених конструкцій.
29. Основні матеріали для захисту залізобетонних конструкцій від корозії.
30. Основні неруйнівні методи контролю властивостей бетону і арматури у складі

залізобетонної конструкції. Коротка характеристика приладів.

4.2. ВПРАВИ

1. В результаті обстеження плит покриття фільтраційних станцій, які вийшли з ладу, отримали наступні дані:

Строк служби, років	5	7	10	15	20	25	30
Кількість зруйнованих плит	5	6	8	10	10	8	5

Знайти середній строк служби плит та ймовірність виходу з ладу плити через 20 років.

Строк служби, років	5	10	13	27	30	37	55

Кількість обстежених конструкцій	8	10	1	1	5	1	13
Середній знос, %	2,7	4,1	5,0	7,0	8,4	14,0	16,0

2. В результаті обстеження конструкцій хлораторної станції отримали такі дані:

Визначити найбільш ймовірний знос конструкції за 50 років та строк капітально го ремонту будівлі (середній знос більший 10%).

3. При випробуванні бетону на водонепроникність за 4 год. через товщу стандартного циліндричного зразка висотою 0 мм просочилось 2,2 $см^3$ води. Яка марка бетону за водонепроникністю, якщо гідравлічний тиск при випробуваннях дорівнював 1,5 МПа?

4. Через безнапірну залізобетонну трубу довжиною 5м, товщиною 50 мм та внутрішнім діаметром 200 мм при тиску 0,5 МПа просочилось за добу 40 г води. Чи задовільняє труба вимогам за водонепроникністю, якщо коефіцієнт фільтрації повинен бути не більшим $7 \cdot 10^{-9}$ см/с?

5. Яка максимальна кількість води при гідравлічному тиску 1,2 МПа може пройтичерез стандартний циліндричний бетонний зразок висотою 120 мм за чотири години, щоб очікувана марка бетону за водонепроникністю була не меншою W8?

6. При вимиванні з бетону 20% CaO від його сумарного вмісту в цементному камені втрата міцності становить близько 15%, що можна вважати нижньою опустимою межею. Який мінімальний строк служби монолітної залізобетонної плити облицювання зрошувального каналу площею 100 $м^2$ і товщиною 10 см в умовах постійної фільтрації води, якщо коефіцієнт фільтрації дорівнює $2 \cdot 10^{-9}$ см/с, а середній напор становить 5 м вод. ст.? Витрату цементу прийняти рівною 350 кг на $1м^3$ бетону, вміст CaO в

портландцементі дорівнює 65%, а розчинність вапна (в перерахунку на CaO) при повільній фільтрації можна вважати максимальною - близько 1,18 г/л.

7. Яка частина CaO від його сумарного вмісту в цементному камені вимиється фільтраційною водою за 50 років з бетонної плити товщиною 20 см при середньому напорі 10 м вод. ст., якщо площа плити 35 $м^2$? Марка бетону плити за водонепроникністю W2, середня концентація вапна у воді, що пройшла через бетон - 0,5 г/л (в перерахунку на CaO), витрата цементу - 400 $кг/м^3$ бетону. Чи можна вважати такі умови експлуатації небезпечними з точки зору корозії 1 виду?

8. Максимальний вміст сульфатів (в перерахунку на SO_4^{-2}) в цементному камені по відношенню до цементу не повинен перевищувати 10%. Яку мінімальну марку за водонепроникністю може мати бетон лицювальних плит підводної частини каналу товщиною 15 см, якщо за 100 років експлуатації під напором 20м вод.ст. товщина переродженого (внаслідок сульфатної корозії) шару бетону не повинна перевищувати 5 см? Середня концентрація сульфат-іона у воді, що омиває бетон, дорівнює 500 мг/л, а витрата цементу на 1 $м^3$ бетону - 300 кг.

9. Чи можна застосовувати в умовах, агресивних за вмістом сульфатів, цемент, виготовлений з клінкеру наступного хімічного складу: CaO - 60,7%, SiO_2 - 28,4%, Al_2O_3 - 5,2%, Fe_2O_3 - 2,5%, MgO - 1,5%, SO_3 - 0,6%, Na_2O - 1,1%?

10. Розрахувати, скільки вільного вапна виділиться при гідратації 15 кг портландцементу I типу із вмістом аліту 55%, якщо гідроліз пройшов на 61%? Який процентний вміст $Ca(OH)_2$, що утворився, у вихідній масі цементу? Чи слід застосовувати заходи по обмеженню фільтрації води через бетон на даному цементі з умови корозії першого виду,

якщо допустити можливість повного вимивання вільного вапна?

11. Для спорудження підводної частини греблі намічено застосувати бетон на портландцементі з мінеральними добавками (типу II). Мінералогічний склад клінкеру наступний: C_3S - 62%, C_2S -14%, C_3A - 5%, C_4AF - 8%. Визначити співвідношення "клінкер : активна мінеральна добавка", при якому весь $Ca(OH)_2$, який виділяється при гідратації аліту, буде зв'язаний у однокальцієвий гідросилікат. У якості добавки використовують опоку з вмістом активного SiO_2 = 60%.

12. Для того, щоб не відбувалось розтріскування бетону масивних гідротехнічних споруд в початковий період твердіння цементу, обмежується його теплота гідратації. Чи можна застосувати для зведення бетонної греблі цемент на основі клінкеру такого мінералогічного складу: C_3S - 46%, C_2S - 26%, C_3A - 8%, C_4AF - 15%? Граничне тепловиділення цемету у 3-хдобовому віці дорівнює 210 кДж/кг, у семидобовому - 251 кДж/кг.

13. Цемент якої марки слід застосувати для виробництва бетону класу В20, якщо його марка за водонепроникністю повинна бути не нижчою W4? Використовують рядові заповнювачі. На скільки очікувана міцність бетону може бути більшою за необхідну?

14. Яке водоцементне відношення - з умови міцності чи морозостійкості слід прийняти при розрахунку складу бетону класу В20 і марки за морозостійкістю F300, якщо використовується цемент марки 500 і рядові заповнювачі? Чи можна застосувати цемент нижчих марок і яких?

15. Розрахувати очікувану марку за морозостійкістю (за формулою Горчакова Г.І.) для бетону з кубиковою міцністю 25 МПа на цементі марки 500 і рядових заповнювачах. Ступінь гідратації цементу 70%, водопотреба бетонної суміші 190 л/м^3.

16. З умови міцності отримали наступний номінальний склад бетону: Ц=320 кг/м^3; В=200 л/м^3; Щ=1200 кг/м^3; П=660 кг/м^3. З умови корозійної стійкості у проекті споруди передбачено застосувати особливо щільний бетон з В/Ц≤ 0,45. Як відкоригувати наведений склад бетону за рахунок введення мікронаповнювача - золи ТЕС з дійсною густиною $\rho_з$=2,1 г/см^3, щоб забезпечити необхідне В/Ц без перевитрати цементу? Яка перевитрата цементу буде у випадку, якщо не вводити мікронаповнювач? Для розрахунків прийняти $\rho_ц$=3,1 г/см^3; $\rho_п$=$\rho_щ$=2,65 г/см^3; $\rho_{нщ}$=1450 кг/м^3.

17. При стандартному випробуванні бетону на морозостійкість отримал такі результати для кубиків розміром 10х10х10 см:

Кількість циклів Випробувань	Контрольні зразки			Зразки, що випробовуються		
	Руйнівне навантаження, кН					
0	157	163	154	-	-	-
50	-	-	-	148	156	152
75	-	-	-	142	150	140

Яка марка бетону за морозостійкістю?

18. При стандартному випробуванні дорожного бетону на морозостійкість отримали такі результати для кубиків розміром 10х10х10 см:

Кількість циклів	Контрольні зразки					Зразки, що випробовуються
Випробувань	Руйнівне навантаження, кН / Маса, кг					
0	206 / 2,40	213 / 2,45	211 / 2,38	-	-	-
150	-	-	-	208 / 2,44	206 / 2,38	198 / 2,36
200	-	-	-	205 / 2,35	196 / 2,34	200 / 2,26

Яка марка бетону за морозостійкістю?

19. При визначенні міцності бетону, що працював в умовах сульфатно-агресивного середовища, молотком Кашкарова отримали такі результати:

Діаметр відбитка на бетоні, мм	5,1	4,2	3,1	4,6	4,2	3,6	3,8	6,0	5,3	4,7
Діаметр відбитка на еталоні, мм	2,5	2,3	1,7	3,2	3,0	2,4	2,1	3,1	3,0	2,6

Середня міцність зразків-кернів, вибурених з моноліту, склала 18 МПа. Чи можна застосовувати молоток Кашкарова для визначення міцності бетону, який працює в умовах корозії

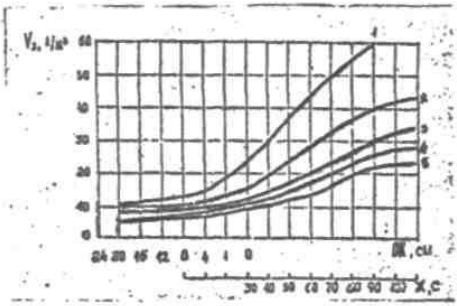

Рис. 1. Залежність об'єму защемленого повітря від показників рухливості і жорсткості (за технічним віскозиметром) бетонної суміші
1 - при найбільшій крупності заповнювача 10 мм;
2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 70 мм

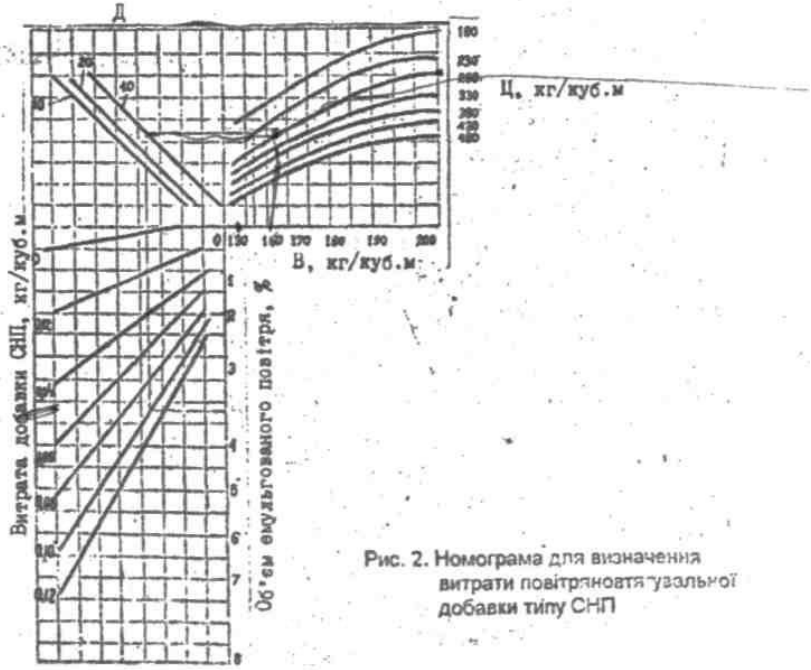

Рис. 2. Номограма для визначення витрати повітряновтягувальної добавки типу СНП

ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л.Основи бетонознавства. К. : Основа, 2007. 616 с.
2. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Бетони і будівельні розчини. К. : "Основа", 2008. 448 с.
3. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Проектування складів бетону із заданими властивостями. Рівне, 2000. 215 с.
4. Проектування і аналіз ефективності складів бетону. / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Горячих М. В., Шмигальський В. М. Рівне : НУВГП, 2009. – 173 с.
5. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетонов. Львов : Вища школа, 1981. 160 с.
6. Дворкин Л. И., Гоц В. И., Дворкин О. Л. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов. М. : Инфра-Инженерия, 2014, 432 с.
7. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. М. : Инфра-Инженерия, 2015, с. 386.
8. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012,172 p.
9. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010, 409p.
10. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-parametric Concrete Compositions design. Nova science Publishers, New York, USA, 2013, 223 p.
11. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В. та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
12. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції. Правила проектування. Київ : Мінрнгіонбуд, 2010. 166 с.

13. ДСТУ Б В.2.7– 214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. К. : Мінрегіонбуд, 2010. 31 с.

14. ДСТУ Б В. 2.7-215:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу

15. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови

16. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови

17. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови

18. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206-1:2000, NEQ)

19. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови

20. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2001, NEQ)

21. ДСТУ Б В.2.7-205:2009 Будівельні матеріали. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови

22. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD)